

Análisis de Vías Libres para mantenimiento partiendo de las Configuraciones de Aislamiento.

A. Torres Valle, J. Rivero Oliva.

Dpto. Ingeniería Nuclear. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas.
Ave. Salvador Allende y Luaces, Quinta de los Molinos, Plaza.
Telef: 878-5018.
Email: atorres@fctn.isctn.edu.cu, jrivero@fctn.isctn.edu.cu

(Recibido el 10 de Enero de 2004, aceptado el 12 de Abril de 2004).

Resumen.

La seguridad durante las intervenciones de mantenimiento se trata de manera limitada y en general independiente de los sistemas de gestión del mantenimiento. Esta variable está afectada por múltiples factores de tipo técnico o humano, muchas veces subjetivos y difíciles de cuantificar, lo que limita el diseño de planes preventivos. Sin embargo, algunos factores constituyen puntos comunes: las configuraciones de aislamiento durante las vías libres y los errores humanos asociados a su violación. Esta característica permitió desarrollar el análisis de tales situaciones a través de la metodología de árboles de fallos que vincula coherentemente fallos de equipos y errores humanos. La metodología ha sido automatizada dentro del código MOSEG Win Ver 1.0 y la misma puede abarcar desde el análisis de una situación particular de vía libre hasta el de una estrategia completa de mantenimiento desde el punto de vista de la seguridad del personal mantenedor.

Palabras Claves: Vía libre, configuración de aislamiento, árbol de fallos, errores humanos, estrategias de mantenimiento.

1. Introducción.

Los accidentes durante intervenciones de mantenimiento son un importante factor a tener en cuenta en el análisis de la accidentalidad en la industria moderna [1]. Ello está relacionado precisamente con el hecho de que, durante estas labores, el hombre se encuentra en contacto más directo con los peligros intrínsecos de cada proceso o equipo. Sin embargo, los métodos fundamentales de análisis de accidentes tienen, en general, un enfoque postmortem y se dirigen a la implementación de medidas y/o recomendaciones para que los mismos no se repitan.

El análisis detallado de las condiciones y características que rodean a estos eventos permite identificar un grupo de factores comunes relacionados con los fallos de las vías libres para mantenimiento. Entre estos factores está la presencia de determinadas configuraciones de aislamiento de los equipos y de errores humanos asociados a la violación de las mismas [2]. Estas características comunes unidas a la potencialidad de la metodología de árboles de fallos para combinar fallos de equipos y errores humanos [3], permitió desarrollar la metodología de análisis cuantitativo de las vías libres [2], que da un enfoque preventivo al estudio de accidentes durante

mantenimientos. La misma ha sido automatizada para análisis puntuales y sistemáticos en el código MOSEG Ver Win 1.0 [4].

2. Estado actual del análisis de los accidentes de trabajo.

El desarrollo de los métodos de medición del riesgo laboral [5] ha ido progresando desde los enfoques simplistas, en los que el trabajador era el principal responsable por su seguridad (Modelo de Henry, 1930) hacia modelos más complejos como el de Frank Bird o Samuel Chávez Donoso (Modelo de Bird y Modelo de Causalidad Actualizado, respectivamente) en los que la organización pasa a ser la principal responsable por la seguridad del personal. Así mismo, la evolución ha mostrado un cambio de enfoque metodológico de los análisis de accidente, el cual va desde los estudios deterministas hacia los análisis probabilistas [5, 6].

La medición del riesgo de las diferentes actividades productivas ha sido realizada fundamentalmente con enfoque postmortem. Es decir, las estadísticas de accidentes alimentan las experiencias que se vuelcan en la capacitación, así como en la preparación de procedimientos y normas de seguridad para evitar que tales situaciones se repitan [7].

De manera general se ha desarrollado un enfoque preventivo para la protección del trabajo, que va desde el descubrimiento de aquellas actividades más peligrosas y los diferentes peligros relacionados con ellas, hasta la implementación de medidas para compensarlos. Por ejemplo, el personal de mantenimiento de líneas de transporte de energía eléctrica está involucrado con actividades peligrosas, las cuales generan caídas, electrocución, etc. Por ello está normado el uso de cinturones de seguridad, cadenas de puesta a tierra previas al mantenimiento, etc. Otros ejemplos son los listados de requerimientos para vías libres [8] los que se adicionan a las órdenes de trabajo.

Adicionalmente los requerimientos productivos exigen cambios que se incorporan a los escenarios de accidente como eventos disparadores o facilitadores de los mismos, lo cual genera situaciones multifactoriales diversas y muy difíciles de estudiar. Por ejemplo, los tiempos disponibles para la ejecución de las tareas pueden generar stress que afectan el desempeño de los operarios [9]. Sin embargo, es necesario estimular el pronto despacho de las vías libres, para aumentar la disponibilidad de los sistemas. De esta forma, los mecanismos de estimulación económica al obrero mantenedor pueden conspirar contra la seguridad.

3. Desarrollo de la metodología para el cálculo de probabilidad de accidente durante vía libre.

Tratándose de situaciones diversas y multifactoriales muy cambiantes, con importantes diferencias entre sectores industriales distintos, sería necesario identificar factores comunes que ayudasen a estudiar de manera genérica los múltiples escenarios que se presentan, como parte de una metodología de carácter más universal para el análisis previo de la vía libre.

El examen detallado de múltiples casos muestra que resultan comunes a los mismos los fallos de equipos y/o errores humanos, siendo estos últimos, en muchos casos, las causas fundamentales de la ocurrencia de accidentes. También resulta un factor común que dichos accidentes han ocurrido como resultado de la pérdida de determinadas configuraciones de aislamiento [2].

Los árboles de fallos (AF) [3] han demostrado ser métodos muy poderosos para el análisis de sistemas y sus resultados permiten descubrir, mediante múltiples aplicaciones (estudios de importancia, priorización, etc.) los principales contribuyentes a la ocurrencia de los sucesos no deseados. Así mismo, los AF han demostrado su capacidad de combinar causas de fallo de variados orígenes (humano, tecnológico, modo común, etc.). Estas características convierten a esta metodología en una alternativa viable para el análisis de las configuraciones de aislamiento relacionadas con las vías libres (VL).

Por otra parte, los análisis de fiabilidad humana [9], cuya aplicación fundamental se ha centrado en los estudios de confiabilidad y riesgo, muestran un grupo de factores como el carácter genérico de su metodología y el estudio de múltiples tipos de comportamiento humano, que los hacen un candidato muy recomendable para el estudio de las probabilidades de error humano involucradas en la ocurrencia de accidentes.

3.1. Implementación de la Metodología de Cálculo Probabilista de la Vía Libre

En principio, cualquier configuración de aislamiento de equipos a mantener, puede ser analizada por el método de árboles de fallos. Para ello será necesario considerar los siguientes componentes modos de fallo participantes en el análisis:

- Los fallos de los equipos de aislamiento durante la implementación y conservación de la VL. Estos fallos serán, por lo general, fallos al cambio de la posición durante la implementación de la VL y al mantenimiento de la posición durante la conservación de la VL.
- Los errores humanos contribuyentes al fallo de la VL por manipulación errónea de equipos de aislamiento que conduzca a situaciones accidentales.
- Los errores humanos al utilizar los medios de protección individual.

Un estudio detallado de la metodología THERP [9] condujo a deducir que este tipo de análisis debe contener dos tipos de errores humanos fundamentales: los errores de omisión y los de comisión.

Los errores de omisión serán válidos en la etapa de implementación y en la de conservación de la VL. En la etapa de implementación podrán ocurrir errores humanos de omisión en algún procedimiento, que conduzcan al fallo de la configuración de aislamiento, mientras que en la de conservación éstos estarán asociados a errores en el uso de los medios de protección individual. En la naturaleza de los dos tipos de errores humanos de omisión antes mencionados hay una diferencia que resulta importante destacar. Los primeros tienen que ver con el accionamiento de un dispositivo de aislamiento para lograr la VL, mientras los segundos no están asociados a ningún dispositivo específico.

Por otra parte, los errores de comisión podrán ocurrir, tanto en la etapa de implementación de la VL, como en la etapa de conservación. En la etapa de implementación, los errores estarán asociados a fallos de identificación, manipulación y chequeo de los dispositivos accionados para el alineamiento de la VL. En la etapa de conservación los errores humanos estarán asociados a fallos de naturaleza semejante, aunque su ocurrencia conducirá directamente a situaciones accidentales.

En consecuencia, una modelación adecuada de la configuración de aislamiento mediante árboles de fallos, que comprenda la participación de los eventos previamente descritos, conjuntamente con el diseño de su base de datos (partiendo de valores genéricos como los recomendados en las Bases de Datos Internacionales para fallos de equipos [10, 11] y los valores de fiabilidad humana contenidos en [9] para cuantificar las etapas de barrido) permitirán cuantificar las probabilidades de accidente ante determinados escenarios de mantenimiento. Resulta evidente que partiendo de valores genéricos, la importancia de este resultado será principalmente su valor relativo respecto a otras probabilidades de accidente, lo que permitirá estudiar las configuraciones de aislamiento más adecuadas, sin una dependencia absoluta de la disponibilidad de datos en la industria específica.

La preparación de la VL se realiza siguiendo un procedimiento de trabajo similar al desarrollado por los autores en [12] para la generación automática de AF. La realidad demuestra que en ocasiones las configuraciones de aislamiento de equipos incluyen otros componentes modos de fallos no considerados hasta ahora en este análisis, por ejemplo, la ubicación de bridas ciegas previos al mantenimiento en algunos tramos del esquema. Sin embargo, partiendo de las posibilidades de modificación de AF previstas en MOSEG, dichos nuevos componentes pueden ser incorporados a las configuraciones de aislamiento.

Para introducir los datos de errores humanos al análisis de VL deberán tenerse en cuenta los siguientes tipos de errores.

3.1.1. Errores humanos de omisión durante la implementación y conservación de la VL

Los errores humanos de omisión {EHO} durante la implementación y conservación de la VL, se consideran fallos humanos en el uso de procedimientos. La tabla I [9] muestra variadas situaciones de este tipo, a las que se asocian diferentes probabilidades de error humano (Phe).

Tabla I. Errores humanos de omisión

ERRORES DE OMISION	Phe
Con chequeo (lista corta <10 pasos)	0.001
Con chequeo (lista larga >10 pasos)	0.003
Sin chequeo (lista corta <10 pasos)	0.003
Sin chequeo (lista larga >10 pasos)	0.01
Procedimientos Escritos, pero no se usan	0.05

3.1.2. Errores humanos de comisión durante la implementación de la VL

Los errores humanos durante la implementación de la vía libre pueden ser también de comisión {EHC}. Esto ocurrirá realizando acciones remotas o locales, de

acuerdo con las características de la interfaz para el comando del dispositivo. A estos errores corresponden valores de probabilidad que se muestran en las tablas II y III [9].

Obsérvese que en las tablas II y III aparecen errores de identificación, manipulación y chequeo de dispositivos de señalización. Para el análisis de cada dispositivo de aislamiento, los errores de identificación (EI) y de manipulación (EM) se suman, dado que la ocurrencia de cualquiera de ellos es causa del evento no deseado. En cambio, este resultado se multiplica por el error de chequeo (EC), si existe, considerando que este constituye una acción de recuperación, capaz de contrarrestar los errores de identificación y de manipulación de haber ocurrido.

$$P(EHC) = [P(EI) + P(EM)] \times P(EC) \quad (1)$$

Sin embargo debe aclararse que por cada dispositivo se admite sólo un tipo de error de comisión, o sea, que cada dispositivo tendrá como máximo, si se trata de mando remoto: un error de identificación, uno de manipulación y uno de chequeo, y si se trata de mando local, un error de identificación y otro de chequeo.

Los errores humanos asociados a cada dispositivo serán la suma de los errores de omisión (EHO) y los de comisión (EHC) relacionados con cada uno, dado que cualquiera de ellos es causa del evento no deseado.

$$P(EH) = P(EHO) + P(EHC) \quad (2)$$

3.1.3. Errores humanos en el uso de los medios de protección individual

A los errores en el uso de medios de protección individual les será asignado el valor de probabilidad correspondiente, entre los previstos en la tabla I, pero no aparecerán asociados a ningún dispositivo de aislamiento, tal como se explicó anteriormente.

3.1.4. Errores humanos de comisión durante la conservación de la VL

Los valores de probabilidad de los errores humanos de comisión durante la conservación de la VL estarán también asociados a dispositivos de aislamiento y crecerán en dependencia del tiempo que la misma se mantenga. Tal incremento se debe a que mientras más larga sea la VL, mayor cantidad de operaciones se realizarán en la planta o sistemas que puedan retar su conservación. Sin embargo, no existen antecedentes entre los estudios de fiabilidad humana realizados [13] que muestren una dependencia temporal para errores preaccidentales.

Tabla II. Errores humanos de comisión para mando local.

ERRORES DE COMISION PARA MANDO LOCAL	Phe
<i>ERRORES DE IDENTIFICACIÓN {EI}</i> con etiqueta de identificación local	
Identificación clara no ambigua ubicado aparte de dispos. similares	0.001
Identificación clara y forma parte de dispos. similares	0.003
Identificación no clara y ambigua ubicado aparte de dispos. similares	0.005
Identificación no clara, ambigua como parte de dispos. similares	0.008
Identificación no clara, ambigua forma parte de dispos. idénticos	0.01
<i>ERRORES DE CHEQUEO {EC}</i> de posición local	
Sólo indicador de posición	0.001
Posible uso de Indicador de posición y vástago saliente ¹	0.002
Vástago saliente sin indicador de posición	0.005
Sin vástago saliente ni indicador de posición	0.01

Tabla III. Errores humanos de comisión para mando remoto.

ERRORES DE COMISION PARA MANDO REMOTO	Phe
<i>ERRORES DE IDENTIFICACIÓN en panel con dispositivos² de apariencia similar</i>	
Mando forma parte de un mímico bien definido	0.0005
Mando bien alineado en grupos funcionales	0.001
Mando identificado sólo con etiquetas	0.003
<i>ERRORES DE MANIPULACIÓN durante rotación incorrecta de control tipo dial</i>	
Sin violación de compatibilidad cultural	0.0005
Violación de compatibilidad cultural y operación normal	0.05
Violación de compatibilidad cultural y sometido a stress	0.5
<i>ERRORES DE MANIPULACIÓN durante rotación incorrecta de switch de dos posiciones o dejarlo en posición incorrecta</i>	
Sin violación de compatibilidad cultural	0.0001
Violación de compatibilidad cultural y operación normal	0.01
Violación de compatibilidad cultural y sometido a stress	0.1
Colocar control tipo dial en posición incorrecta	0.001
Cambio de estado si control debe mantenerse sujeto	0.003
<i>ERRORES DE CHEQUEO de dispositivos de información en panel</i>	
Indicador digital	0.001
Indicador analógico con límites claros	0.001
Indicador analógico con límites no claros	0.002
Indicador analógico sin límites definidos	0.003

- 1- Está comprobado que cuando se dispone de ambas posibilidades de chequeo el operario utiliza más el vástago saliente, por lo que en ese caso es más probable el error que cuando sólo dispone del indicador de posición y se ve obligado a consultarlo.
- 2- Se incluyen dial, switch y breakers. Para el caso de los breakers no se prevé errores de manipulación, serán válidos errores de identificación y chequeo.

Un estudio detallado de los Reportes de Eventos bajo Licencia (LERs) recopilados en [14], arrojó que bajo el modo de fallo "Configuración Impropia de Válvulas", aparecen registrados errores humanos que condujeron a manipulación de válvulas erróneas. A su vez, la tabla 5 de [14] registra la cantidad de sucesos de este tipo ocurridos durante los años 1976 al 1980 para Válvulas

Operadas por Motor (MOV) con mando remoto y para Válvulas Operadas Manualmente. Los Apéndices J y M de [14] permiten obtener las poblaciones en horas de trabajo acumuladas para tales dispositivos en las plantas nucleares estudiadas. Con la información anterior se preparó la tabla IV.

Tabla IV. Estudio estadístico de los LERs para errores humanos en el alineamiento de válvulas motorizadas operadas de manera remota y válvulas manuales.

Equipo	Errores humanos de alineamiento (N)	Población [horas de operación] (T)	Tasa de errores humanos ³ (L)
Válvulas Motorizadas operadas de manera remota	64	122967794	5.2E-7 /hora
Válvulas Manuales	168	260785826	6.4E-7 /hora

Dada la similitud en la magnitud de las tasas de errores humanos obtenidas para mandos remoto y local, y tomando en cuenta la incertidumbre que caracteriza a estos datos, se ha asumido una tasa horaria única equivalente a 6E-7 /hora.

Con esta aproximación se logra un modelo con basamento estadístico que permite predecir el comportamiento temporal de tales errores humanos. Aunque esta tasa horaria se ha obtenido de estudios estadísticos en plantas nucleares, la misma puede generalizarse a otras industrias, si su valor se ajusta mediante coeficientes de corrección que tomen en cuenta la especificidad del sector industrial al cual se aplica.

En efecto, para el tratamiento de estos errores es posible aplicar un factor que tenga en cuenta las características propias de la planta o sistema objeto de estudio. En los estudios realizados por Swain [9] se obtienen valores de probabilidad de error humano adaptados a nuevas condiciones, a partir de un valor de probabilidad de error humano base y utilizando coeficientes de penalización.

Para definir los coeficientes de corrección en ese caso, se han utilizado las tablas II y III. Un análisis detallado de estas tablas permite detectar una regularidad, la que consiste en que, para definir los errores humanos de barrido asociados a cada caso, se ha utilizado un valor base de 1E-3 y el mismo se ha afectado con coeficientes según el caso. Para obtener un coeficiente que permita una adaptación a otro objeto de estudio se hará uso de la siguiente expresión.

$$K = [P(EHI) + P(EHM)] \times 10^3 \quad (3)$$

Donde:

K – es el coeficiente de corrección para tasa horaria de errores humanos

P (EHI) – es el valor de la probabilidad de error humano durante identificación en la etapa de conservación de la VL.

P (EHM) - es el valor de la probabilidad de error humano durante manipulación en la etapa de conservación de la VL.

El factor 103 sirve para transformar las probabilidades obtenidas de las Tablas II y III, en coeficientes de corrección a la tasa horaria básica de errores humanos (6E-7/h).

En la expresión no se ha tenido en cuenta la probabilidad de recuperación del error a través del chequeo, ya que de manera conservadora se parte del supuesto de que el mantenedor estará en contacto directo con los peligros durante toda la VL. Por tanto, una incorrecta selección o manipulación de un dispositivo de aislamiento, por parte del propio mantenedor o de otro personal de planta, provocará el accidente de forma directa e inmediata. Bajo tales condiciones no es posible dar crédito a ningún tipo de chequeo previo, capaz de recuperar el error antes de producir el accidente.

La expresión final para la Tasa de Errores Humanos de Comisión durante la conservación será:

$$Lh = K \times L \quad (4)$$

Donde: Lh – Tasa Horaria de Errores Humanos modificada.

K - Coeficiente de Corrección de la Tasa Horaria.

L – Tasa Horaria Básica de Errores Humanos (6 E-7/h).

Seguidamente se muestran dos casos extremos que ilustran el criterio de modificación de L a través de K. El primero corresponde a la cuantificación de Lh utilizando los datos más optimistas de errores de comisión en mando remoto (Tabla III) que corresponden a:

- Error de Identificación en panel con dispositivo que forma parte de un mímico bien definido – P(EI) = 0.0005

- Error de manipulación girando control de dial sin violación de compatibilidad cultural - $P(EM) = 0.0005$

Sustituyendo (3) en (4), y aplicando los valores específicos que corresponden a este caso extremo optimista, resulta:

$$Lh = [P(EI) + P(EM)] \times 10^3 \times L = [0.0005 + 0.0005] \times 10^3 \times 6E - 7 \frac{1}{h} = 6E - 7 \frac{1}{h}$$

Este valor de Lh coincide exactamente con la Tasa Horaria Básica de Errores Humanos.

El otro caso extremo corresponde a una de las peores situaciones posibles, que resulta de aplicar los datos más pesimistas de la Tabla III:

- Error de Identificación en panel de dispositivos señalizados sólo con etiquetas - $P(EI) = 0.003$
- Error de manipulación girando control de dial con violación de compatibilidad cultural y sometido a stress - $P(EM) = 0.5$

Sustituyendo (3) en (4), y aplicando los valores específicos que corresponden a este caso extremo pesimista, resulta:

$$Lh = [P(EI) + P(EM)] \times 10^3 \times L = [0.003 + 0.5] \times 10^3 \times 6E - 7 \frac{1}{h} = 3E - 4 \frac{1}{h}$$

Este sería el valor máximo posible de la tasa horaria de errores humanos modificada, para condiciones de identificación y manipulación de los dispositivos en extremo pesimistas.

Es importante destacar que la metodología descrita ha previsto la posibilidad de "Supervisión de trabajos" por personal independiente a los ejecutores. Cuando resulta posible dar crédito a la existencia y efectividad de dicha supervisión independiente, el error humano resultante se disminuye mediante un factor de 0.1, o sea, será un 10 % del error correspondiente al caso en que no se supervisan los trabajos.

3.2. Evaluación Puntual de Probabilidad de Accidente Durante Mantenimiento

La figura 1 muestra el esquema de aislamiento para otorgar la Vía Libre a una bomba (lado derecho del dibujo) y el árbol de fallos (AF) de la configuración de aislamiento, que de acuerdo con los criterios anteriores, ha sido generado automáticamente por el código MOSEG [4]. En este caso los dispositivos de aislamiento comprenden una parte mecánica asociada a la Válvula Manual VM1 y una eléctrica asociada al Interruptor II. Observe como la posición y similitud de los dispositivos de aislamiento (batería de válvulas y de interruptores) y el estado de su identificación hacen factible los errores humanos de identificación y manipulación.

Utilizando las potencialidades del código MOSEG Win Ver 1.0, a través de su opción Patrones de Evaluación – Esquema de Vía Libre, se realiza la introducción de datos de equipos y de errores humanos asociados a los dispositivos de aislamiento.

En la figura 1 se mostraba la ubicación de cada dispositivo de aislamiento respecto a la bomba.

Siguiendo dicho esquema, la figura 2 ilustra la posición de cada uno en un segmento diferente (S1, S2). La opción "Crear AF" genera el AF correspondiente a la VL. Esta opción también conecta los errores humanos a las compuertas del árbol donde corresponda, siguiendo reglas implícitas en el sistema.

Para la cuantificación puntual del árbol de fallos (AF) que representa la VL, deberá prepararse la base de datos de confiabilidad (BDC) siguiendo las siguientes reglas:

Los elementos de aislamiento con modo de fallo al cambio de posición (que representan el realineamiento del esquema para conseguir aislar el equipo del peligro) son elementos que tendrán su máximo valor de probabilidad de fallo en el momento del realineamiento, lo que se adapta al modelo de fallo en operación. Dado que tras el accionamiento para configurar la vía libre que se analiza podrían ser descubiertos los fallos al cambio de la posición de los dispositivos de aislamiento, se ha adoptado que sólo una fracción de estos fallos permanecerá oculta y no será detectada por el personal.

- De esta forma la indisponibilidad se determina mediante la expresión:

$$Q = Pnd \times Lc \times T_{e/mto} \quad (5)$$

Donde:

Lc – Tasa de fallos al cambio de posición

$T_{e/mto}$ – Tiempo entre mantenimientos

Pnd – Fracción de fallos que permanece oculta.

- Los elementos de aislamiento con modo de fallo al mantenimiento de la posición (que representan

el mantenimiento de la posición de los equipos de aislamiento para conservar la VL) serán componentes con una probabilidad de fallo distribuida en ese intervalo y también se modelarán de acuerdo al modelo de fallo en operación. La indisponibilidad se halla como:

$$Q = Ld \times Dur \tag{6}$$

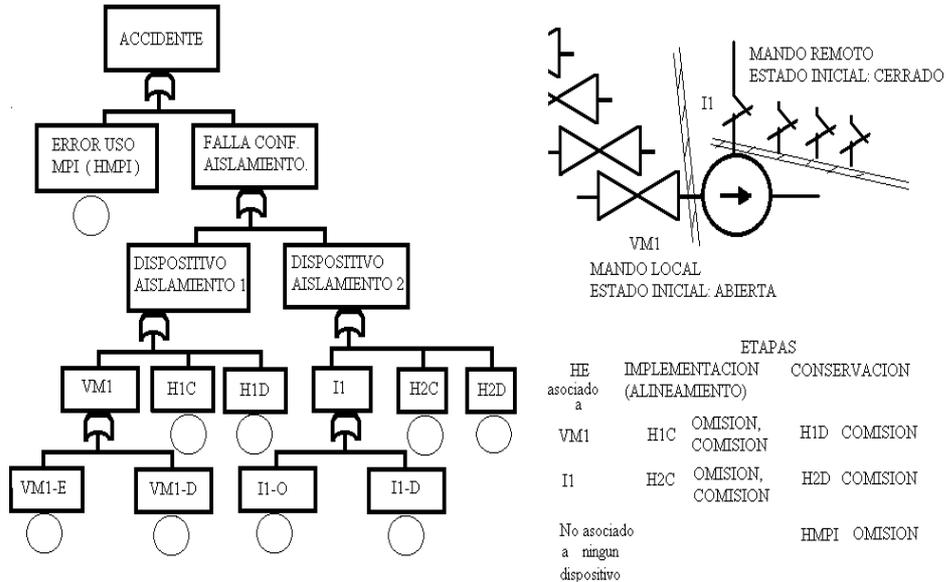


Figura 1. Ejemplo de configuración de aislamiento y árbol de fallos obtenido con MOSEG

Esquema Tecnológico - Arbol de fallos

Esquema de Via Libre
NUEVO

No.	Tipo Elemento	Identifica	Enlaces entre Elementos	Cap.MON	Cap.MOE	No.C	SLB	Lógica de fallos
1	EQUIPO	EQ1	+S1,S2	100	0	C1	0	C2 C3 7
2	SEGMENTO	S1	GF1	100	0	C2	Y	C4
3	SEGMENTO	S2	GF2	100	0	C3	Y	C5
4	GRUPOFUN	GF1	1	100	0	C4	0	1 3 5 6
5	GRUPOFUN	GF2	2	100	0	C5	0	2 4 8 9

Tiempos Te/mto. 720 h Base de datos de experto
 Dur-mto. 20 h Seleccione el dato adecuado:

Elemento No. + TE	Cód. Gen.	Descripción	MF	Fuente	LAMBDA o Prob.	Para datos es
1-VM-E	ESPEC	Dato específico				
2-KA-0	PDASJ	Bomba Diesel	S	NUREG-4550	D: 2.7E-6 /hr	
3-VM/1-D	PDARJ	Bomba Diesel	R	NUREG-4550	D: 8.0E-4 /hr	
4-KA/2-D	PMYSB	Bomba motor.	S	NUREG-2815	D: 1.0E-5 /hr	

Figura 2. Representación analítica del Esquema tecnológico de la VL y AF

Donde:

Ld – Tasa de fallos al mantenimiento de la posición

Dur – Duración del mantenimiento

- Los errores humanos de alineamiento de la VL serán de probabilidad constante, y estarán dados por los errores de omisión P(EHO) o de comisión P(EHC) considerados por el analista, según las prácticas locales en el uso de procedimientos y las características de las interfases. De esta forma la expresión utilizada será:

$$P = P(EH) \quad (7)$$

- Los errores humanos de conservación de la VL serán componentes con una probabilidad de fallo distribuida en ese intervalo y se modelarán de acuerdo al modelo de fallo en operación. El valor de indisponibilidad se halla como:

$$Q = Lh \times Dur \quad (8)$$

Donde:

Lh – Tasa de Errores Humanos modificada

Dur – Duración del mantenimiento

Debe aclararse que como parte de las potencialidades para la Generación de Patrones establecidas en MOSEG [4], el propio sistema asignará de manera automática los valores de las tasas de fallos recomendadas por las bases de datos contenidas en el software.

Una vez determinadas todas las probabilidades de fallo de los dispositivos y errores humanos asociados a la VL, MOSEG evalúa los conjuntos mínimos de corte (CMC) resultantes del árbol de fallos de la VL y de esta forma queda cuantificada la probabilidad de accidente asociada a esta configuración de aislamiento puntual. La expresión booleana compuesta por la unión de los CMC, permanece como un resultado intermedio, necesario para los análisis posteriores de la probabilidad de accidentes en las estrategias de mantenimiento.

3.3. Evaluación de la Probabilidad de Accidente Durante la Aplicación de la Estrategia

La cuantificación de la probabilidad de accidente durante el mantenimiento, parte de la selección del fichero de CMC que caracteriza la configuración de aislamiento asignada a determinado equipo durante su mantenimiento.

La cuantificación del riesgo base (Rbase) se realiza, prácticamente, bajo las mismas premisas definidas anteriormente para el análisis puntual de VL, pero en este caso los valores de tiempo entre mantenimiento y de tiempo de duración del mantenimiento se tomarán de los datos temporales básicos de mantenimiento (Periodicidad y Duración) que caracterizan al equipo al que se está asignando la configuración de VL. A partir

de la periodicidad se recalcula la indisponibilidad de aquellos componentes que fallan al alineamiento de la VL, aplicando (5). Si se trata de un mantenimiento correctivo el período entre mantenimientos se calcula a partir del último mantenimiento del dispositivo objeto del aislamiento.

Como parte de los datos anteriores podrían asignarse a un mismo equipo varios mantenimientos típicos, que se diferencien entre sí por la periodicidad y profundidad de los trabajos que en ellos se acometen. Bajo estas condiciones, el cálculo de la probabilidad de fallo del dispositivo de aislamiento se ajusta a la menor periodicidad de todos los mantenimientos previstos, lo que representa el ciclo típico en que se interrumpen los mecanismos de fallos ocultos de dicho dispositivo. La determinación de los Rbase a los que se aplica este ajuste se basa en la detección de los equipos para mantenimiento con códigos idénticos y a los que corresponde además una configuración de aislamiento idéntica (igual fichero de CMC).

A los componentes que fallan al mantenimiento de la posición o durante la conservación de la VL (fallos de equipos de aislamiento mediante (6) y errores humanos de comisión asociados a la manipulación de éstos mediante (8)) se les recalcula también su indisponibilidad de acuerdo a la duración definida en los datos básicos de mantenimiento. Los componentes que responden al comportamiento dado por (7) mantendrán su probabilidad de error humano.

De esta forma la expresión booleana, representada por el fichero de CMC, se recuantifica para cada una de las VL típicas, con periodicidad y duración dadas, obteniéndose los valores de Rbase asociado a ellas. En cada caso se determinan la Probabilidad de ocurrencia de accidente en dicha VL (P) y la fracción que corresponde a los fallos durante la conservación de la misma (F). Esta fracción de fallos se obtiene de la contribución de los CMC integrados por al menos un componente que participa en la etapa de conservación, ya sea de naturaleza humana o de fallo de equipamiento.

Para el análisis global de una estrategia de mantenimiento, deberán primero modelarse (obtenerse el esquema de vía libre – AF – BDC) y evaluarse (obtener los CMC) todas las configuraciones de aislamiento que caracterizan a los equipos que participan en la futura estrategia de mantenimiento. Para ello deberán repetirse en cada equipo, los pasos descritos anteriormente para la determinación de los Rbase.

La probabilidad de accidente (Pacc) en un equipo o combinación de equipos, durante el intervalo de mantenimiento estará dada por dos expresiones:

- Para intervalos donde sólo transcurren los tiempos de la VL que corresponden a conservación:

$$FRP_x = \sum_{i=1}^N \frac{P_i F_i}{D_i} \times D_x \quad (9)$$

- Para intervalos donde coinciden los tiempos de la VL que corresponden a alineamiento y conservación

$$FRP_x = \sum_{i=1}^N P_i \times (1 - F_i) + \sum_{i=1}^N \frac{P_i F_i}{D_i} \times D_x \quad (10)$$

Donde

FRP_x – Factor de Riesgo de Personal en el intervalo x .

P_i – Riesgo base para las VL del equipo i en el intervalo x .

F_i – Fracción del Rbase del equipo i que corresponde a fallos de conservación de la VL

D_x – Duración del intervalo x de la estrategia.

D_i – Duración total de la VL a que pertenece el intervalo x

N – Número de equipos en el intervalo x , que requieren VL para mantenimiento.

La figura 3 muestra el desarrollo de una estrategia de mantenimiento en la que se producen tres intervalos.



Figura 3. Intervalos de estrategia de mantenimiento para los equipos A y B

Como se observa, en el intervalo 1 corresponde aplicar (10), ya que en el mismo se alinea la VL de A y se mantiene durante un período D_1 .

$$FRP_1 = P_A \times (1 - F_A) + \frac{P_A \times F_A}{D_A} \times D_1$$

En el intervalo 2 se simultanean dos VL, pero sólo la del equipo B comienza, manteniéndose durante la duración del intervalo 2 (D_2), las VL de B y de A (que fue alineada en 1). Por ello aplicando (10) tendremos que:

$$FRP_2 = P_B \times (1 - F_B) + \left(\frac{P_B \times F_B}{D_B} + \frac{P_A \times F_A}{D_A} \right) \times D_2$$

Finalmente en el intervalo 3 deberá aplicarse (9), pues se trata de un tramo en que sólo se conserva la VL de B y no se produce ningún alineamiento.

$$FRP_3 = \frac{P_B \times F_B}{D_B} \times D_3$$

La obtención de este indicador permite la realización de estudios de contribución al FRP total, por intervalo, por equipo y por VL de equipo. Ello posibilita la conjunción de varios criterios para una toma de decisión más eficaz en el control de la seguridad durante los mantenimientos.

Es necesario destacar que el desarrollo expuesto no toma en cuenta las posibles dependencias por elementos de aislamiento compartidos entre las diferentes configuraciones de aislamiento, por lo que el FRP puede estar algo sobrestimado por esta causa. Ello puede corregirse si se organizan los mantenimientos por grupo de equipos a los que correspondan configuraciones de Vía Libre más abarcadoras, o sea que engloben a otras VL de menor alcance. Este criterio técnico tiene la ventaja adicional de reducir las indisponibilidades que representa el mantenimiento para el proceso tecnológico.

Finalmente, para caracterizar a toda la estrategia de mantenimiento se ha definido el Factor de Riesgo del Personal Medio, que representa la probabilidad de que se produzca un accidente en al menos uno de los intervalos de mantenimiento que componen la estrategia.

Este indicador se calcula según la expresión:

$$FRP_{med} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - FRP_i) \quad (11)$$

Donde: FRP_i – Factor de Riesgo del Personal para cada intervalo de mantenimiento i .

FRP_{med} – Factor de Riesgo del Personal Medio.

N – Número total de intervalos de mantenimiento de la estrategia

El uso de este indicador permite comparar estrategias de mantenimiento sobre la base de la seguridad que cada una representa para el personal mantenedor.

La evaluación de la probabilidad de accidente partiendo de configuraciones de aislamiento ha sido aplicada con éxito a los análisis de VL durante el mantenimiento de líneas de transmisión eléctrica. Así mismo, se ha usado para estudiar la seguridad del personal mantenedor durante las VL asignadas para mantenimiento de equipos en la Central Termoeléctrica del Mariel, la Planta de Gas de Boca de Jaruco y en líneas eléctricas de transmisión y distribución [4].

4. Conclusiones.

El método expuesto, para la evaluación de la probabilidad de accidente durante intervenciones de mantenimiento, representa una importante contribución a la solución de un problema multifactorial en la industria.

La utilización de las configuraciones de aislamiento como base de evaluación de la probabilidad de accidente durante la Vía Libre, permite la generalización del método para cualquier industria. El método de cálculo propuesto considera todas las contribuciones por fallos de equipos y/o errores humanos que pueden comprometer la configuración de aislamiento del equipo mantenido, a la vez que establece los modelos de confiabilidad adecuados para cada tipo de contribución.

La división de la probabilidad de accidente, resultante del análisis en fracciones de alineamiento y conservación posibilita un estudio consistente y detallado de situaciones de VL simultáneas que se pueden producir durante cualquier estrategia de mantenimiento. De esta forma el método establece las pautas del estudio de riesgo del personal mantenedor, considerando situaciones de análisis puntual, de análisis por intervalos y para toda una estrategia de mantenimiento.

Con la utilización de estudios de contribución, el sistema prevé el análisis de importancia por intervalos de mantenimiento, por equipos independientes y por VL de equipos. De esta forma, la metodología refuerza el carácter preventivo del problema desde un punto de vista científico, permitiendo descubrir los aspectos que más inciden en la ocurrencia de accidentes.

5. Referencias.

1. Trevor Kletz, *What Went Wrong? Case Histories of Process Plant Disasters*, p. 1-47, p.392, ISBN 0-88425-920-5, Gulf Publishing, Houston, TX, U.S.A (1999).
2. Torres A., "Mantenimiento Orientado a la Seguridad", p. 265-271, ISBN 959-7136-10-4, Cuba Energía, Ciudad Habana, Cuba (2000).
3. G. Mosquera, J. Rivero, J. Salomón, C. Valhuerdi, A. Torres, M. Perdomo, R. Ferro., *Disponibilidad y Confiabilidad de sistemas industriales*, p. 52-86, ISBN 980-00-0889-6, Universidad "Gran Mariscal de Ayacucho", Barcelona, Venezuela, (1995).
4. Torres V. A., "Metodología de la Gestión de Mantenimiento Orientado a la Seguridad y la Confiabilidad", ISBN 959-7136-16-3, V Taller Internacional de la Cátedra de Seguridad de la Industria, Centro de Prensa Internacional, C. Habana, Cuba, Safind03_28 (2003).
5. Samuel Chávez Donoso, "Modelo de Causalidad de Pérdidas por Derroche, Defectos y Daños", p. 1-9, <http://www.auspa.org.uy> (2001).
6. G. Sam Samdani., *Safety & Risk Management Tools & Techniques in the Chemical Processes Industry*, p. 57-66, McGraw Hill, New York, USA (1996).
7. Occupational Safety & Health Administration, U.S. Department of Labor, *OSHA Regulations- Standard 29 CFR* (2000).
8. Lourival Tavares, *Excelencia na Manutencao*, p. 60-62, ISBN 85-85651-03-02, Casa de Qualidade, Salvador BA, Brasil (1996).
9. A.D. Swain, H. E. Guttmann, *Handbook of human reliability analysis with emphasis on Nuclear Power Plant Application*, p. 3-36, 20-23, 20-28 to 20-30, NUREG-1278, US-NRC, Agosto 1983 (1983).
10. Probabilistic Risk Analysis Procedures Guide, NUREG/CR-2300, US-NRC (1983).
11. Probabilistic Safety Analysis Procedures Guide, NUREG/CR-2815, US-NRC (1985).
12. Torres, A., Rivero, J., "Patrones de Evaluación Probabilista del Mantenimiento", *Memorias Congreso Internacional Conjunto Cancún 2004 LAS/ANS-SNM-SMSR*, Cancún, Q.R., México, 11-14 de Julio 2004 (2004).
13. IAEA-TECDOC-499, "Models and Data Requirements for Human Reliability Analysis", *Consultants Meeting*, Laxenburg, 7-11 December 1987, p. 104-110 (1987).
14. Division of Risk Analysis, NRC, *Data Summaries of Licensee Events Reports of Valves at U.S. Commercial NPP*, p. 8, 21, NUREG-CR-1363, (1980).

Analysis of free access for maintenance starting from isolation configurations.

Abstract.

Safety during maintenance operations have been studied in a limited way and generally isolated from the maintenance management system. Safety is affected by multiple both technical and human factors, of a subjective nature and difficult to quantify, this limits its value for designing preventive plans. However, some factors constitute common points namely: isolating configurations during the work protection code and human errors associated with its violation. Such situations were able to be analyzed by following this feature through the fault tree methodology that matches equipment failures and human errors coherently. The methodology is automated as part of MOSEG Win Ver 1.0 code. It ranges from the analysis of particular situations up to complete maintenance strategy from the point of view of maintenance personnel safety.

Keywords: Work Protection Code, Isolation Configuration, Fault Tree, Human Errors, Maintenance Strategies.