

**SIMULATION OF FAILURE BREAK OF STEAM GENERATOR TUBES OF  
THERMOELECTRIC TERMOTASAJERO COLGENER USING PETRI NETS****SIMULACION DE FALLA EN ROTURA DE TUBO DEL GENERADOR DE  
VAPOR DE LA TERMOELECTRICA TERMOTASAJERO COLGENER  
USANDO REDES DE PETRI**

**MSc(c). Marlon Mauricio Hernández Cely, PhD. Rocco Tarantino Alvarado**  
**MSc. Sandra Aranguren Zambrano**

**Universidad de Pamplona**

Ciudadela Universitaria. Pamplona, Norte de Santander, Colombia.

Tel.: 57-7-5685303, Fax: 57-7-5685303, Ext. 144

E-mail: marlonmauriciohc@ufps.edu.co, {roccot, saranguren}@unipamplona.edu.co

**Abstract:** The problem of failure to break into the superheater tube water tube boilers remains an important factor in unavailability, causing decreases in load and in the most critical case, a failure to produce an unscheduled stoppage of the unit. This particular case study reports on the deteriorating chimney sweep nozzle temperature due to fatigue or creep; dimensional analysis carried out confirmed the cause of deterioration. In the simulation of the fault has a fault diagnosis scheme, applied to the steam generator, modeling techniques based on dynamic systems through Petri nets framework that take into account the normal operating parameters and existing alarm Thermolectric Power Plant boiler of Termotasajero Colgener.

**Keywords:** Superheater, steam generators, corrosion, erosion, Petri nets, creep.

**Resumen:** La problemática de falla en rotura de tubo en el sobrecalentador de calderas acuatubulares continúa siendo un factor importante de indisponibilidad, ocasionando decrementos de carga y, en el caso más crítico, una falla que produzca un paro no programado de la unidad. El presente estudio reporta un caso particular sobre el deterioro de la boquilla del deshollinador debido a fatiga por temperatura o Creep; los análisis dimensionales realizados confirmaron la causa de deterioro. En la simulación de la falla se presenta un esquema de diagnóstico de fallas, aplicado al generador de vapor, basado en técnicas de modelado de sistemas dinámicos mediante redes de Petri marcadas donde se tendrán en cuenta los parámetros de operación normal y de alarma existentes de la caldera de la Central Termoeléctrica de Termotasajero Colgener.

**Palabras clave:** Sobrecalentador, generador de vapor, corrosión, erosión, Redes de Petri.

## 1. INTRODUCCION

Con el tiempo, todo sistema físico manifiesta modificaciones en la dinámica de su funcionamiento. Esto puede atribuirse a diferentes causas, como por ejemplo, desgaste por fricción, deterioro por sobrecalentamiento o envejecimiento

natural, entre otras. Estos cambios evolucionan gradualmente, hasta llegar a convertirse en fallas relacionadas con la confiabilidad, disponibilidad, eficiencia, seguridad y continuidad de la operación, las cuales afectan gravemente los índices de desempeño del sistema (Suárez *et al.*, 2006).

En relación a la literatura especializada y al análisis de falla llevados a cabo en diferentes partes del mundo (Jones, 2001; ASM International, 1992 y 2002; Espejo y Martínez, (2005). NALCO, (1997), los modos de falla comunes en tuberías de caldera acuatubulares son fractura por Creep, fatiga térmica o sobrecalentamiento de corta y larga duración, así como la corrosión por ceniza de combustóleo propagada tanto desde el lado del hogar como de fuegos.

El caso de estudio del presente artículo pertenece a una Central Termoeléctrica Termotasajero Colgener ubicada en el Municipio de San Cayetano Norte de Santander Colombia, a base de carbón, donde se presentaron fallas esporádicas en una caldera acuatubular que alimenta una turbina de 150 MW, consistentes en erosión y corrosión ubicados en banco de tubos del sobrecalentador primario específicamente los cercanos a las boquillas de los deshollinadores retractiles, la falla no solo involucró las boquillas de los deshollinadores, sino también tubos adyacentes que fueron erosionados por los chorros de vapor dirigidos a gran velocidad que originaron de las grietas.

Es conveniente resaltar que esta falla de rotura de tubo dejó sin servicio la planta por 207.05 horas con una pérdida de producción de 33,741.000 KW/hr; este tipo de fallas se consideran esporádicas pero cuando se dan causan gran impacto en la producción.

Para simulación de la falla se sigue el método desarrollado por Lo, Ng y Trecat (Lo K. L., et al., 1997), el cual consiste en obtener un modelo de causalidad del elemento a diagnosticar, utilizando una red de Petri denominada red hacia adelante. Una vez obtenido este modelo, se invierte el sentido de los arcos de conexión, obteniéndose una red de Petri hacia atrás. (Suárez *et al.*, 2006; Lo, y J. Trecat (1997).

## 2 ANALISIS DE LA FALLA

Como se puede apreciar en la figura 1, el tubo presenta una erosión externa, que finalmente debilito la pared del tubo hasta provocar la perforación.

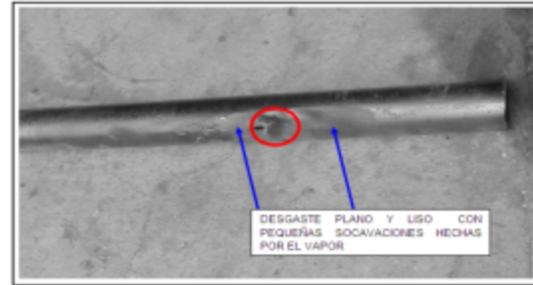


Fig. 1 Erosión externa al tubo del sobrecalentador primario Termotasajero Colgener

Observando el tubo afectado y según NALCO, (1997), “Quizá la causa más común de erosión en las calderas es el ataque por los aventadores de hollín. Por lo general, un deshollinador mal dirigido hace que un chorro a alta velocidad, de vapor o de aire, que arrastra gotas de agua condensada choque directamente contra las superficies de los tubos”.

Las superficies atacadas están adelgazadas localmente, por lo general con la formación de zonas alineadas en forma longitudinal de metal aplanado que se encuentran limitadas en ambos lados por resaltos de metal no atacado. Cuando se mira en sección transversal, el tubo parece haber sido “aplanado” en el sentido de su longitud (Figuras. 2 y 3).

Los desgastes localizados en el tubo se pueden observar como dos superficies planas con diferentes inclinaciones respecto al plano vertical y resaltos por lado y lado donde el tubo no fue atacado, en la dirección del flujo del deshollinador 10R. Figura 3.

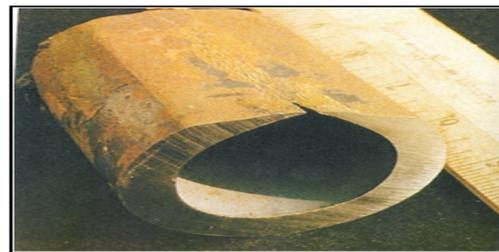


Fig. 2 Sección adelgazada del sobrecalentador por erosión debido al aventador de hollín.



Fig. 3. Desgastes localizados en el tubo con diferentes inclinaciones.

Las picaduras del tubo de pared se formaron debido al ataque del chorro de vapor que escapó por el agujero del tubo separador que está ubicado frente al agujero.

### 3. CARACTERIZACION DE LA FALLA

La boquilla presenta una falla frágil debida al Creep. Figura 4.



Fig. 4. Fractura de la boquilla debido al Creep.

La falla por *creep* se observa en otros deshollinadores, que da como resultado el deterioro de la boquillas, formando grietas y levantado el material de la misma hasta que la región afectada se desprende por la acción del flujo del vapor, conllevando al desprendimiento total de la boquilla.

La fatiga por temperatura o *creep* se da por el sometimiento al material a altas temperaturas y sus ciclos térmicos de calentamientos y enfriamientos, que acompañado como en este caso, de erosión debido al flujo de vapor en el interior y el ataque corrosivo de la ceniza, ocasionan fallas en la boquillas de los deshollinadores. NALCO, 1997.

Según el análisis la rotura en la boquilla se dio inicialmente en forma de concha esta pudo

formarse de manera que direccionaba el flujo hacia la pared, de este modo se aceleró el proceso de erosión. Otro factor que pudo acelerar la erosión es la formación de condensado en el vapor de deshollinado.

Como se puede observar en la figura 5 y 6, la falla de la boquilla del deshollinador retráctil 6L, al caerse la concha del lado derecho, la concha de la izquierda direcciona el flujo de vapor hacia la pared de la caldera.

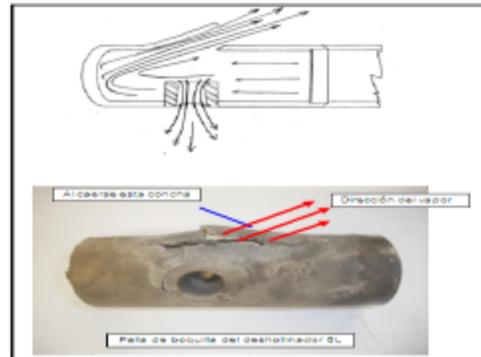


Fig. 5. Falla de la boquilla del deshollinador retráctil 6L



Fig. 6. Falla en la boquilla del deshollinador

### 4 PROGRESO Y EFECTOS DE LA FALLA

Cuando se presenta esta falla por rotura de tubo y de acuerdo con su gravedad, el nivel del domo tenderá a disminuir, haciendo que su control responda hacia mantenerlo, con el consecuente incremento del flujo de agua de alimentación, pero cuando este flujo sea insuficiente el nivel se saldrá de sus parámetros normales, llegando a operar el disparo del generador de vapor, por debajo del nivel del domo y en caso de no operar esta protección, se corre el riesgo de que el resto de los tubos del sobrecalentador se queden sin refrigeración, con el consecuente daño.

Igualmente, la presión del domo disminuirá como efecto del decremento en la producción del vapor originado por la falla y que subsiguientemente causará desviaciones al vapor sobrecalentado y recalentado, aumentando éstos su temperatura y disminuyendo su presión. Al tomar la medición de baja presión del vapor sobrecalentado, el control de la combustión enviará la señal con la instrucción de incrementar tanto el flujo de aire y de combustible, provocando que la presión en el hogar aumente, pudiendo llegar al valor de disparo del generador de vapor por alta presión en el hogar. Otro parámetro será el incremento del flujo de agua hacia el desaireador, causando disminución del nivel del condensador, con el aumento consecuente del flujo de repuesto al ciclo y el abatimiento del tanque de agua de repuesto de condensado.

Si no se aplican las acciones correctivas a estos efectos originados por la falla, se podrían dañar los tubos adyacentes del sobrecalentador y existirían esfuerzos térmicos por la nula o baja circulación a través de los tubos dañados, además de las altas temperaturas. También se sometería a la turbina a esfuerzos térmicos y empujes axiales, por condiciones de baja presión y alta temperatura del vapor, pudiendo presentarse rozamientos entre partes fijas y móviles, fisura o erosión por la formación de humedad, siendo más crítico en los últimos pasos de la turbina de baja presión. (Suárez *et al.*, 2006; Lo, y J. Trecat (1997).

## 5. SIMULACION DE LA FALLA EN REDES DE PETRI

### 5.1. Definición algebraica de la red de Petri

Las definiciones siguientes son dadas por, (David y Alla, 1992).

#### 5.1.1. Red de Petri ordinaria no marcada.

Es una 4-tupla  $Q = [P, T, Pre, Post]$ , donde:

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$  es un conjunto finito de lugares  
 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$  es un conjunto finito de transiciones

$P \cap T = \emptyset$  y  $P \cup T \neq \emptyset$ , los conjuntos  $P$  y  $T$  son disjuntos.

Pre:  $P \times T \rightarrow \{0, 1\}$  es la aplicación de la entrada de incidencia.

Post:  $P \times T \rightarrow \{0, 1\}$  es la aplicación de la salida de incidencia.

Pre:  $(P_i, T_j)$  es el peso del arco  $P_i \rightarrow T_j$ ; el peso es de 1 si el arco existe y 0 si no.

Post:  $(P_i, T_j)$  es el peso del arco  $T_j \rightarrow P_i$ .

#### 5.1.2. Red de Petri generalizada no marcada.

Se define como una red de Petri ordinaria no marcada, excepto que:

Pre:  $P \times T @ N$

Prot:  $P \times T @ N$

Donde  $N$  es el conjunto de los números naturales.

Se utiliza la siguiente notación:

- $T_i = \{P_i \in P \mid \text{Pre}(P_i, T_j) > 0\}$  = Conjunto de lugares de entrada de  $T_j$ .
- $T_i^0 = \{P_i \in P \mid \text{Post}(P_i, T_j) > 0\}$  = Conjunto de lugares de salida de  $T_j$ .
- $P_i = \{T_i \in T \mid \text{Post}(P_i, T_j) > 0\}$  = Conjunto de transiciones de entrada de  $P_j$ .
- $P_i^0 = \{T_i \in T \mid \text{Pre}(P_i, T_j) > 0\}$  = Conjunto de transiciones de salida de  $P_j$ .

#### 5.1.3. Red de Petri marcada

Es un par  $R = [Q, M_o]$ , donde  $Q$  es una red de Petri no marcada y  $M_o$  es la marca inicial. Con el uso de álgebra lineal para el análisis de redes de Petri, se introduce un cierto formalismo matemático, aplicable a las redes de Petri ordinarias y generalizadas.

#### 5.1.4. Red de Petri pura

Una red de Petri es una red pura, si no existe ninguna transición que tenga un lugar que sea al mismo tiempo de entrada y salida de la transición:

$$\forall t_j \in T, \forall p_i \in P, \text{Pre}(p_i, t_j) \text{Post}(t_j, p_i) = 0 \quad (1)$$

### 5.2. Matriz de incidencia.

Para una red de Petri  $N$  con  $n$  transiciones y  $m$  lugares, la matriz de incidencia  $A = [a_{ij}]$  es una matriz de  $n \times m$ , y sus entradas típicas son dadas por:

$$a_{ij} = a_{ij}^+ - a_{ij}^- \quad (2)$$

Donde  $a_{ij}^+ = w(i, j)$  es el peso del arco de la transición  $i$  a su lugar de salida,  $j$  y  $a_{ij}^- = w(i, j)$  es el peso del arco de la transición  $i$  a su lugar de entrada  $j$ . a continuación se muestra matriz de incidencia  $A$ , de la Figura 7.

$$A = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

5.3. Ecuación de estados

A partir de la matriz de incidencia se pueden obtener los estados siguientes de la red, conociendo qué transición será disparada y el estado actual de la red. Esto se puede realizar aplicando la ecuación 3, (Murata T, 1977):

$$M_k = M_{k-1} + A^T \sum_{k=1}^d u_k \quad k = 1, 2, \dots \quad (3)$$

En la Figura 7, se muestra la red de Petri en su estado inicial y un estado siguiente figura 8, después de cumplirse la transición 1. Nótese como utilizando la ecuación (3) de estados se pudo predecir el estado siguiente de la red.

Estado siguiente de la red de la red de Petri de la figura 8:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Para la simulación de la falla se tendrán en cuenta los parámetros de operación y de alarma existentes en la caldera que se dan en las, tablas 1, 2 y 3

La primera etapa en el proceso de diagnóstico, consiste en obtener un modelo causal del sistema al cual se desea hacer el diagnóstico; a partir de estos modelos de los elementos, se obtienen los modelos de fallas, para esto, basta con invertir la dirección de los arcos de conexión de los elementos figura 9. Además, se incluyen en la red de diagnóstico algunas señales de alarmas, que serán de ayuda para la labor de diagnóstico. Ver figuras 7 y 8.

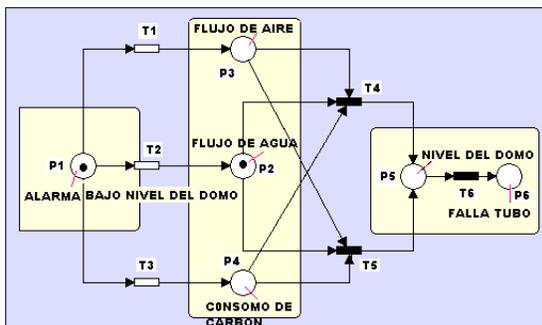


Fig. 7. Modelo causal del sistema simulado en una Red de Petri marcada hacia adelante.

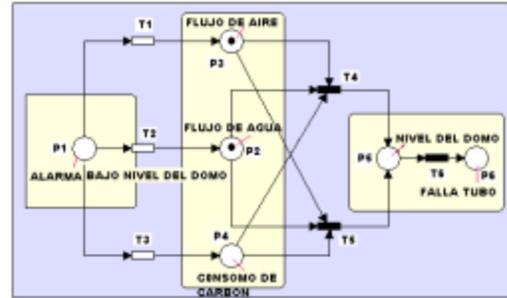


Fig. 8. Modelo causal del sistema simulado en una Red de Petri marcada disparo de la transición T1.

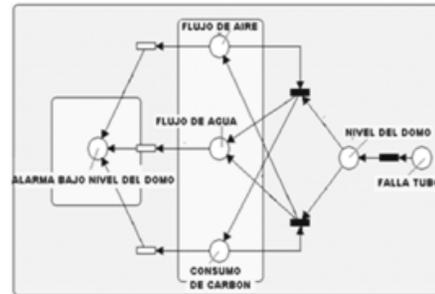


Fig. 9. Modelo del diagnóstico de la falla simulado en una Red de Petri marcada hacia atrás.

Este método consiste en seleccionar los elementos sobre los que se hará el diagnóstico y una vez seleccionado, se realiza un modelo causal de propagación de falla de dicho elemento.

El propósito del proceso de diagnóstico de fallas es deducir la operación de los elementos de la planta. Esto se logra analizando la información disponible mediante el uso de un modelo de red de Petri. Los elementos candidatos de falla son modelados mediante redes de Petri marcadas. Ver figura 7 y 8.

En esta etapa de desarrollo, el sistema de diagnóstico no utiliza un modelo matemático de la planta, sino los modelos descriptivos causales obtenidos, pero como no se cuenta con un modelo matemático, no se obtienen residuos para hacer diagnóstico, por lo que el sistema de diagnóstico basa su operación en alarmas tradicionales (superación de un umbral establecido) como son rangos de operación, que presentan los elementos de la planta. En dado caso que una variable sobrepase el umbral establecido, se indica un síntoma; para que se declare una falla, es necesario que todos los síntomas se presenten y de esta manera se descartan falsas alarmas. En el modelo de red de Petri, los P-elementos (lugares) son formados por los elementos que intervienen en la falla y los T-Instrumentos (transiciones), son formados por la transición de la falla y el periodo de tiempo que ocurre entre la propagación de un

elemento a otro, es decir, los umbrales se establecen en las transiciones y los arcos, así, cuando la última transición sea disparada, se establecerá la declaración de la falla. (Suárez *et al.*, 2006). Ver figuras 7 y 8,

El proceso de diagnóstico de fallas funciona esencialmente en dirección inversa al proceso del modelo causal del elemento. Esto hace posible utilizar el modelo con red de Petri, con la dirección de todas las flechas al revés. La red de Petri original es llamada red de Petri hacia adelante, Figura 10 y la utilizada en el diagnóstico se denomina red de Petri hacia atrás, Figura 11. Para la secuencia de la red de las figura 7, 8, 9 10 y 11, se deberán cumplir las transiciones con sus respectivos umbrales, representadas por los siguientes instrumentos.

- T1:** LT-81202 Transmisor de nivel, alarma por bajo nivel del domo con un valor de  $-100\text{mm } H_{20}$   
**T2:** PSH 51401. Alarma alta presión hogar con un parámetro de  $106\text{ mm } H_{20}$   
**T3:** TC 71202 Controlador de temperatura.  
**T4:** FT-61203 Transmisor de flujo, flujo de agua de alimentación, con una medida de de 0 a  $600\text{mm } H_{20}$   
**T5:** PT 51207 Transmisor aire primario con un parámetro de  $630\text{ mm } H_{20}$   
**T6:** PT 51239 Transmisor de presión, alta presión vapor principal  $128\text{ Kg/cm}^2$  (alarma).  
**T7:** TF-61209. Transmisor de flujo, decremento en la producción del vapor principal.  
**T8:** PSH 51402. Disparo de la caldera por alta presión en el hogar con un valor de  $200\text{mm } H_{20}$ .  
**T9:** LT- 81201 Transmisor de nivel, la caldera queda sin servicio por muy bajo nivel con valor de  $-253\text{mm } H_{20}$   
**T10:** LS-215H. Incremento del flujo de agua hacia el desaireador generando la alarma alto nivel del desaireador por  $+300\text{mm } H_{20}$ .  
**T11:** TC 71201 alta temperatura vapor principal.  
**T12:** LS-215I bajo nivel desaireador  $-200\text{mm } H_{20}$   
**T13:** FX-202. Transmisor de flujo, repuesto al ciclo y el abatimiento del tanque de agua de repuesto de condensado tiene un parámetro de 0 a  $600\text{T/H}$ .  
**T14:** LS 215 LL. Muy bajo nivel desaireador  $-468\text{mm } H_{20}$   
**T15:** LX202, Transmisor de nivel muy bajo nivel con un valor de  $-300\text{mm } H_{20}$  se dispara la bomba de condensado y la unidad.

Para determinar los umbrales de operación se realizaron varias pruebas y con base en la experiencia adquirida en éstas, se establecieron los límites normales de operación para las variables de interés. En algunos casos, las variables presentan un comportamiento oscilatorio y puede sobrepasar en repetidas ocasiones el umbral propuesto; en estos casos, se obtiene la media de la señal y si ésta se encuentra dentro del umbral, no se decreta el

síntoma. (Suárez *et al.*, 2006; Lo, y J. Trecat (1997; Hernández R *et al.*, 2005; David y Alla, 1987 1992; Lo, y J. Trecat (1997).

Tabla 1: Parámetros Principales de Operación

Parámetros Principales de Operación	
Flujo de vapor sobrecalentado	451 Ton/Hr.
Presión de salida vapor sobrecalentado	132 Kg/cm <sup>2</sup>
Presión en el tambor	142 Kg/cm <sup>2</sup>
Presión a la entrada del sobrecalentador	30,8 Kg/cm <sup>2</sup>
Presión a la salida del recalentador	30,1 Kg/cm <sup>2</sup>
Temperatura de salida vapor sobrecalentado	540 °C
Temperatura entrada recalentador	350 °C
Temperatura salida recalentador	535 °C
Temperatura agua antes economizador	240 °C
Temperatura agua después economizador	273 °C
Temperatura gases antes economizador	412 °C
Temperatura gases después economizador	338 °C
Temperatura aire después calentador aire	301 °C
Presión de trabajo	134 Kg/cm <sup>2</sup>
Temperatura de trabajo	541 °C
Consumo de carbón a máxima potencia	52.2 Ton/Hr.

Tabla 2: Parámetros Principales de Disparo de Alarma

Parámetros Principales de Disparo y Alarmas de la unidad	
Alarma alto nivel agua Domo	250 mm. Por encima del N.N
Alarma bajo nivel agua Domo	- 178 mm. Por debajo del N.N
Corte bajo nivel agua Domo	- 280 mm. Por debajo del N.N
Alarma alta presión de hogar	330 mm. H20
Corte alta presión del hogar	100 mm. H20
Alarma baja presión de hogar	-100 mm. H20
Corte baja presión de hogar	-250 mm. H20
Alarma alta temperatura vapor Sobrecalentado	543°C

Tabla 3: Alarma y Corte (Después de 5 seg.)

Alarma y Corte (Después de 5 seg.)	
Corte muy baja presión de aire Primario	610 mm. H20
Alarma alta temperatura salida Pulverizador	510 mm. H20
Alarma alta temperatura rodamiento ventiladores	930°C
Alarma baja temperatura de aceite pesado	85°C
Corte baja presión suministro aceite pesado	12 Kg/cm <sup>2</sup>
Alarma baja presión vapor atomizado	7 Kg/cm <sup>2</sup>
Alarma baja presión aire atomizado	3 Kg/cm <sup>2</sup>
Alarma baja presión aceite liviano	1,7 Kg/cm <sup>2</sup>

La manera mediante la cual se validaron los resultados obtenidos fue a través de la presentación ante especialistas como el grupo de Ingenieros de Regulación y Control, Operación, Mecánicos y Mantenimiento de Termotasajero Colgener, los cuales quedaron satisfechos y en total acuerdo con los resultados expuestos. Además la falla se simuló en el software gratuito Hpsim, con datos de operación reales del proceso que se tomaron cuando se produjo el paro de la unidad y que al momento de simular la red la secuencia de disparo de las transiciones y superación de los umbrales establecidos concuerdan con exactitud con la secuencia de operación de la planta.

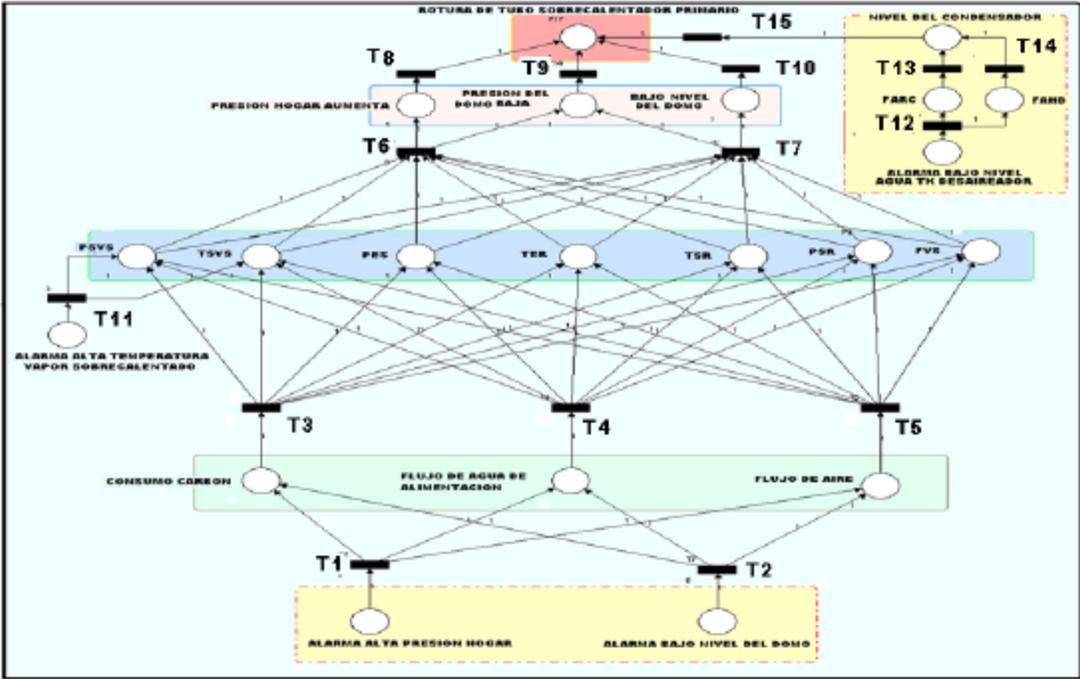


Fig. 10. Modelo causal del sistema simulado en una Red de Petri marcada hacia delante.

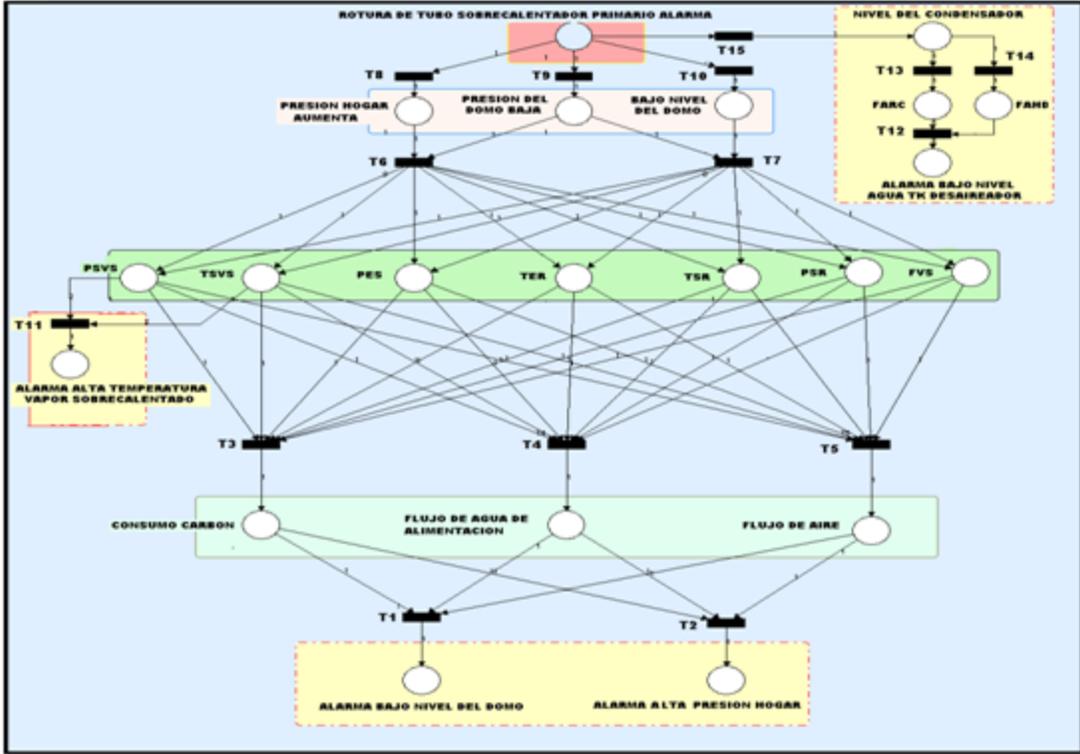


Fig. 11. Modelo del diagnóstico de la falla simulado en una Red de Petri marcada hacia atrás.

## 6. CONCLUSIONES

Se debe revisar el plan de mantenimiento preventivo respecto a la revisión del estado de las boquillas de los deshollinadores retráctiles. Se recomienda realizar una inspección interna con la caldera fuera de servicio, así como también la revisión anual ejecutarla en la parada de planta, de manera que se disponga de mejores condiciones para la ejecución del trabajo debido a las temperaturas en el área.

En la investigación de vida remanente aplicado a caldera encontramos dos mecanismos de daño tales y como el sobrecalentamiento de corta y larga duración así como la termofluencia mecanismos que juegan un papel muy importante en el estudio. El sobrecalentamiento de larga y corta duración es un mecanismo de daño propio, dicho fenómeno se presenta por diversos factores, de los cuales las acumulaciones excesivas de ceniza es la primer causante, además, la tubería de caldera, son componentes que están sometidos a rigurosas fluctuaciones de temperatura, que unido con el largo periodo de operación está siendo sometido a termofluencia. Esta se podría detectar mediante síntomas tales como aumento en el diámetro en la tubería entre otros, pero acumulaciones no permiten su adecuada inspección y apreciación.

El sistema de diagnóstico desarrollado permite una rápida detección e identificación de las fallas consideradas en el diseño. Además, la representación cualitativa del modelado basado en redes de Petri, lo hace fácilmente prolongable a un conjunto de fallas tan grande como se pretenda alcanzar o bien, fácilmente aplicable a los distintos rangos de operación de la planta, con el único requerimiento de reacomodar los umbrales de detección.

No obstante, como trabajo posterior queda la comprobación híbrida de modelos de redes de Petri con lógica difusa, donde la lógica difusa me otorgue los toquen para cada marca de la red de Petri.

## REFERENCIAS

- Suárez C., D. A. Alfredo Sánchez L, J. E. Martínez P. y García B., C. D. (2006). Diagnóstico de fallas en el generador de vapor de una termoeléctrica usando redes de Petri.
- Jones D.R.H. (2001). Failure Analysis Case Studies II. Netherlands: Elsevier, Chapters 5 and 6.

ASM. International. (1992). Handbook of Case Histories in Failure Analysis, 1st ed., vol. 1. Metals Park Ohio: ASM, Part 2.

ASM International, (2002). ASM Handbook Volume 11: Failure Analysis and Prevention. Metals Park Ohio: ASM, pp. 747-898.

Espejo. M., E. y Martínez, J. C. (2005). Análisis de la falla por agrietamiento experimentada en tuberías del evaporador de una caldera acuatubular .

NALCO, (1997). Guía Nalco para análisis de fallas en calderas, Ed. Mc Graw Hill, pp. 121-133.191-217.

Lo, K.L., H. S. Ng y J. Trecat (1997). Power systems fault diagnosis using Petri nets. IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, IEE proceedings online, Vol. 144, pp. 231-236.

Hernández R., Sánchez J.A., E. y Suárez., D.A. (2005). Neural Networks-based scheme. fault diagnosis in fossil electric power plants. Proc. of the International Joint Conference on Neural Networks, Quebec, Canada, pp. 1740 – 1745.

David, R. and H. Alla (1987). Continuous Petri Nets. 8th European Workshop on Application and Theory of Petri Nets, Zaragoza, España, pp. 275 – 294.

David, R. and H. Alla (1992). Petri nets and grafcet: tools for modeling discrete event systems , Prentice Hall.

Lo, K.L., H. S. Ng y J. Trecat (1995). Distribution fault diagnosis using Petri net theory. Proc. of the 30th Universities Power engineering conference, Vol. 2, pp. 575 – 578.

Murata, T. (1977). State equation, controllability and maximal matching of Petri nets. IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. AC – 22, No.3, pp. 412 – 416.

## ANEXOS

Abreviaturas figuras 10 y 11:

- PSVS:** Presión de Salida Vapor Sobrecalentado.  
**TSVS:** Temperatura de Salida Vapor Sobrecalentado.  
**PES:** Presión Entrada Sobrecalentador.  
**TER:** Temperatura Entrada Recalentador.  
**TSR:** Temperatura Salida Recalentador.  
**PSR:** Presión Salida Recalentador.  
**FVS:** Flujo Vapor Sobrecalentado.  
**FARC:** Flujo de Agua Repuesto de Condensado  
**FAHD:** Flujo de Agua hacia el Desaireador