

**LEVEL CONTROL AND SECURITY SYSTEMS MODELING AND SIMULATION OF A
HIGH PRESSURE INDUSTRIAL BOILER****MODELADO Y SIMULACION DEL SISTEMA DE CONTROL Y SEGURIDAD DE NIVEL
EN UNA CALDERA INDUSTRIAL DE ALTA PRESION****MSc. Walter Gastelbondo B., Ph.D. Rocco Tarantino A., M.Sc. Sandra Aranguren Z.**

Universidad de Pamplona, Facultad de Ingenierías y Arquitectura
Instituto de Investigación y Desarrollo de Tecnologías Aplicadas (IIDTA)
E-mail: {walter, roccot, saranguren}@unipamplona.edu.co

Abstract: This paper by means of the modeling one and simulation can be analyze the behavior of the different systems, before different patterns or operation outlines. In this work a mathematical model of a closed loop level control is developed, integrated to the security system of a high pressure industrial boiler. The plant model is obtained by means of the application of the method of mass balance and the instrumentation model is obtained starting from the calibration straight line and the dynamic behavior of these.

Resumen: En este artículo mediante el modelado y simulación, se puede analizar el comportamiento de diferentes sistemas, ante diferentes patrones o esquemas de funcionamiento. Dentro del presente trabajo se desarrolla el modelo matemático del lazo de control de nivel, integrado al sistema de seguridad en una caldera industrial de alta presión. El modelo de la planta se obtiene mediante la aplicación del método de balance de masa y el modelo de la instrumentación se obtiene a partir de las rectas de calibración y el comportamiento dinámico de estos.

Keywords: Modeling, Simulation, Control systems, Security systems, Industrial boilers, Industrial instrumentacion.

1. INTRODUCCION

Un modelo es una invención: algo que se desarrolla para explicar una serie de datos, procesos, eventos, comportamientos que se desean interpretar.

Para que un modelo sea útil, tiene que permitir que todos los datos "encajen" de forma coherente, es decir, tiene que poder explicar lo que pasa de una manera lógica. Los modelos son muy útiles cuando queremos estudiar fenómenos o sistemas complejos. Un modelo representa lo que se quiere estudiar de modo más simple, centrándose en los

aspectos que se consideran importantes del fenómeno y dejando los "detalles" de lado, [10].

Pero hay que estar atento a la hora de elegir qué es lo importante y qué no tanto. Al simplificar el objeto de estudio, pueden quedar afuera elementos que tienen que ver con lo que se quiere estudiar. Y no alcanza sólo con elegir bien, no hay que olvidarse de que los modelos no son el fenómeno sino que son esquemas que lo explican, y que representan por lo general sólo una parte de él (la parte que elegimos estudiar).

2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE GENERACIÓN DE VAPOR

En la Fig. 1, se muestra el diagrama en bloque del proceso de generación de vapor en una caldera, en donde, el agua desmineralizada suministrada a las calderas proviene del tanque de almacenamiento. De allí a los desecadores por medio de las bombas de elevación. Siendo la función de esto últimos el precalentamiento del agua de alimentación y remover los gases no condensables disueltos en la misma, debido a que el oxígeno y el dióxido de carbono pueden causar corrosión en las partes internas de la caldera. Luego el agua precalentada es bombeada al economizador externo de la caldera a través de las bombas de alimentación, en el economizador externo el agua es calentada, para luego ser transportada hasta el cabezal inferior del economizador interno, el cual la distribuye a sus bancos de tubería en donde incrementan su temperatura con los gases de combustión provenientes de la zona de convección. Continúa su recorrido a través de los tubos colgantes hasta llegar a la sección inferior del tambor. De allí sale a formar parte de las paredes del hogar y regresa al tambor como mezcla de agua-vapor (vapor saturado), dentro del tambor se lleva a cabo la separación del vapor y agua por medio de secadores, luego el vapor sale a la sección de convección, lugar donde se encuentran los sobrecalentadores.

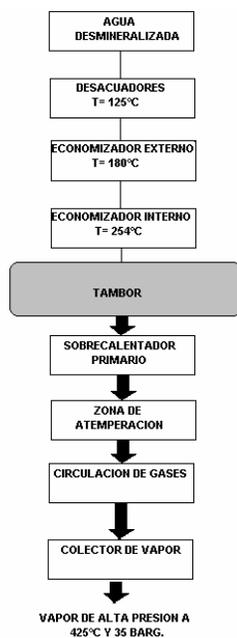


Fig. 1: Diagrama en Bloques de Sistema de Generación de Vapor.

El vapor pasa por el cabezal de entrada del sobrecalentador primario el cual lo distribuye a sus bancos de tubería en donde circulan en contra flujo de los gases de combustión y absorbe el calor necesario para adquirir la temperatura inicial de sobrecalentamiento. Este vapor sobrecalentado es recolectado por su cabezal de salida del sobrecalentador y dirigido al cabezal de atemperación, en donde recibe el agua atomizada para controlar su temperatura, luego pasa al cabezal de entrada del sobrecalentador secundario, el cual lo distribuye paralelo al de circulación de gases; allí la temperatura del vapor alcanza el valor diseñado de sobrecalentamiento.

Finalmente el vapor será recolectado por el cabezal de salida del sobre calentador secundario y entregado al colector de vapor, para ser utilizado principalmente por los turbogeneradores para producir electricidad y vapor de calentamiento en las plantas de proceso. El estudio del presente artículo se enfoca principalmente en el modelado y la simulación de uno de los subprocesos nombrados anteriormente, como lo es el lazo de nivel en el Drum, a continuación se describe el funcionamiento del sistema de control y de nivel en la caldera industrial de alta presión.

2.1. Narrativas De Control del Agua de Alimentación.

El control de agua de alimentación se realiza a través de un sistema de dos elementos (alimentación, nivel), como se muestra en la Fig. 2. 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.

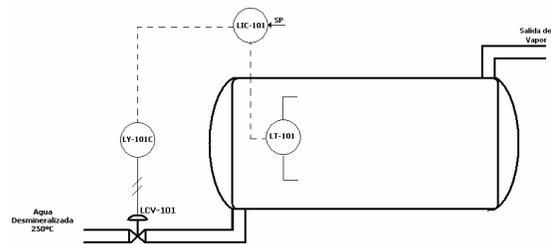


Fig. 2: P&ID del Sistema de Control de Nivel en la Caldera.

El nivel de agua en el tambor de la caldera es medido por el transmisor LT-101, como se muestra en la Fig. 2, 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 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.

El transmisor LEA-101A y LEA-101B envían señal al solver, el cual esta 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. Este al recibir status de disparo maestro, ordena a la válvula de seguridad cerrar el paso de agua hacia el drum de la caldera. El P&ID del sistema de seguridad se puede observar en la Fig. 3.

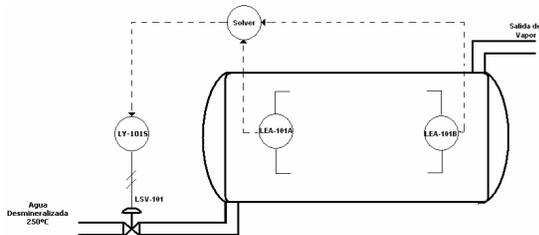


Fig. 3: P&ID del Sistema de Seguridad de Nivel en la Caldera.

El diagrama en bloques del sistema de seguridad integrado al proceso, se muestra en la Fig. 4.

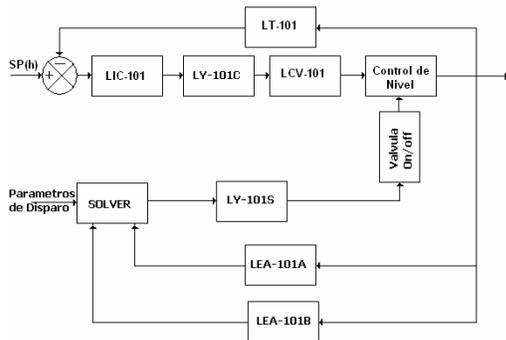


Fig. 4: Diagrama en Bloques del Sistema de Control Integrado al Sistema de Seguridad.

3. MODELADO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE SEGURIDAD INTEGRADO AL SISTEMA DE CONTROL

3.1. Modelado del Sistema de Seguridad Integrado al Sistema de Control.

A continuación se desarrolla el modelo matemático de cada uno de los elementos mostrados en el diagrama en bloques de la Fig. 4.

✓ *Modelado del Proceso de Nivel.*

Para calcular la ecuación que modela el proceso se debe recurrir al método de balance de masa; la ecuación (1), representa el comportamiento del balance de masa en el sistema de nivel en la caldera, [1], [3], [6]:

$$\frac{dV}{dt} = Q_i(t) - Q_o(t) \tag{1}$$

Teniendo en cuenta que:

$$\frac{dV}{dt} = A * \frac{dh}{dt}, \tag{2}$$

Reemplazando (2) en (1),

$$A * \frac{dh}{dt} = Q_i(t) - Q_o(t), \tag{3}$$

Despejando $\frac{dh}{dt}$ de (3), resulta:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q_i(t) - Q_o(t)}{A} \tag{4}$$

Haciendo uso de información facilitada por ingenieros de proceso de algunas empresas de Colombia y Venezuela se puede llegar a la conclusión de que la salida ($Q_o(t)$) se puede expresar de la siguiente forma,

$$Q_o(t) = \frac{K_v}{(V - A * h(t))^{1/2}} \tag{5}$$

Donde:

V ; es el volumen total del tambor y equivale a 18.08 m^3 .

A ; es el área del tambor y equivale a 11.3 m^2 .

K_v ; es la constante de la válvula.

Reemplazando (5) en (4) se obtiene:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q_i(t)}{A} - \frac{K_v}{A * (V - A * h(t))^{1/2}}, \tag{6}$$

Para calcular la constante de la válvula (K_v) se debe tener en cuenta los puntos de equilibrio del sistema los cuales se encuentran ubicados en,

$$\frac{dh(t)}{dt} = 0, \quad (7)$$

$$Q_i(t) = 6,4, \quad (8)$$

$$h(t) = 0,8, \quad (9)$$

Reemplazando (7), (8) y (9), en (6)

$$0 = 6,4 - \frac{K_V}{(18,08 - 11,3 * 0,8)^{1/2}}, \quad (10)$$

Despejando K_V de (10) se obtiene,

$$K_V = 19,2, \quad (11)$$

Reemplazando (11), el Area y el Volumen, en (6), se llega finalmente a (12), el cual representa el comportamiento dinámico del nivel en la caldera,

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q_i(t)}{11,3} - \frac{1,7}{(18,08 - 11,3 * h(t))^{1/2}}, \quad (12)$$

Modelado del Transmisor de Nivel (control).

Teniendo en cuenta la recta de calibración de la Fig. 5, se calcula (13), la cual representa el modelo matemático general del transmisor, [1], [3],

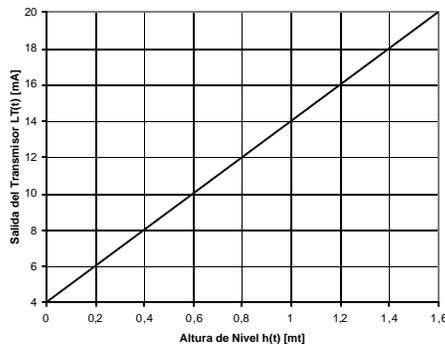


Fig. 5: Recta de Calibración Transmisor de Nivel.

$$LT(t) = \frac{LT_{Max} - LT_{Min}}{h_{Max} - h_{Min}} (h(t) - h_{Min}) + LT_{Min}, \quad (13)$$

De la Fig. 5, se obtiene,

$$LT_{Max} = 20mA \quad (14)$$

$$LT_{Min} = 4mA \quad (15)$$

$$h_{Max} = 1,6m \quad (16)$$

$$h_{Min} = 0 \text{ hmin}, \quad (17)$$

Reemplazando (14), (15), (16) y (17) en (13):

$$LT = \frac{20 - 4}{1,6 - 0} (h(t) - 0) + 4 = 10h(t) + 4, \quad (18)$$

Aplicando dinámica de primer orden a la ecuación (18), se obtiene,

$$t_c \frac{dLT}{dt} + LT = 10h(t) + 4, \quad (19)$$

Despejando de la ecuación anterior, resulta:

$$\frac{dLT}{dt} = \frac{10h(t) - LT + 4}{t_c}, \quad (20)$$

La ecuación (20), representa el comportamiento dinámico del transmisor de nivel y t_c es la constante de tiempo del transmisor, la cual según tablas de fabricantes de transmisores de nivel, se encuentra en el rango de $1 \leq t_c \leq 3$.

Controlador

El controlador del proceso es del tipo PI y su ecuación esta dada por,

$$U(t) = U_{bias} + \left[k_p e(t) + \frac{k_p}{t_i} \int e(t) dt \right], \quad (21)$$

En donde $e(t)$ es la señal de error, producido entre, $e(t) = SP - LT(t)$, (22)

Los valores de K y T_i para el controlador se calcularan mediante el entonamiento del lazo de control, el cual arrojo los siguientes resultados.

$$k_p = 1,35, \quad (23)$$

$$t_i = 13,32, \quad (24)$$

Convertidor I/P

La ecuación dinámica del convertidor I/P se obtiene a partir de la recta de calibración de esta, la cual presenta el comportamiento que se muestra en la Fig. 6.

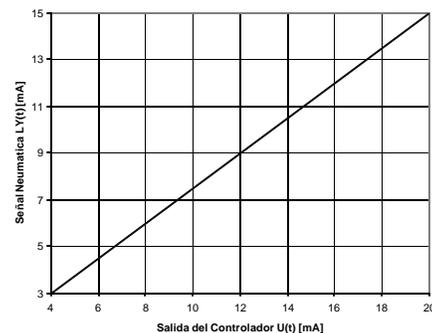


Fig. 6: Recta de Calibración del Convertidor I/P.

La ecuación estática del convertidor esta dada,

$$LY = \frac{15 - 3}{20 - 4} (U(t) - 4) + 3, \quad (25)$$

Aplicando dinámica de primer orden a la ecuación (25), se obtiene,

$$t_c \frac{dLY}{dt} + LY = \frac{15 - 3}{20 - 4} (U(t) - 4) + 3, \quad (26)$$

Despejando de la ecuación anterior resulta:

$$\frac{dLY}{dt} = \frac{0,75U(t) - LY}{t_c} \quad (27)$$

La ecuación. (27), representa el comportamiento dinámico del convertidor I/P y t_c es la constante de tiempo del convertidor, la cual según tablas de fabricantes, se encuentra en el rango de $1 \leq t_c \leq 3$.

Válvula de Control.

La ecuación dinámica de la válvula se obtiene a partir de la recta de calibración de esta, la cual se muestra en la Fig. 7.

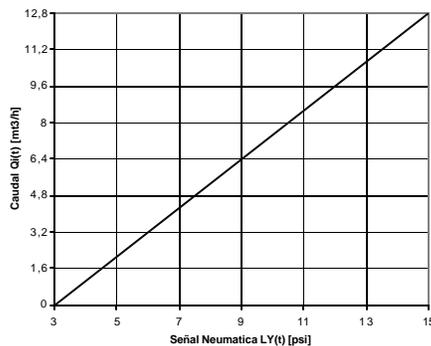


Fig. 7: Recta de Calibración Válvula de Control.

La ecuación estática de la válvula esta dada como,

$$Q_i(t) - 0 = \frac{12,8 - 0}{15 - 3} (LY(t) - 3), \quad (28)$$

Aplicando dinámica de primer orden a (29):

$$t_v \frac{dQ_i(t)}{dt} + Q_i(t) = 1,066 (LY(t) - 3), \quad (29)$$

Despejando de (29),

$$\frac{dQ_i(t)}{dt} = \frac{1,066 LY(t) - 3,2 - Q_i(t)}{t_v} \quad (30)$$

La ecuación (30), representa el comportamiento dinámico de la válvula y t_v es la constante de tiempo de la válvula, la cual según tablas de fabricantes, se encuentra en el rango de $1 \leq t_v \leq 3$.

Modelado del Transmisor de Nivel (seguridad).

El transmisor de nivel de seguridad, es muy similar al utilizado para hacer control, por lo que partiremos del modelo mostrado en la ecuación (20).

Modelado del Solver.

El solver es el instrumento encargado de procesar la información enviada por el transmisor de nivel (seguridad) y activar o no la válvula de seguridad. En la Fig. 8. se muestra el algoritmo de este.

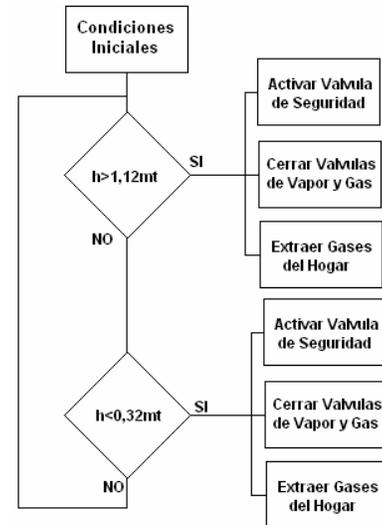


Fig. 8: Algoritmo del Solver.

Modelado de La Válvula de Seguridad.

La válvula de seguridad es un instrumento discreto, o sea, que solo permite dos niveles (abierta o cerrada). El comportamiento de esta se puede apreciar en la Fig. 9.

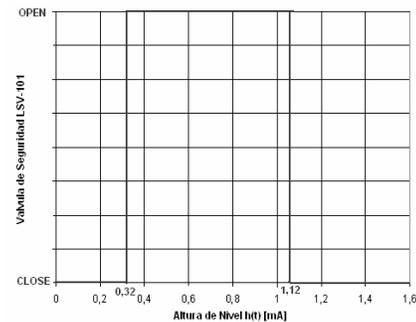


Fig. 9: Comportamiento de la Válvula de Seguridad.

3.2. Simulación del Sistema Control Integrado al Sistema de Seguridad.

Al llevar las ecuaciones obtenidas mediante el modelado, a un paquete de simulación dinámica, se obtiene el comportamiento mostrado en la Fig. 10. Como se puede apreciar cada una de las variables tanto del sistema de control como del de seguridad cumplen con las especificaciones establecidas en las narrativas.

En la Fig. 10, se observa el comportamiento tanto transitorio como estacionario del nivel (h), el caudal de entrada (Q_i), la salida de la válvula de seguridad, la señal de Set Point (SP), la señal de control (u), la salida del convertidor (LY), la salida del transmisor (LT) y el error (e).

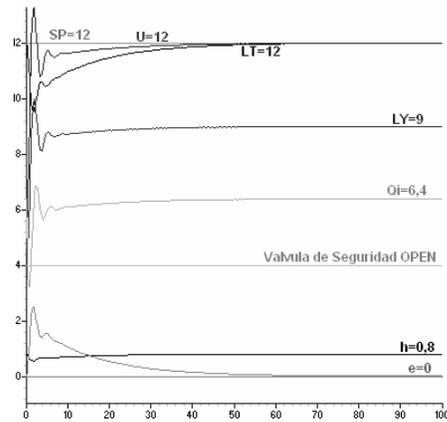


Fig. 10: Comportamiento Dinámico de las Variables de Control y Seguridad.

Ahora, se aplicara una falla de descalibracion en la válvula de control, la cual conllevara a que el nivel comience a incrementar y no pueda ser controlado por el sistema de control, por lo que debe actuar el sistema de seguridad el cual debe cerrar la válvula de seguridad y el caudal de entrada debe hacerse cero, como se muestra en la Fig. 11.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos durante la simulación, concuerdan con el comportamiento de las variables en el ámbito industrial, como se puede apreciar el proceso logra estabilizarse en los puntos operacionales establecidos durante el diseño; de igual manera el sistema de seguridad al detectar anomalías respecto al nivel, activa el elemento final de control de seguridad, logrando la meta establecida durante el diseño.

Cuando se cierra la válvula, el proceso sufre un cambio abrupto por lo que se debe tener en cuenta que el valor de la constante de la válvula K_v , debe ser recalculado a medida que cambian los puntos operacionales, debido a que si no se siguen estas especificaciones, el proceso se inestabiliza y se pierde el control sobre este.

Es importante contar con las narrativas de control y seguridad, antes de iniciar el modelado, ya que estas contienen la información detallada acerca del proceso y los puntos de operación de este.

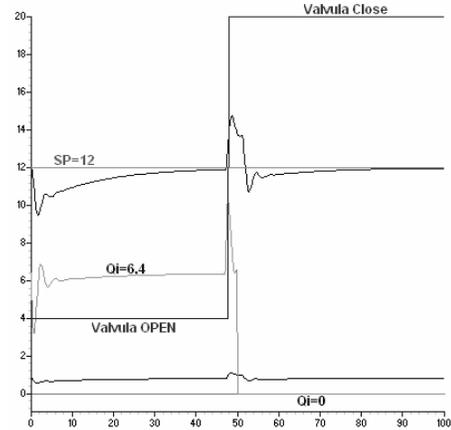


Fig. 11: Comportamiento Dinámico de las Variables de Control y Seguridad Ante una Falla.

REFERENCIAS

- [1]. Gastelbondo W., Tarantino R, Aranguren S. Diseño de un Sistema de Detección y Diagnóstico de Fallas de Alto Impacto en Calderas Industriales de Alta Presión. 2005.
- [2]. Rocco Tarantino. Apuntes del Diplomado en Técnicas Modernas de Mantenimiento. Pamplona. 2007.
- [3]. Creus, Antonio. "Instrumentación Industrial". Barcelona. Alfa y Omega. 1988.
- [4]. Castellano. J. Tomarse la Seguridad en serio. Química Universal. 2005.
- [5]. Piñon Andrés. Análisis del Estado Actual de las Técnicas en Instrumentos Inteligentes. Universidad de la Coruña. 2005.
- [6]. Rosaler, Robert C." Manual del Ingeniero de Planta". Mac-Graw-Hill/Interamericana de Editores, S.A. de C.V. 2002.
- [7]. Bateson R., Introduction to Control System Technology, Prentice-Hall, 1999.
- [8]. Ogata K. Ingeniería de Control Moderna. Prentice Hall Hisp., 1993.
- [9]. Kuo B. Sistemas de Control Automático. Prentice Hall Hisp., 1996.
- [10]. Rafael Benito González. La gerencia por competencia asociada al liderazgo docente. Universidad de Yacambu. Venezuela. 2007.
- [11]. Canales R., Barrera R., Introducción a sistemas dinámicos y control automático. Wiley.
- [12]. Franklin G., Powell J.D., Emmami-Naeini, Control de sistemas dinámicos con retroalimentación. Addison Wesley Hisp. 1991.