

Investigación de las causas de la explosión accidental de un autoclave

Brizuela Eduardo, Defranco Gabriel.

Unidad de Investigación y Desarrollo de Estudios sobre Conversión de la Energía" - (UESCE)
Facultad de Ingeniería UNLP – Av. 1 y 47 La Plata CP 1900
ghdefran@ing.unlp.edu.ar

Resumen

Se presenta el caso de una explosión de un autoclave utilizado para el curado de caucho de la banda de rodamiento en la reparación de neumáticos de gran diámetro de aplicación en la industria minera. El siniestro implicó la voladura de una tapa de acero a varios metros del equipo con consecuencias fatales para personal de la planta. Se realizaron tres visitas, la primera de carácter informativo, la segunda de inspección mecánica y eléctrica sin afectar los componentes por razones legales, y la tercera luego del peritaje oficial para realizar mediciones con mayor libertad de acción. En base a lo observado se informa que el accidente posiblemente se debió a la conjunción de uno o más fallos de componentes individuales (sensores de fin de carrera de cierre de aros, luces indicadoras de seguridad) con información incompleta sobre el sistema de seguridad, que indujeron al operador a continuar con la presurización del autoclave aun cuando la puerta no estaba correctamente trabada. Se concluye que, si bien la causa inmediata del accidente fue un error humano, el sistema de seguridad del que estaba provisto el autoclave no proveía su objetivo último de proteger al equipo de un error de operación.

Palabras claves: Autoclave – Explosión – Accidente - Seguridad

Introducción:

A pedido de la firma Neumatech S.A se procedió a realizar inspección visual y prueba funcional parcial de un autoclave marca FIMACO ubicado en la planta que la empresa posee en el Parque Industrial 9 de Abril, partido de Esteban Echeverría.

El trabajo presente informa lo observado en las visitas de los días 31 de Octubre, 5 de Noviembre y 19 de Diciembre, por lo que no se debe concluir que lo que se informa reproduce exactamente las condiciones inmediatamente después del accidente.

Se ofrecen también observaciones, opiniones y conclusiones sobre las causas mediatas e inmediatas del accidente.

Antecedentes

El equipo en cuestión resultó siniestrado el día 22 de Octubre pasado mientras se hacía una operación productiva de rutina. Por causas que no pueden ser determinadas con exactitud absoluta se produjo la voladura de la tapa a una distancia final de unos 20 metros, frenada por otros equipos que encontró en su trayectoria, y el corrimiento por principio de reacción del cuerpo principal del equipo, destruyendo muros. Además de las consecuencias materiales resultó fallecida una persona, con heridas graves otra, y con heridas de menor consideración otras.

Primera visita: Inspección visual

Se realizó una primera visita a las instalaciones a los efectos de comprender las generalidades de la planta y la ubicación original del equipo siniestrado, su funcionamiento y el estado de las instalaciones al cabo del accidente.

Puede apreciarse a simple vista que la tapa del autoclave, que funciona como cabezal móvil del recipiente, sufrió una deformación observada en la fotografía de la Figura 1, con distorsión de su plano de apoyo y plegado según un eje que aproximadamente pasa por la línea dibujada sobre la fotografía.



Figura 1



Figura 2

Las Figuras 2 y 3 muestran la rebaba producida sobre el borde de apoyo de la tapa, indicativa de la parte que zafó del retén que le hace el aro.



Figura 3



Figura 4

Se observa también a simple vista el faltante del cilindro de cierre de aro lado superior, el cual se encontraba a pocos metros del cuerpo principal entre los escombros esparcidos alrededor del equipo. Asimismo, el soporte del gozne sobre el que articula la tapa se encuentra deformado (Figura 4).

En cuanto a los pernos que retienen los aros de cierre, se observa que el perno superior no está en su posición final que habilita la operación, sino que no completó su carrera. Se aprecia en la fotografía de la Figura 5 su extremo con signos de deformación por interferencia con otra pieza, la cual debió haber sido el aro. La posición de dicho perno es coincidente con la zona de la tapa que inicialmente habría zafado del retén que realiza el aro.



Figura 5

Segunda Visita: Observaciones y mediciones iniciales

Prueba de switches de carrera

Se procedió a verificar el funcionamiento de los switches de carrera que son comandados por los cilindros hidráulicos que accionan los aros de cierre y la tapa, dos por cada cilindro. En el siguiente cuadro se resume el resultado del ensayo, el cual fue realizado

posicionando manualmente los gatillos en posición “cerrado” y comprobando continuidad eléctrica en la bornera correspondiente. El switch indentificado como N° 7 se encontró arrancado de su fijación, pero unido a su flexible y cables de conexión, y con signos de deterioro en su caja. El switch N° 8 no se encontró; solamente existe entre los escombros un tramo de flexible de aproximadamente 1,2 m de longitud presuntamente perteneciente a dicho componente. De acuerdo a lo informado verbalmente por el Sr. Carlos Gomariz, dicho elemento fue retirado por la Policía Científica.

Estado de los switches de posición de cilindros			
Switch N°	Corresponde a	Ubicación	Funciona
1	Traba Colocada	Superior derecha	Si
2	Traba Retirada	Superior derecha	Si
3	Traba Colocada	Inferior izquierda	Si
4	Traba Retirada	Inferior izquierda	Si
5	Aro Abierto	Inferior izquierda	Si
6	Aro Cerrado	Inferior izquierda	Si
7	Aro Abierto	Superior derecha	Si *
8	Aro cerrado	Superior derecha	Faltante
9	Puerta Cerrada	Bisagra lado fijo	Si
10	Puerta Abierta	Bisagra lado fijo	No **

* Funciona pero esta suelto por causa de la explosión

** Funciona pero indica alta resistencia; probable corrosión en contactos o bornes.

Prueba de indicadores ópticos de tablero

Se verificó el estado de las lámparas de los indicadores ópticos, resumiéndose el resultado en la siguiente tabla.

Estado de las lámparas de los indicadores ópticos			
Indicador N°	Corresponde a	Ubicación en Tablero	Funciona
1	Puerta Abierta		Si
2	Puerta Cerrada		Si
3	Aro Abierto		Si
4	Aro Cerrado		Si
5	Traba Colocada		Si
6	Traba Retirada		Si

Notas:

1. Las lamparitas poseen un transformador integrado que se alimenta con 220V. Al no ser posible en esta instancia alimentarlos, se verificó solamente la integridad de las lamparitas.
2. El indicador N° 5 se encontraba fuera de su posición colgando dentro del gabinete. Se estima que esto no fue causado por el accidente ya que no está roto sino desmontado. Como no se pudo probar con 220VAC, no se sabe si fue desmontada para reparar/reemplazar o desmontado luego del accidente.

Verificación de la bornera principal

Toda la distribución eléctrica de y hacia los switches y electroválvulas se concentra en una bornera ubicada detrás de la virola de la puerta en el costado inferior derecho. En esta bornera se hicieron las verificaciones de actuación de los switches.

Se notó que falta la alimentación de 24VAC a los relés d2, d3, d4, d5 y d6 (Aro Abierto, Puerta Abierta, Puerta Cerrada, Aro Cerrado y Aro Trabado, bornes 184, 188, 190, 192 y 196); solamente el borne 180 (Traba Abierta) tiene conexión. Esto se ilustra en la Figura 6. También se notó un cable suelto, aislado con cinta de papel, que en su corte muestra varias conexiones (ver Figura 7) que al parecer sería el portador de los 24VAC faltantes. Una inspección preliminar del Tablero de Comando mostró que hay también un conductor desconectado en el otro extremo, posiblemente el mismo de 24VAC.

Como se verá en la sección siguiente, este defecto debe haber sido creado a posteriori de la explosión ya que de faltar los 24VAC en la bornera principal no se puede actuar el Tablero de Comando ni operar el autoclave.

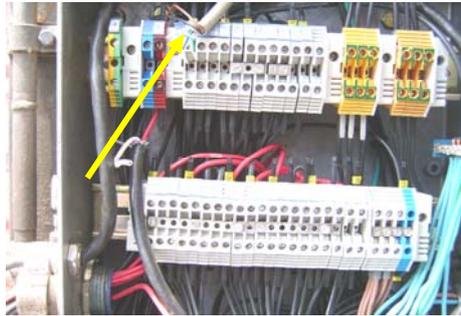


Figura 6

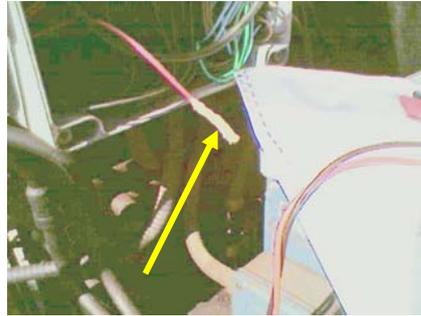


Figura 7

Estudio de la Secuencia de control de apertura y cierre de la autoclave

Se hace referencia al plano S/N de FIMACO de fecha 10/04/07 y titulado "Circuito eléctrico de comando"

Comienza la secuencia con el autoclave cerrada y trabada como al fin de una operación. Si la presión en el interior es baja el interruptor barométrico BPA cierra y alimenta 24VDC al resto de la consola, permitiendo operar los controles.

1. COMIENZO DE LA SECUENCIA DE APERTURA
2. Accionando M1 hacia arriba se activan las válvulas solenoide SR y S1 que alimentan presión hidráulica a los cuatro cilindros de las trabas y los retiran.
3. Al retirarse las trabas cierran los contactos de fin de carrera inferior izquierda y superior derecha FC1 y FC2, los que, en serie, alimentan 24VAC al relé d1.
4. Al accionarse d1 el contacto de relé 1d1 enciende la luz de Traba Abierta en el terminal b41 y el contacto de relé 2d1 alimenta 24VDC al circuito siguiente.
5. Accionando M2 hacia arriba se activa la válvula solenoide S2 que alimenta los dos cilindros hidráulicos de apertura de aros, retirando los cuatro cuartos de aro de cierre.
6. Al abrir los cuartos de aro dos de las uniones se separan (inferior izquierda y superior derecha), cerrando los contactos de fin de carrera FC3 y FC4 (Aro Abierto), lo que alimenta al relé d2 con 24VAC.
7. Al accionarse d2 el contacto de relé 1d2 enciende la luz de Aro Abierto en el terminal b42 y el contacto de relé 2d2 alimenta el circuito Abre Puerta/Cierra Puerta con 24 VDC.
8. Accionando M3 hacia arriba se activa la válvula solenoide S3 que alimenta al cilindro hidráulico que abre la puerta. Al fin de la apertura acciona el fin de carrera FC5; el contacto 1FC5 (normalmente cerrado) abre y detiene el accionar del cilindro hidráulico, y el contacto 2FC5 (normalmente abierto) cierra, alimentando 24VAC al relé d3.
9. El contacto de relé 1d3 enciende la luz de Puerta Abierta.
10. FIN DE LA SECUENCIA DE APERTURA: COMIENZO DE LA SECUENCIA DE CIERRE.
11. Accionando M3 hacia abajo se acciona la válvula solenoide S4 que alimenta el cilindro hidráulico de cierre de puerta. Al fin del cierre de la puerta se acciona el fin de carrera FC6; el contacto 1FC6 (normalmente cerrado) se abre y detiene el accionar del circuito hidráulico, y el contacto 2FC6 (normalmente abierto) cierra, alimentando 24VAC al relé d4
12. Al accionarse d4 el contacto de relé 1d4 enciende la luz de Puerta Cerrada en el terminal b44 y el contacto de relé 2d4 alimenta el circuito Cierra Aro con 24 VDC.
13. Accionando M2 hacia abajo se acciona la válvula solenoide S5 que alimenta los dos cilindros hidráulicos de cierre de aros.
14. Al cerrar los cuatro cuartos de aro los fines de carrera FC7 y FC8, conectados en serie, indican que las dos uniones accionadas hidráulicamente (inferior izquierda y superior derecha) han cerrado, y alimentan al relé d5 con 24VAC.
15. Al accionarse d5 el contacto de relé 1d5 enciende la luz de Aro Cerrado en el terminal b45 y el contacto de relé 2d5 alimenta 24VDC al circuito de Colocar Traba.
16. Accionando M1 hacia abajo se acciona la válvula solenoide S6 que alimenta los cuatro cilindros de colocar las trabas.
17. Una vez colocadas las trabas cierran los fines de carrera FC9 y FC10 de los cilindros inferior izquierdo y superior derecho, conectados en serie, y alimentan 24VAC al relé d6.
18. El contacto de relé 1d6 enciende la luz de Traba Colocada.
19. FIN DE LA SECUENCIA DE CIERRE.
20. Al presurizar el autoclave el interruptor barométrico BPA interrumpe la alimentación de 24VDC y desactiva las funciones de apertura y cierre.

Modificación de la consola

En el reverso del diagrama eléctrico de la consola hay anotado que se hicieron dos modificaciones a la señalización de Puerta Cerrada. Las modificaciones consistirían en remover la luz indicadora de Puerta Cerrada (conductores 407 y 408) y colocar el contacto de relé 1d4 entre los bornes b75 y b110. La primera parte posiblemente se debió a un fallo en el indicador luminoso (quizás transformador integral quemado ya que la lámpara está sana), e implica que no habría indicación de Puerta Cerrada (el operador de la consola así lo indicó verbalmente). La segunda parte implica que el contacto de relé 1d4, que está abierto hasta que la puerta está totalmente cerrada, estaría en serie con la alimentación a la válvula solenoide S4 que es la que cierra la puerta, es decir, no se podría cerrar la puerta. Este antecedente podría tener dos significaciones importantes: por un lado, si la indicación había fallado y/o no funcionaba esto quita valor en la mente del operador a las indicaciones de seguridad, y por otro lado puede haber afectado el momento en que se interrumpe la fuerza hidráulica que cierra la puerta, deteniéndola prematuramente.

Análisis inicial de la secuencia de cierre en vista de la falla.

1. Si el fin de carrera de Puerta Cerrada 2FC6 no cierra no se pueden cerrar los aros ya que no hay alimentación a la llave M2. Como los aros pudieron ser cerrados, el fin de carrera de Puerta Cerrada debe haber funcionado, aunque esto no indica que la puerta haya estado en la posición correcta (puede haber estado desajustado el fin de carrera)
2. Si los dos fines de carrera de los cuartos de aro inferior izquierda y superior derecha FC7 y FC8 no cierran no se pueden colocar las trabas ya que no hay alimentación a la llave M1. Como las trabas pudieron ser colocadas (al menos tres de ellas, lo que indica que el circuito hidráulico de traba funcionó), los fines de carrera de los cuartos de aro deben haber cerrado.
3. No obstante, la luz de Traba Colocada no debe haber funcionado, ya que uno de los dos fines de carrera de las trabas (el superior derecho) no puede haber funcionado ya que el perno no salió, por no estar el cuarto de aro en su lugar.
4. Los fines de carrera del cuarto de aro inferior izquierdo funcionan correctamente, así como el fin de carrera de Aro Abierto del cuarto de aro superior derecho. El de Aro Cerrado del cuarto de aro superior derecho fue arrancado por la explosión y según se dijo fue retirado por las autoridades policiales. No obstante esto sólo indica que funcionan y no asegura que hayan estado correctamente ubicados.

Tercera Visita: Inspección y Mediciones eléctricas y mecánicas

En la tercera visita se realizaron un número de mediciones eléctricas y mecánicas para descartar alternativas de fallas.

Con respecto a los actuadores de pernos, el inferior izquierdo se encontró extendido (Figura 8) pero sin alcanzar a actuar el cierre de carrera (Figura 9).



Figura 8

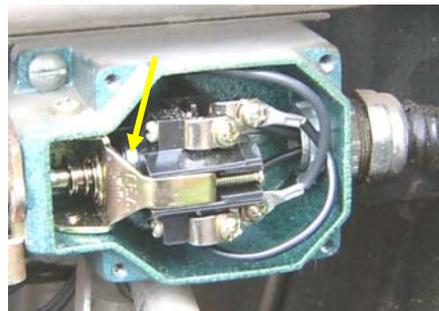


Figura 9



Figura 10



Figura 11

En vista de esto se procedió a desmontar el cilindro hidráulico y verificar la carrera total, comprobándose que el cilindro no estaba completamente extendido, y que en su total extensión actúa correctamente el fin de carrera. Es posible que a causa del accidente el perno haya retrocedido unos milímetros.

El actuador superior derecho, que no se extendió, no fue verificado de la misma manera por ser esto superfluo, ya que de ninguna manera podría haber actuado el fin de carrera: nótese la extensión del perno cuando está correctamente colocado (Figura 10).

Se verificaron los cables de conexión de los fines de carrera de los pernos a la caja de bornes no hallándose cortocircuitos entre ellos que podrían haber simulado el cierre de un fin de carrera.

Lo mismo se hizo con el fin de carrera de aro cerrado inferior izquierdo, notándose que el interruptor está fuertemente afectado por corrosión (Figura 11), aunque funciona correctamente; no se hallaron cortocircuitos.

El interruptor de aro cerrado superior derecho no pudo ser sometido al mismo examen eléctrico ya que no fue hallado en su sitio. En esta visita se encontró un interruptor dentro del tablero de control que parece ser el faltante superior derecho, ignorándose cómo llegó allí; este interruptor funciona satisfactoriamente.

Desde la caja de bornes hacia el tablero de control no se pudo realizar una completa verificación del cableado ya que este fue cortado (Figura 12) luego de la explosión. Desde el corte hacia el tablero se verificó que no había cortocircuito entre los cables de pernos y aros.

En el tablero se verificó el cableado de puerta cerrada, aro cerrado y traba colocada, sin encontrar cortocircuitos ni desconexiones salvo lo que sigue. En relación a la modificación hecha (según las autoridades de la empresa) por el fabricante en el área de puerta cerrada se encontró que efectivamente la luz de puerta cerrada (borne 408) está desconectada en el relé d4 (Figura 13); esto posiblemente se debió a que el transformador de 220V a 9V de la luz de puerta cerrada estaba dañado (Figura 14) y se deshabilitó su alimentación.



Figura 12

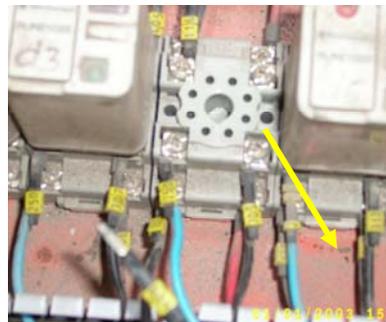


Figura 13



Figura 14

Con respecto a la modificación de la línea de control de cierre de puerta, efectivamente se intercaló un contacto del relé d4 en serie con el fin de carrera de puerta cerrada, entre los bornes 75 y 110, pero se utilizó un contacto normalmente cerrado (no el de la luz, que es normalmente abierto) con lo que la operación de cierre es posible (ver más

arriba, Modificación de la consola). No es evidente qué se perseguía con esta modificación ya que el mismo fin de carrera FC6 actúa el relé d4 y corta la alimentación hidráulica de cierre de puerta S4, con lo que el contacto interpuesto resulta superfluo

Discusión

Las preguntas que surgen, y sus posibles respuestas, son (asumiendo que el interruptor de aro cerrado superior derecho es el que fue hallado en la tercera visita):

1. Porqué no cerró bien el cuarto de aro superior derecho?

Posibles causas serían

- a) puerta mal cerrada (poco probable ya que los otros tres cuartos cerraron),
- b) cuerpo extraño en el canal del aro (no se pudo probar),
- c) deformación del aro o las virolas de puerta y/o autoclave (ídem),
- d) fin de carrera de Aro Cerrado superior derecho desajustado (considerado más probable), trabado en la posición cerrado (poco probable) o con contactos pegados (poco probable), en los tres casos terminando la operación hidráulica de cierre del aro cuando el cuarto de aro inferior izquierdo cerró pero aún no estaba el cuarto de aro superior derecho en posición.

2. ¿Por qué se pudo accionar las trabas si los aros no estaban correctamente cerrados?

Posibles causas serían

- a) relé d5 trabado en posición cerrado (poco probable),
- b) fin de carrera de Aro Cerrado superior derecho trabado en posición cerrada (poco probable),
- c) fin de carrera de Aro Cerrado superior derecho desajustado, indicando aro cerrado cuando aún no estaba el cuarto de aro en posición (considerado más probable),
- d) cables de fines de carrera de aro cerrado en cortocircuito en los conductos, simulando aro cerrado (no fue demostrado).

Con respecto al sistema de seguridad, éste adolece de dos fallas consideradas críticas, una de filosofía de diseño y otra de información.

El sistema de seguridad debe su existencia a la consideración que si el autoclave es operado incorrectamente se puede producir un grave accidente. Es por consiguiente necesario impedir que por error humano se opere el sistema cuando las condiciones de seguridad no están dadas.

En su filosofía de diseño el sistema electromecánico provisto no cumple con este objetivo básico, ya que la decisión de presurizar o no el autoclave queda al operador. *El sistema de seguridad no impide el accidente.*

Hubiera sido relativamente sencillo introducir, por ejemplo, una electroválvula en la línea de presurización para impedir la operación si los pernos no están en posición de traba.

Con respecto a la información suministrada sobre el sistema de seguridad, se hizo énfasis en que los pernos son un componente adicional de seguridad y que no retienen los aros de cierre; la puerta es retenida por los aros y los pernos de hecho no tocan los aros cuando los aros están cerrados. De esta manera se quita importancia a la alternativa opuesta, que debió ser enfatizada fuertemente: que si bien ubicar los pernos no agregan seguridad al cierre, *la no colocación de los pernos es una falta gravísima de seguridad* que abre la posibilidad de un accidente fatal, como sucedió.

En la mente del operador, si el sistema da paso de la etapa 2 a la etapa 3 la puerta está asegurada por los aros; los pernos son sólo un adicional de seguridad....

Finalmente se nota que no se suministró información para verificar el correcto funcionamiento de los fines de carrera; en rigor de verdad sólo se suministró información de mantenimiento después del accidente.

CONCLUSIONES

La causa principal del accidente fue que el sistema dio por cerrados los aros de traba de la puerta cuando no estaban en su posición correcta. Esto permitió continuar con la operación siguiente de colocar los pernos de traba, dando al operador la impresión errónea de que la puerta estaba correctamente trabada por los aros.

La razón por la que el sistema erróneamente indicó que los aros estaban en posición no se ha podido determinar; se sospecha que se debió a un desajuste de los fines de carrera de los aros. No se habían provisto instrucciones de mantenimiento preventivo para verificar el correcto funcionamiento de los fines de carrera.

La causa mediata fue que el sistema de seguridad finalmente no impide que se produzca el accidente ya que queda a criterio del operador presurizar o no, independientemente del estado del sistema. Se considera que era perfectamente factible proveer adiciones al sistema de seguridad que impidieran el accidente.

La presurización sin tener la indicación de pernos de traba colocados fue un error humano, probablemente producto de desconfianza hacia el estado de las luces indicadoras y del concepto erróneo de que los pernos de traba eran sólo un adicional de seguridad y no que su falta era un indicación gravísima de inseguridad. Esto evidencia un defecto global del sistema de seguridad, cuya existencia precisamente debiera haber impedido un accidente por operación incorrecta.

RECOMENDACIONES

En el proceso de reparación del autoclave se recomiendan las siguientes adiciones y/o modificaciones al sistema:

1. Adicionar una electroválvula que impida la presurización manual si las condiciones de seguridad no están completas
2. Los extremos de los cuartos de aro que son aproximados por los cilindros de cierre de aros debieran estar provisto de argollas (u orejas perforadas) tales que los orificios de las argollas coincidan cuando los cuartos de aro están correctamente cerrados. Se debe entonces proveer cilindros hidráulicos adicionales, similares a los de los pernos de traba, tales que al accionar enhebran las argollas, asegurando positivamente el cierre de aros.
3. Se deben proveer las instrucciones y los medios materiales (galgas) para verificar periódicamente el ajuste de los fines de carrera.
4. Se debieran reemplazar los fines de carrera por elementos de otra tecnología y otro montaje, más precisos y menos susceptibles de desajuste.
5. Adicionar una alarma audible que indique que la cámara se está presurizando (por ejemplo, según indique el interruptor barométrico) sin estar completadas las condiciones de seguridad (por ejemplo, por pérdidas en la/s válvula/s de presurización).