

Metodología para el cálculo del nivel integrado de seguridad (SIL), aplicada al caso: estudio de un sistema instrumentado de seguridad (SIS) de nivel en calderas industriales de alta presión

W. Gastelbondo¹ | R. Tarantino¹ | S. Aranguren¹

Resumen

Recibido:
7 de noviembre de 2007

Aceptado:
12 de junio de 2008

En el presente trabajo se desarrolla la metodología para el cálculo del nivel integrado de seguridad en el lazo de nivel en una caldera industrial de alta presión. El Nivel Integrado de Seguridad (SIL), se obtiene a partir de la representación dinámica de la confiabilidad de cada uno de los elementos que hacen parte de la función instrumentada de seguridad, a través de la cual se obtiene la Probabilidad de Falla en Demanda, el cual es el parámetro fundamental para la determinación del Nivel Integrado de Seguridad de un Sistema Instrumentado de Seguridad.

Palabras Claves: Confiabilidad, Nivel Integrado de Seguridad, Cadenas de Markov, Fallas, Sistema Instrumentado de Seguridad, Calderas Industriales.

Abstract

In this paper develops the methodology for calculating the Safety Integrity Level of level at a boiler of industrial high pressure. The Safety Integrity Level (SIL), is derived from reliability dynamics representation of each of the elements that are part of safety instrumented function, through which is obtained the Probability of Failure on Demand, being this the basic parameter for determining Safety Integrity Level of a Safety Instrumented System.

Keywords: Reliability, Safety Integrity Level, Chains of Markov, Failure, Safety Instrumented System, Industrial Boilers.

¹Facultad de Ingenierías y Arquitectura. Instituto de Investigación y Desarrollo de Tecnologías Aplicadas, IIDTA. Universidad de Pamplona.
walter@unipamplona.edu.co,
roccot@unipamplona.edu.co,
saranguren@unipamplona.edu.co

1. Introducción

Actualmente las grandes industrias están obligadas por las normas y compañías de seguros a estar acompañados y garantizados por la aprobación de organismos internacionales que certifiquen su Nivel Integrado de Seguridad.

La cantidad mínima de riesgo que un SIS puede proporcionar esta determinado por el SIL. Este indicador ayuda a la toma de decisiones cuando se requiere diseñar sistemas de seguridad que generen un mejor costo beneficio a la Empresa.

El SIS es el encargado de la prevención de accidentes, que llevará la planta a estado seguro (parada parcial o total) ante una situación de riesgo.

En el caso de las calderas industriales de alta presión, representan uno de tantos procesos en los cuales un bajo índice del Nivel Integrado de Seguridad constituye un riesgo considerable hacia personas, equipos y ambiente, en el momento que ocurra una falla y el Sistema Instrumentado de Seguridad no pueda tomar las acciones de parada y/o de emergencia pertinentes para el caso.

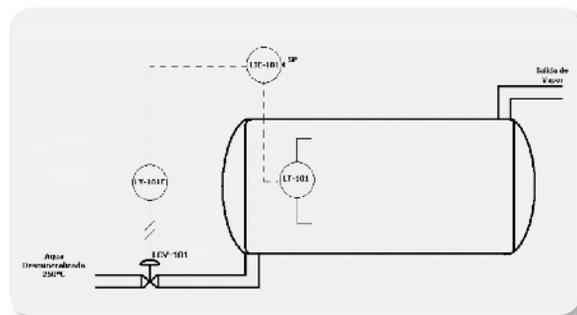
La metodología propuesta determina el SIL del lazo de seguridad de una de las variables altamente crítica del proceso, como es el nivel de agua de una caldera de alta presión. Esto implica, el cálculo del SIL de cada uno de los componentes que conforman el SIS: sensor/transmisor, controladores de seguridad (solver), convertidores, válvula y cableado. Esta metodología puede ser aplicada a diferentes sistemas, teniendo en cuenta los criterios establecidos dentro del artículo.

2. Descripción del lazo de nivel en una caldera industrial de alta presión

2.1. Narrativas de control del agua de alimentación.

La regulación del agua de alimentación se realiza a través del control de nivel, como se muestra en la Fig.1. La señal al punto de ajuste del controlador de agua de alimentación es proporcionada por el punto de operación establecido por el operador y la señal por desviación de nivel en el tambor de la caldera. El nivel de agua en el tambor de la caldera es medido por el transmisor (LT-101), como se muestra en la Fig. 1.

Figura 1. P&ID del sistema de control de nivel en la caldera.



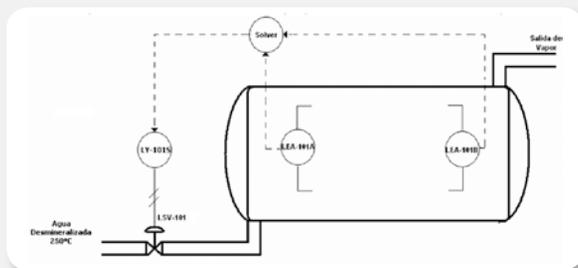
El transmisor envía una señal eléctrica de 4-20 mA a un controlador PI (LIC-101) el cual aumenta o disminuye su salida según el resultado de la comparación de este valor con la señal de Set Point. La salida del controlador (LIC-101) va a un convertidor I/P (LY-101), transformando la señal eléctrica enviada por el controlador en señal neumática hacia la válvula, que va a manipular el actuador de la válvula de control (LCV-101), produciéndose así la regulación deseada.

2.2. Narrativas de seguridad del agua de alimentación.

Los transmisores (LEA-101A y LEA-101B) envían señales al solver, el cual está configurado para actuar en el momento en que el nivel sobrepase el 70% o disminuya por debajo del 20%. El sistema de seguridad activa el disparo maestro cuando la señal emitida por los transmisores es menor o mayor a su punto de ajuste.

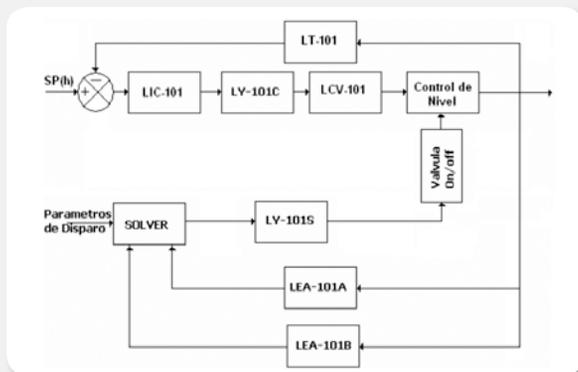
La señal de disparo maestro es enviada a un instrumento convertidor de señal eléctrica a neumática. Al recibir el status de disparo maestro, ordena a la válvula de seguridad cerrar el paso de agua hacia el drum de la caldera. El Diagrama de Tubería e Instrumento (P&ID) del sistema de seguridad se puede observar en la Fig. 2.

Figura 2. P&ID del sistema de seguridad de nivel en la caldera



El diagrama en bloques del sistema de seguridad integrado al proceso, se muestra en la Fig. 3.

Figura 3. Diagrama en bloques del sistema de control integrado al sistema de seguridad.



3. Determinación del SIL del lazo de nivel de una caldera

3.1. Cálculo del nivel integrado de seguridad de los componentes del SIS de nivel.

La normativa IEC 61508 y el estándar ANSI/ISA S.84.01, establece 4 niveles discretos de SIL para los sistemas instrumentados de seguridad, estos niveles están asociados a la frecuencia de fallas y al nivel de impacto o consecuencias a las que puede conllevar la falla, cada uno de los cuales representa, en relación con el riesgo específico del proceso a ser protegido y la probabilidad de falla en demanda del Sistema SIS encargado de protegerlo, [1-4].

El SIL se relaciona con la probabilidad de que alguno de los componentes del sistema de seguridad falle cuando tiene que llevar el proceso a estado seguro (bajo petición de demanda). Evidentemente el dato es crítico, ya que supone el nivel que aceptamos para que el sistema integrado de seguridad no acierte ante un fallo del equipo de control básico y todas las demás salvaguardas físicas.

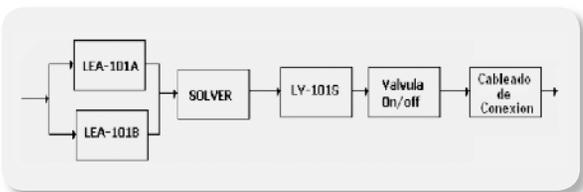
Por medio de la Tabla I. se lleva a cabo la tarea de asignación del SIL, el cual se encuentra en función de la Probabilidad de Falla en Demanda (PFD), el Factor de Reducción del Riesgo (FRR) y la Disponibilidad requerida, [5-11].

El lazo de seguridad se encuentra conformado por: 2 transmisores, 1 solver, 1 convertidor I/P, 1 válvula On/Off y el cableado de conexión. En la Fig. 4, se puede observar el diagrama en bloques, del sistema de seguridad de nivel en la caldera.

Tabla I. Equivalencias del nivel de SIL según IEC 61508 y ANSI/ISA 84.01.

SIL	PFD	FRR	Disponib.
1	$10^{-2} \leq PFD < 10^{-1}$	10 - 100	90 - 99%
2	$10^{-3} \leq PFD < 10^{-2}$	100 - 1000	99-99,9%
3	$10^{-4} \leq PFD < 10^{-3}$	1000 - 10000	99,9-99,99%
4	$10^{-5} \leq PFD < 10^{-4}$	10000 - 100000	> 99,99%

Figura 4. Diagrama en bloques del sistema de seguridad.



En el cálculo de la Probabilidad de Falla en Demanda (PFD) del sistema de seguridad es necesario determinar la PFD de cada uno de los elementos que hacen parte del sistema de seguridad de nivel (ver Fig. 4), para luego obtener la PFD total y de esta manera determinar el SIL del Sistema Instrumentado de Seguridad de nivel en la caldera. Para ello hay que tener en cuenta dos premisas que son, [3]:

1. La Capacidad de reparación (U) debe ser al menos el doble de la frecuencia de fallas o accidentes (λ).
2. Se supone un sistema con una alta frecuencia de demanda o de operación continua.

En donde, la Probabilidad de Falla en Demanda, se encuentra en función de la frecuencia de falla (λ), la frecuencia de inspección (f_i) y la frecuencia del sistema en demanda (f_d), como se muestra en (1),

$$PFD = \frac{\lambda}{f_i + f_d} \tag{1}$$

donde, según, [3], [12],

$$\lambda = \frac{-\ln(1-Q)}{t} \tag{2}$$

donde Q , es la no confiabilidad y t es el tiempo para el cual se desea determinar. Ahora, si la frecuencia de inspección (f_i) es igual a la frecuencia en demanda (f_d), entonces la ecuación (1), se convierte en (3),

$$PFD = \frac{\lambda}{f_i + f_i} = \frac{\lambda}{2f_i} \tag{3}$$

donde,

$$f_i = \frac{1}{t_i} \tag{4}$$

siendo t_i el tiempo de inspección, y teniendo en cuenta que,

$$\lambda = \frac{1}{TPPF} \tag{5}$$

donde TPPF, es el Tiempo Promedio Para Fallar; reemplazando (4) y (5), en (3), se obtiene que,

$$PFD = \frac{t_i}{2TPPF} \tag{6}$$

por lo tanto, si $t_i = 2$, entonces,

$$PFD = \frac{1}{TPPF} \tag{7}$$

Ahora, si el análisis se aplica teniendo en cuenta la no confiabilidad dinámica de Markov, entonces se debe tener en cuenta que $f_i \gg f_d$, o sea,

$$f_i = n * f_d \tag{8}$$

donde n , es el número de inspecciones o pruebas que se realizó al sistema de seguridad.

reemplazando (8), en (1),

$$PFD = \frac{\lambda}{f_d + n * f_d} = \frac{\lambda}{(1+n)f_d} \quad (9)$$

por lo tanto,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} PFD \approx 0 \quad (10)$$

o sea que para el caso en mención,

$$PFD = \dot{Q} \approx 0 \quad (11)$$

Como se puede apreciar, la probabilidad de falla en demanda (PFD), se encuentra asociada a la no confiabilidad dinámica, la cual se obtiene mediante el modelado Markoviano de la confiabilidad de cada uno de los bloques del sistema, para ello es necesarios contar con dos parámetros, que son, la frecuencia de falla (λ) y la capacidad de reparación (U); el primer parámetro se obtiene a partir de los datos consignados en las Tablas Internacionales de Frecuencia de Fallas de Faradip, mientras que la capacidad de reparación se encuentra asociada a la cantidad de personal y la experticia del mismo y fue obtenida de la realidad industrial. A continuación se hace uso de cadenas de markov para obtener la PFD.

3.2. Modelado de Markov del transmisor de nivel de seguridad.

Debido a que el transmisor de seguridad cuenta con redundancia (1oo2), se van obtener tres estados, los cuales son, [4],

- ✓ *Estado Funcional*: Los dos transmisores funcionan.
- ✓ *Estado Degradado*: Uno de los dos transmisores funciona.
- ✓ *Estado No Funcional*: Ninguno de los transmisores funciona.

La representación mediante cadenas de Markov, se puede apreciar en la Fig. 5.

donde,

$\lambda_t * \Delta t$: Falla en Modo Común.

$\lambda_{fd} * \Delta t$: Falla simple tipo 1.

$\lambda_{dnf} * \Delta t$: Falla simple tipo 2.

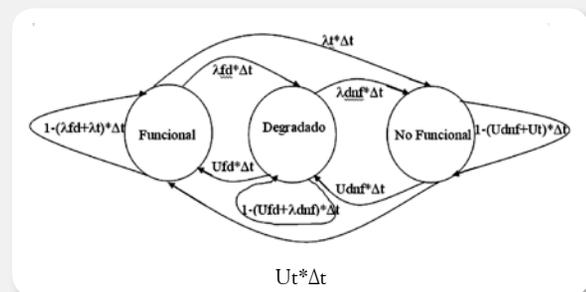
$U_t * \Delta t$: Capacidad de Reparación en Modo Común.

$U_{fd} * \Delta t$: Capacidad de Reparación simple tipo 1.

$U_{dnf} * \Delta t$: Capacidad de Reparación simple tipo 2.

de la Fig. 5, se obtiene,

Figura 5. Modelado Markoviano del sistema de transmisores.



$$P_F(t+\Delta t) = [1 - (\lambda_{fd} + \lambda_t) * \Delta t] * P_F(t) + U_{fd} * \Delta t * P_D(t) + U_t * \Delta t * P_{NF}(t) \quad (12)$$

$$P_D(t+\Delta t) = [1 - (\lambda_{dnf} + U_{fd}) * \Delta t] * P_D(t) + \lambda_{fd} * \Delta t * P_F(t) + U_{dnf} * \Delta t * P_{NF}(t) \quad (13)$$

$$P_{NF}(t+\Delta t) = [1 - (U_{dnf} + U_t) * \Delta t] * P_{NF}(t) + \lambda_{dnf} * \Delta t * P_D(t) + \lambda_t * \Delta t * P_F(t) \quad (14)$$

Endonde P_F, P_D, P_{NF} representan la probabilidad funcional, la probabilidad degradada y la probabilidad no funcional, respectivamente; despejando de (12), (13) y (14)

$$P_F(t+\Delta t) - P_F(t) = -(\lambda_{fd} + \lambda_t) * \Delta t * P_F(t) + U_{fd} * \Delta t * P_D(t) + U_t * \Delta t * P_{NF}(t) \quad (15)$$

$$P_D(t+\Delta t) - P_D(t) = -(\lambda_{dnf} + U_{fd}) * \Delta t * P_D(t) + \lambda_{fd} * \Delta t * P_F(t) + U_{dnf} * \Delta t * P_{NF}(t) \quad (16)$$

$$P_{NF}(t+\Delta t)-P_{NF}(t) = -(U_{dnf}+U_i)*\Delta t*P_{NF}(t) + \lambda_{dnf}*\Delta t*P_D(t) + \lambda_i*\Delta t*P_F(t) \quad (17)$$

dividiendo ambos miembros de (15), (16) y (17) por Δt y aplicando límite, se obtiene,

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_F(t+\Delta t)-P_F(t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{-(\lambda_{fd}+\lambda_i)*\Delta t*P_F(t) + U_{fd}*\Delta t*P_D(t) + U_i*\Delta t*P_{NF}(t)}{\Delta t} \quad (18)$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_D(t+\Delta t)-P_D(t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{-(\lambda_{dnf}+U_{fd})*\Delta t*P_D(t) + \lambda_{fd}*\Delta t*P_F(t) + U_{dnf}*\Delta t*P_{NF}(t)}{\Delta t} \quad (19)$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_{NF}(t+\Delta t)-P_{NF}(t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{-(U_{dnf}+U_i)*\Delta t*P_{NF}(t) + \lambda_{dnf}*\Delta t*P_D(t) + \lambda_i*\Delta t*P_F(t)}{\Delta t} \quad (20)$$

(18), (19) y (20), se puede expresar como,

$$\dot{P}_F(t) = -(\lambda_{fd}+\lambda_i)*P_F(t) + U_{fd}*P_D(t) + U_i*P_{NF}(t) \quad (21)$$

$$\dot{P}_D(t) = -(\lambda_{dnf}+U_{fd})*P_D(t) + \lambda_{fd}*P_F(t) + U_{dnf}*P_{NF}(t) \quad (22)$$

$$\dot{P}_{NF}(t) = -(U_{dnf}+U_i)*P_{NF}(t) + \lambda_{dnf}*P_D(t) + \lambda_i*P_F(t) \quad (23)$$

expresando (21), (22) y (23) en forma matricial,

$$\begin{bmatrix} \dot{P}_F(t) \\ \dot{P}_D(t) \\ \dot{P}_{NF}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(\lambda_{fd}+\lambda_i) & U_{fd} & U_i \\ \lambda_{fd} & -(\lambda_{dnf}+U_{fd}) & U_{dnf} \\ \lambda_i & \lambda_{dnf} & -(U_{dnf}+U_i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_F(t) \\ P_D(t) \\ P_{NF}(t) \end{bmatrix} \quad (24)$$

haciendo uso de tablas internacionales de fallas (Faradip) e información facilitada por algunas empresas, se obtuvo que,

$$\lambda_i = 0,00000876 \text{ Fallas/año} \quad (25)$$

$$\lambda_{fd} = 0,0438 \text{ Fallas/año} \quad (26)$$

$$\lambda_{dnf} = 0,00876 \text{ Fallas/año} \quad (27)$$

$$U_i = 0,00876 \text{ reparaciones/año} \quad (28)$$

$$U_{fd} = 0,438 \text{ reparaciones/año} \quad (29)$$

$$U_{dnf} = 0,0876 \text{ reparaciones/año} \quad (30)$$

reemplazando las ecuaciones (25), (26), (27), (28), (29) y (30) en (24), se obtiene,

$$\begin{bmatrix} \dot{P}_F(t) \\ \dot{P}_D(t) \\ \dot{P}_{NF}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,04380876 & 0,438 & 0,00876 \\ 0,0438 & -0,44676 & 0,0876 \\ 0,00000876 & 0,00876 & -0,09636 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_F(t) \\ P_D(t) \\ P_{NF}(t) \end{bmatrix} \quad (31)$$

En la Fig. 6, se muestra la respuesta obtenida al simular la matriz de confiabilidad dinámica, en ella se puede observar el comportamiento que presenta la probabilidad funcional (P_F), probabilidad degradada (P_D) y probabilidad no funcional (P_{NF}), siendo de mayor valor la probabilidad en funcionamiento.

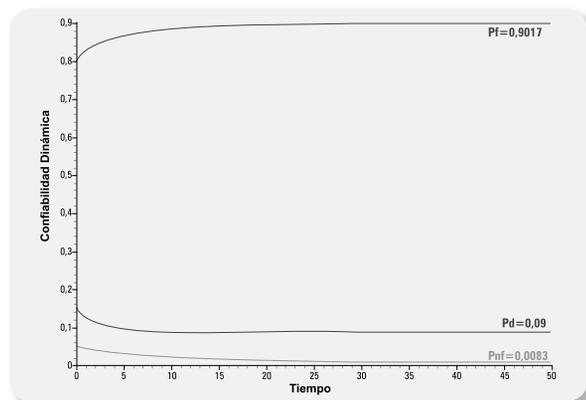
De la Figura 6 se obtiene que,

$$\dot{P}_F(t) = 0,9017 \quad (32)$$

$$\dot{P}_D(t) = 0,09 \quad (33)$$

$$\dot{P}_{NF}(t) = PFD = 0,0083 \quad (34)$$

Figura 6. Simulación de la confiabilidad dinámica en transmisores.



comparando el valor obtenido en (34), con el consignado en la tabla I, se puede concluir que el Nivel Integrado de Seguridad del Sistema de Transmisores de Seguridad es SIL 2.

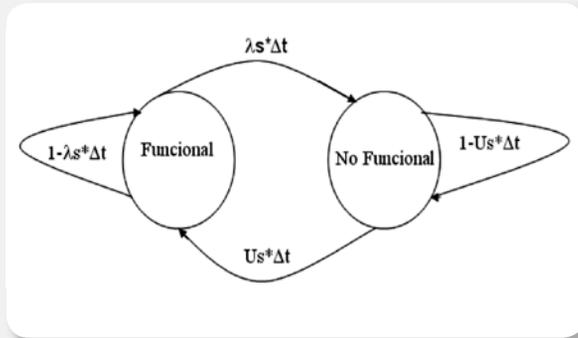
3.3. Modelado de Markov del solver

El solver, solo cuenta con dos estados:

- ✓ Estado Funcional.
- ✓ Estado No Funcional.

La representación mediante cadenas de Markov, se puede apreciar en la Fig. 7.

Figura 7. Modelado Markoviano del solver.



donde,

$\lambda_s * \Delta t$: Falla

$U_s * \Delta t$: Reparación

de la figura 7, se obtiene,

$$P_F(t + \Delta t) = [1 - \lambda_s * \Delta t] * P_F(t) + U_s * \Delta t * P_{NF}(t) \quad (35)$$

$$P_{NF}(t + \Delta t) = [1 - U_s * \Delta t] * P_{NF}(t) + \lambda_s * \Delta t * P_F(t) \quad (36)$$

despejando de (35) y (36)

$$P_F(t + \Delta t) - P_F(t) = -\lambda_s * \Delta t * P_F(t) + U_s * \Delta t * P_{NF}(t) \quad (37)$$

$$P_{NF}(t + \Delta t) - P_{NF}(t) = -U_s * \Delta t * P_{NF}(t) + \lambda_s * \Delta t * P_F(t) \quad (38)$$

dividiendo ambos miembros de (37) y (38) por Δt y aplicando límite, se obtiene,

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_F(t + \Delta t) - P_F(t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{-\lambda_s * \Delta t * P_F(t) + U_s * \Delta t * P_{NF}(t)}{\Delta t} \quad (39)$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_{NF}(t + \Delta t) - P_{NF}(t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{-U_s * \Delta t * P_{NF}(t) + \lambda_s * \Delta t * P_F(t)}{\Delta t} \quad (40)$$

de (39) y (40), se obtiene,

$$\dot{P}_F(t) = -\lambda_s * P_F(t) + U_s * P_{NF}(t) \quad (41)$$

$$\dot{P}_{NF}(t) = -U_s * P_{NF}(t) + \lambda_s * P_F(t) \quad (42)$$

expresando (41) y (42) en forma matricial,

$$\begin{bmatrix} \dot{P}_F(t) \\ \dot{P}_{NF}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda_s & U_s \\ \lambda_s & -U_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_F(t) \\ P_{NF}(t) \end{bmatrix} \quad (43)$$

haciendo uso de tablas internacionales de fallas (Faradip) e información facilitada por algunas empresas, se obtuvo que,

$$\lambda_s = 0,01752 \text{ Fallas/año} \quad (44)$$

$$U_s = 0,66576 \text{ reparaciones/año} \quad (45)$$

reemplazando las ecuaciones (44) y (45) en (43), se obtiene,

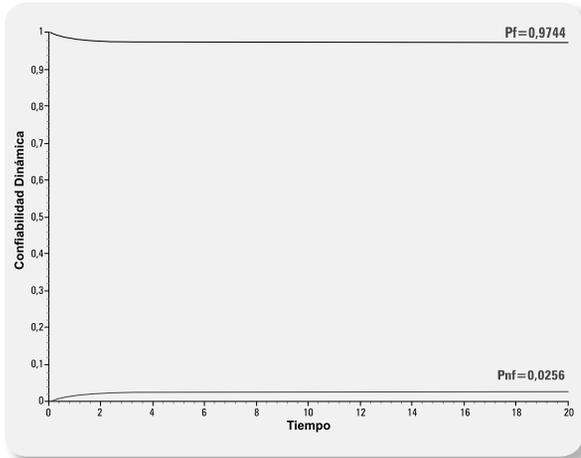
$$\begin{bmatrix} \dot{P}_F(t) \\ \dot{P}_{NF}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,01752 & 0,665762 \\ 0,01752 & -0,66576 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_F(t) \\ P_{NF}(t) \end{bmatrix} \quad (46)$$

en la Fig. 8, se puede observar la respuesta obtenida al simular la matriz de confiabilidad dinámica.

$$\dot{P}_F(t) = 0,9744 \quad (47)$$

$$\dot{P}_{NF}(t) = PFD = 0,0256 \quad (48)$$

Figura 8. Simulación de la confiabilidad dinámica del solver.



Comparando el valor obtenido en (48), con el consignado en la Tabla I, se puede concluir que el Nivel Integrado de Seguridad del Solver es SIL 1.

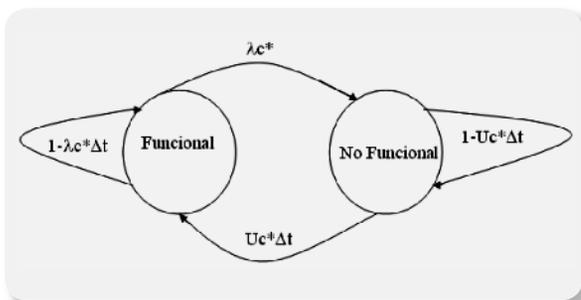
3.4. Modelado de Markov del convertidor I/P.

El convertidor I/P, solo cuenta con dos estados, los cuales son:

- ✓ Estado Funcional.
- ✓ Estado No Funcional

La representación mediante cadenas de Markov, se puede apreciar en la Fig. 9.

Figura 9. Modelado Markoviano del convertidor I/P.



en donde,
 $\lambda_c * \Delta t$: Falla
 $U_c * \Delta t$: Reparación.

de la Fig. 9, se obtiene,

$$P_F(t + \Delta t) = [1 - \lambda_c * \Delta t] * P_F(t) + U_c * \Delta t * P_{NF}(t) \quad (49)$$

$$P_{NF}(t + \Delta t) = [1 - U_c * \Delta t] * P_{NF}(t) + \lambda_c * \Delta t * P_F(t) \quad (50)$$

despejando de (49) y (50)

$$P_F(t + \Delta t) - P_F(t) = -\lambda_c * \Delta t * P_F(t) + U_c * \Delta t * P_{NF}(t) \quad (51)$$

$$P_{NF}(t + \Delta t) - P_{NF}(t) = -U_c * \Delta t * P_{NF}(t) + \lambda_c * \Delta t * P_F(t) \quad (52)$$

dividiendo ambos miembros de (51) y (52) por Δt y aplicando limite, se obtiene,

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_F(t + \Delta t) - P_F(t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{-\lambda_c * \Delta t * P_F(t) + U_c * \Delta t * P_{NF}(t)}{\Delta t} \quad (53)$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_{NF}(t + \Delta t) - P_{NF}(t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{-U_c * \Delta t * P_{NF}(t) + \lambda_c * \Delta t * P_F(t)}{\Delta t} \quad (54)$$

de (53) y (54), se obtiene,

$$\dot{P}_F(t) = -\lambda_c * P_F(t) + U_c * P_{NF}(t) \quad (55)$$

$$\dot{P}_{NF}(t) = -U_c * P_{NF}(t) + \lambda_c * P_F(t) \quad (56)$$

expresando (55) y (56) en forma matricial,

$$\begin{bmatrix} \dot{P}_F(t) \\ \dot{P}_{NF}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda_c & U_c \\ \lambda_c & -U_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_F(t) \\ P_{NF}(t) \end{bmatrix} \quad (57)$$

Haciendo uso de tablas internacionales de fallas (Faradip) y de la información facilitada por algunas empresas, se obtuvo que,

Metodología para el cálculo del nivel integrado de seguridad (SIL), aplicada al caso: estudio de un sistema instrumentado de seguridad (SIS) de nivel en calderas industriales de alta presión.

$$\lambda_c = 0,02628 \text{ Fallas/año} \quad (58)$$

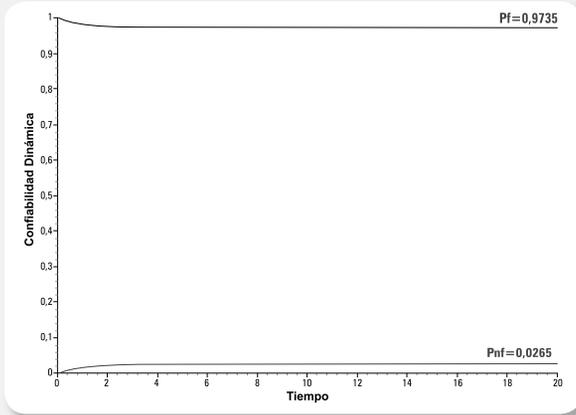
$$U_s = 0,9636 \text{ reparaciones/año} \quad (59)$$

reemplazando (58) y (59) en (36), se obtiene,

$$\begin{bmatrix} \dot{P}_F(t) \\ \dot{P}_{NF}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,02628 & 0,9636 \\ 0,02628 & -0,9636 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_F(t) \\ P_{NF}(t) \end{bmatrix} \quad (60)$$

en la Fig. 10, se puede observar la respuesta obtenida al simular la matriz de confiabilidad dinámica.

Figura 10. Simulación de la confiabilidad dinámica del convertidor I/P.



De la Fig. 10 se determina que,

$$\dot{P}_F(t) = 0,9735 \quad (61)$$

$$\dot{P}_{NF}(t) = PFD = 0,0265 \quad (62)$$

comparando el valor obtenido en (62), con el consignado en la Tabla I, se puede concluir que el Nivel Integrado de Seguridad del Convertidor es SIL 1.

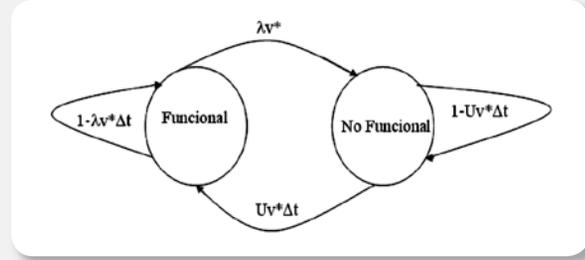
3.5. Modelado de Markov de la válvula

La válvula solo cuenta con dos estados:

- ✓ Estado Funcional.
- ✓ Estado No Funcional.

La representación mediante cadenas de Markov, se puede apreciar en la Fig. 11.

Figura 11. Modelado Markoviano de la válvula.



en donde,

$\lambda_v * \Delta t$: Falla

$U_v * \Delta t$: Reparación.

de la Fig. 11, se obtiene,

$$P_F(t + \Delta t) = [1 - \lambda_v * \Delta t] * P_F(t) + U_v * \Delta t * P_{NF}(t) \quad (63)$$

$$P_{NF}(t + \Delta t) = [1 - U_v * \Delta t] * P_{NF}(t) + \lambda_v * \Delta t * P_F(t) \quad (64)$$

despejando de (63) y (64)

$$P_F(t + \Delta t) - P_F(t) = -\lambda_v * \Delta t * P_F(t) + U_v * \Delta t * P_{NF}(t) \quad (65)$$

$$P_{NF}(t + \Delta t) - P_{NF}(t) = -U_v * \Delta t * P_{NF}(t) + \lambda_v * \Delta t * P_F(t) \quad (66)$$

dividiendo ambos miembros de (65) y (66) por Δt y aplicando limite, se obtiene,

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_F(t + \Delta t) - P_F(t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{-\lambda_v * \Delta t * P_F(t) + U_v * \Delta t * P_{NF}(t)}{\Delta t} \quad (67)$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_{NF}(t + \Delta t) - P_{NF}(t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{-U_v * \Delta t * P_{NF}(t) + \lambda_v * \Delta t * P_F(t)}{\Delta t} \quad (68)$$

de (67) y (68), se obtiene,

$$\dot{P}_F(t) = -\lambda_v * P_F(t) + U_v * P_{NF}(t) \quad (69)$$

$$\dot{P}_{NF}(t) = -U_v * P_{NF}(t) + \lambda_v * P_F(t) \quad (70)$$

expresando (69) y (70) en forma matricial,

$$\begin{bmatrix} \dot{P}_F(t) \\ \dot{P}_{NF}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda_v & U_v \\ \lambda_v & -U_v \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_F(t) \\ P_{NF}(t) \end{bmatrix} \quad (71)$$

haciendo uso de tablas internacionales de fallas (Faradip) e información facilitada por algunas empresas, se obtuvo que,

$$\lambda_c = 0,01314 \text{ Fallas/año} \quad (72)$$

$$U_c = 0,5256 \text{ reparaciones/año} \quad (73)$$

reemplazando (72) y (73) en (71), se obtiene,

$$\begin{bmatrix} \dot{P}_F(t) \\ \dot{P}_{NF}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,01314 & 0,5256 \\ 0,01314 & -0,5256 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_F(t) \\ P_{NF}(t) \end{bmatrix} \quad (74)$$

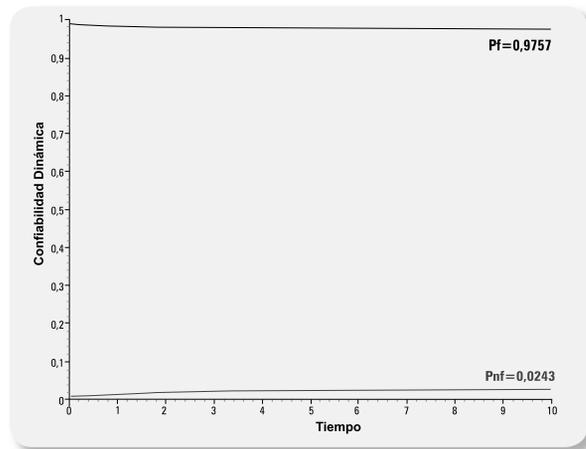
en la Fig. 12, se muestra la respuesta obtenida al simular la matriz de confiabilidad dinámica, de la cual se obtiene,

$$\dot{P}_F(t) = 0,9757 \quad (75)$$

$$P_{NF}(t) = PFD = 0,0243 \quad (76)$$

Comparando el valor obtenido en (76), con el consignado en la Tabla I, se puede concluir que el Nivel Integrado de Seguridad de la Válvula es SIL 1.

Figura 12. Simulación de la confiabilidad dinámica de la válvula.



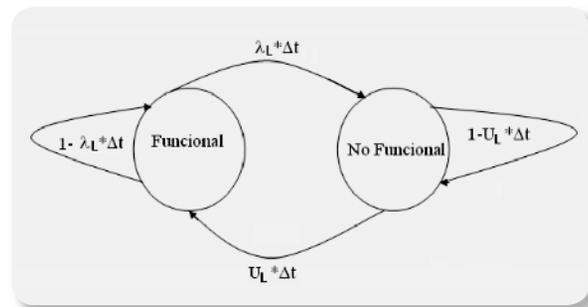
3.6. Modelado de Markov del cableado de conexión.

El cableado de conexión tiene dos estados:

- ✓ Estado Funcional.
- ✓ Estado No Funcional.

La representación mediante cadenas de Markov, se puede apreciar en la Fig. 13.

Figura 13. Modelado Markoviano del Cableado de Conexión.



donde,

$\lambda_L * \Delta t$: Falla

$U_L * \Delta t$: Reparación.

de la Fig. 13, se obtiene,

$$P_F(t + \Delta t) = [1 - \lambda_L * \Delta t] * P_F(t) + U_L * \Delta t * P_{NF}(t) \quad (77)$$

$$P_{NF}(t + \Delta t) = [1 - U_L * \Delta t] * P_{NF}(t) + \lambda_L * \Delta t * P_F(t) \quad (78)$$

despejando de (77) y (78)

$$P_F(t + \Delta t) - P_F(t) = -\lambda_L * \Delta t * P_F(t) + U_L * \Delta t * P_{NF}(t) \quad (79)$$

$$P_{NF}(t + \Delta t) - P_{NF}(t) = -U_L * \Delta t * P_{NF}(t) + \lambda_L * \Delta t * P_F(t) \quad (80)$$

dividiendo ambos miembros de (79) y (80) por Δt y aplicando limite, se obtiene,

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_F(t + \Delta t) - P_F(t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{-\lambda_L * \Delta t * P_F(t) + U_L * \Delta t * P_{NF}(t)}{\Delta t} \quad (81)$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_{NF}(t + \Delta t) - P_{NF}(t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{-U_L * \Delta t * P_{NF}(t) + \lambda_L * \Delta t * P_F(t)}{\Delta t} \quad (82)$$

de (81) y (82), se obtiene,

$$\dot{P}_F(t) = -\lambda_L * P_F(t) + U_L * P_{NF}(t) \quad (83)$$

$$\dot{P}_{NF}(t) = -U_L * P_{NF}(t) + \lambda_L * P_F(t) \quad (84)$$

expresando (83) y (84) en forma matricial,

$$\begin{bmatrix} \dot{P}_F(t) \\ \dot{P}_{NF}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda_L & U_L \\ \lambda_L & -U_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_F(t) \\ P_{NF}(t) \end{bmatrix} \quad (85)$$

Utilizando las Tablas Internacionales de Fallas (Faradip) y la información facilitada por algunas empresas, se obtuvo que,

$$\lambda_L = 0,000876 \text{ Fallas/año} \quad (86)$$

$$U_L = 0,075336 \text{ reparaciones/año} \quad (87)$$

reemplazando (86) y (87) en (85), se obtiene,

$$\begin{bmatrix} \dot{P}_F(t) \\ \dot{P}_{NF}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,000876 & 0,075336 \\ 0,000876 & -0,075336 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_F(t) \\ P_{NF}(t) \end{bmatrix} \quad (88)$$

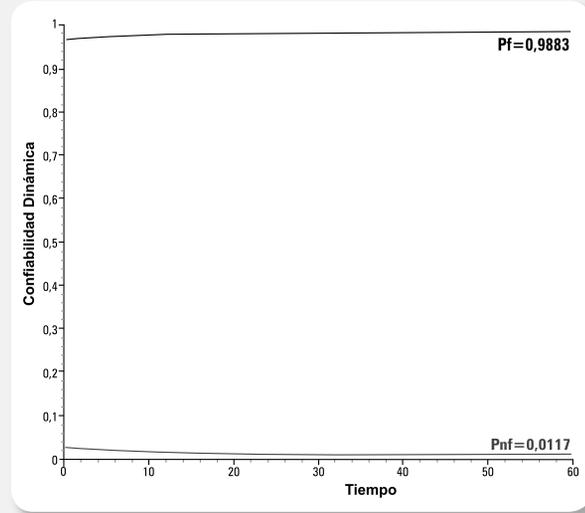
en la Fig. 14, se puede observar la respuesta obtenida al simular la matriz de confiabilidad dinámica. En donde se observa que durante el estado estacionario,

$$\dot{P}_F(t) = 0,9883 \quad (89)$$

$$\dot{P}_{NF}(t) = PFD = 0,0117 \quad (90)$$

comparando el valor obtenido en (90), con el consignado en la tabla No. I, se puede concluir que el Nivel Integrado de Seguridad de la línea de conexión es SIL 1.

Figura 14. Simulación de la confiabilidad dinámica del cableado de conexión.



3.7. Cálculo del nivel integrado de seguridad de la FIS de nivel.

Como los elementos del sistema de seguridad, se encuentran en serie, se obtiene que la Probabilidad de Falla en Demanda de la Función Instrumentada de Seguridad de Nivel en la caldera, se encuentra dada por, [1], [2], [5], [11],

$$\dot{P}_{NF(Total)}(t) = 1 - \dot{P}_{F(Total)}(t) \quad (91)$$

Donde

$$\dot{P}_{F(Total)}(t) = \dot{P}_{F(Tx)}(t) * \dot{P}_{F(Solv)}(t) * \dot{P}_{F(I/P)}(t) * \dot{P}_{F(Val)}(t) * \dot{P}_{F(L)}(t) \quad (92)$$

reemplazando (32), (33), (47), (61), (75) y (89) en (92)

$$\begin{aligned} \dot{P}_{NF(Total)} &= PFD = 1 - 0,907116561 \\ &= 0,092883439 \end{aligned} \quad (93)$$

Con el resultado obtenido en (93), se puede concluir que el Nivel Integrado de Seguridad de la Función Instrumentada de Seguridad de Nivel es "1" y el valor de SIL es pequeño, considerándose el sistema de alto riesgo, disminuyendo la confiabilidad del mismo.

4. Conclusiones

En este trabajo se determinó el SIL de los elementos que conforman la función instrumentada de seguridad de un lazo de nivel en una caldera industrial de alta presión. El valor obtenido de SIL igual a 1 indica que la confiabilidad de la función instrumentada de nivel se encuentra entre 90 y 99%, dicha confiabilidad es muy baja si se tiene en cuenta que el proceso a la hora de fallar puede conllevar a pérdidas humanas, ambientales o de producción. Es importante resaltar que aun teniendo sistemas donde el cálculo del SIL es mayor que 1, como ocurrió en los transmisores, se obtiene que el cálculo del SIL de la Función Instrumentada de Seguridad solo alcanza el SIL 1, esto se debe a que el SIL va a estar asociado al sistema con la mínima confiabilidad, por lo tanto se requiere planes de mantenimiento o la aplicación de ingeniería de confiabilidad.

A través del uso de la propuesta metodológica planteada se puede determinar el SIL, para Sistemas Instrumentado de Seguridad (SIS), siempre y cuando se tengan en cuenta las dos premisas formuladas dentro del presente trabajo.

Si se desea incrementar el SIL del SIS de nivel en la caldera, es necesario plantear soluciones basadas en la aplicación de esquemas redundantes, utilización de sistemas de detección y diagnóstico de fallas, sistemas tolerantes a fallas o la hibridación de cualquiera de estas técnicas.

En trabajos futuros se podrían validar los resultados obtenidos, a través del uso de otras técnicas o metodologías, en donde se tengan en cuenta algunos parámetros, como son: número de disparos falsos o paradas falsas, configuración del SIS, cobertura

del diagnóstico de falla, frecuencia de falla peligrosa, pérdida de la función de seguridad, frecuencia de fallas debido a falsos disparos, entre otros.

5. Bibliografías

- [1] Gastelbondo, W., Tarantino, R., Aranguren, S. (2007) Diseño de un Sistema de Detección y Diagnóstico de Fallas de Alto Impacto en Calderas Industriales de Alta Presión. Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada. Universidad de Pamplona. Vol. 1, No 9, 120-126.
- [2] Tarantino, R., Aranguren, S. (2004) Confiabilidad en Procesos de Automatización. Revista Colombiana De Tecnologías De Avanzada. Universidad de Pamplona. Vol. 2, No 4, 38-43.
- [3] Tarantino, R. (2007) Apuntes del Diplomado en Técnicas Modernas de Mantenimiento. Universidad de Pamplona.
- [4] Tarantino, R. (2004) Análisis y Diseño de Esquemas de Redundancia. Universidad de Pamplona.
- [5] The Internacional Electrotechnical Comisión. Funcional Safety and IEC 61508: A Basic Guide. 2002.
- [6] Aplicación de los Sistemas Instrumentados De Seguridad Para Procesos Industriales. (1997) Estándar ANSI/ISA S.84.01.
- [7] Paris. S. and Kumar, B. (2000) Performance-Based Standards: Safety Instrumented Functions and Safety Integrity Levels. Journal of Hazardous Materials. No 71, 449-465.

- [8] Estándar de Seguridad Funcional IEC 61508: Sistemas de Seguridad. Septiembre 2005.
- [9] Pacheco, M. (2003) Subcomité Técnico de Normalización de PEMEX. Determinación de Nivel Integrado de Seguridad de los Sistemas Instrumentados de Seguridad. México. No. NRF-045-PEMEX-2002.
- [10] Castellano. J. (2005) Tomarse la Seguridad en Serio. Química Universal. Invensys Systems Iberica. No. 10.
- [11] Knegtering, B., Brombacher, A. (1999) Application of micro Markov models for quantitative safety assessment to determine safety integrity levels as defined by the IEC 61508 standard for functional safety. Reliability Engineering and System Safety, Vol. 66, No. 2, pp. 171-175
- [12] Moubray, J. (1997) Reliability Centred Maintenance. Second Edition. Butterworth-Heinemann.