

**AUTOMATION ENGINEERING FOR THE PROCESS OF HUMIDIFYING OF
THE CLAY IN THE INDUSTRIES OF THE NORTH OF SANTANDER -
COLOMBIA**

**INGENIERIA DE AUTOMATIZACION PARA EL PROCESO DE
HUMECTACION DE LA ARCILLA EN LAS INDUSTRIAS DEL NORTE DE
SANTANDER - COLOMBIA**

**Ing. Luis Carlos Maldonado, PhD. Rocco Tarantino Alvarado
MSc. Sandra Aranguren, Ing. Sofía Peñaloza Solano**

Universidad de Pamplona. Facultad de Ingenierías y Arquitectura.
Instituto de Investigación y Desarrollo de Tecnologías Avanzadas, IIDTA.
E-mail: luis_carlos_maldonado@hotmail.com, rocco.tarantino@gmail.com,
saranguren@unipamplona.edu.co, sofi2581@gmail.com

Abstract: This paper raises the design of an engineering of automatization for the necessary water dosage in the process of humidifying of the clay. Proposes the replacement of the humidity sensor sets out and a strategy of regulatory control PI to reach the humidity required in this phase of production.

Resumen: Este documento plantea el diseño de una ingeniería de automatización para la dosificación de agua necesaria en el proceso de humectación de la arcilla. Propone el reemplazo del sensor de humedad y una estrategia de control regulatorio PI, para alcanzar la humedad requerida en esta fase de producción.

Keywords : Clay Humidifier Process, humidity sensor, current transmitter, PI controller.

1. INTRODUCCION

Actualmente las industrias procuran estar a la vanguardia tecnológica, con el objetivo de mejorar sus procesos de fabricación; logrando efectividad, calidad y disminución de costos en la realización de sus productos y mantenerse en el mercado.

Las Ladrilleras demandan una serie de procesos bien desarrollados, de tal forma, en cada una de sus labores puedan alcanzar los objetivos eficientemente. Justamente, el proceso de humectación constituye un papel trascendental en las características principales del producto final. Por tal razón, si este proceso es deficiente, comprometería la calidad del mismo.

La ingeniería planteada en este trabajo tiene como punto de partida, las empresas ladrilleras productoras de materiales en gres, y la necesidad de disminuir el porcentaje de humedad en la arcilla, con el fin de incrementar la calidad final lograda en esta etapa. Se plantea un sistema regulatorio de agua acertado para el proceso de humectación.

2. NARRATIVA DE PROCESO

En forma general, las empresas ladrilleras constan de líneas de producción, en los cuales se realiza distintos procesos en equipos como mezcladoras, laminadoras y extrusoras, sobre la arcilla que luego pasa posteriormente a las cortadoras donde se obtiene el producto final. (Figura 1)

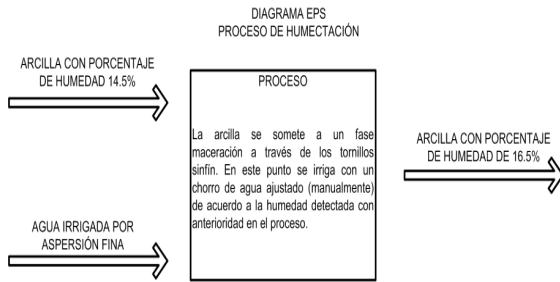


Fig. 1. Diagrama EPS

El proceso de humectación se origina con el ingreso de la arcilla en la mezcladora (también llamado mezclador continuo, ver Figura 2). Este es caracterizado esencialmente por comprender un cuerpo de caja cilíndrica metálica de eje horizontal provisto, junto a uno de sus extremos, de una embocadura de entrada y formado por un eje portador de aspas, accionado exteriormente mediante un electromotor, un dispositivo de tornillo para el transporte de arcilla hacia la parte extrema del cuerpo del aparato en la que se produce la introducción dosificada de agua y el amasado de la arcilla mediante un dispositivo que comprende un eje de paletas. Un operador se encarga de la dosificación de agua (manualmente) por medio de una manguera. El mezclador posee una embocadura para la descarga de la arcilla producida.

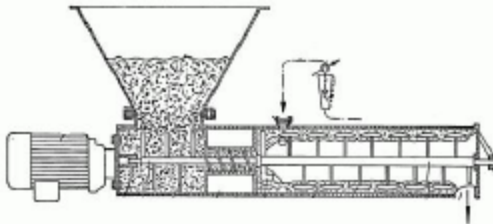


Fig. 2 Esquema general de un Mezclador Continuo. [1]

Nótese que no produce ningún desecho y que la arcilla debe salir con un humedad precisa del 16.5%.

Las condiciones actuales con que se realiza el proceso de humectación no son las adecuadas para elaborar un producto conforme en términos de calidad. Esto es debido a la falta de precisión en la dosificación de agua. El mal proceso de humectación origina diferencias entre el grado de humedad y contracción de la arcilla ocasionando tensiones y roturas en el secado. Esto se traduce en un producto no conforme y la disminución en la producción, al mismo tiempo generando pérdidas para la empresa por el bajo rendimiento.

3. NARRATIVA DE CONTROL

3.1 Filosofía de control

El controlador a utilizar para el desarrollo del sistema de control regulatorio de dosificación de agua para el proceso de humectación está planteado en modo regulador PI, con el fin de adquirir la humedad deseada, en un punto de control constante. El control de humedad se realiza a través de un sistema de dos elementos: humedad, la variable controlada, y caudal que es la variable manipulada. La señal al punto de ajuste del controlador es proporcionada por el punto de operación establecido por el operador.

3.2 Instrumentos y Equipos involucrados en el sistema de control

A continuación se describen cada uno de los elementos involucrados (Ver Figura 3):

IMIX: Mezclador.

Propósito: Utilizado para el proceso de humectación-maceración de la arcilla-agua.

ATANK. Tanque de almacenamiento de agua descubierto a la atmósfera.

Propósito: Reservar agua a temperatura ambiente.

PUMP. Electrobomba.

Propósito: Suministrar la presión necesaria para el óptimo funcionamiento de los aspersores, boquillas.

Especificaciones: 1.0hp AI-Red135, (Max: 32m 180l/S), 230V/60Hz.

MTR. Motor.

Propósito: Encargado de realizar el movimiento de los dos tornillos sin fin, para el proceso de la mezcla de la arcilla.

Especificaciones: Potencia de 30 Hp.

ZFREQ. Convertidor de frecuencia.

Propósito: Mantener los parámetros de trabajo del motor MTR.

Especificaciones: En el manual de especificaciones del convertidor de frecuencia se declara un valor de TO = 0.01 min. Con un protocolo industrial de transmisión de datos 4 -20 mA configurable.

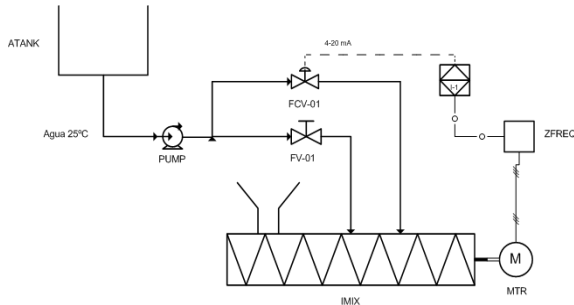


Fig. 3. P&ID Proceso de humectación controlado

FCV-01. Válvula de control.

Propósito: Suministrar la cantidad necesaria de agua para distribuir las boquillas aspersores. Especificaciones: Alcance máximo de apertura que proporcione un caudal de $1368.86 \text{ cm}^3/\text{min}$. Se detalla un $T_v = 0.79 \text{ min}$. Protocolo 4-20 mA para el mando.

FV-01. Válvula manual.

Propósito: Encargada de suministrar una suma constante de líquido para el proceso de mezcla y también actuar en caso de falla FCV-01.

I-01: Controlador.

Propósito: Ejecutar programa con la filosofía de control para el sistema. Especificaciones: Es de tipo PLC.

3.3 Modo de operación

La motobomba PUMP succiona agua a temperatura ambiente del tanque ATANK. A su vez, el agua es conducida hacia las válvulas FV-01 y FCV-01. La válvula FV-01 de caudal constante (que puede ser regulado manualmente) entrega agua al sistema para mantener parámetros de humectación normales de entrada. El controlador I-1, que envía una señal eléctrica 4-20 mA, aumenta o disminuye el caudal de la válvula FCV-01. Este caudal depende de la corriente monitorizada del motor MTR por el convertidor de frecuencia ZFREQ y la sintonización establecida (PI) en el controlador I-1. De esta forma, la válvula dejará pasar la cantidad de agua necesaria hasta alcanzar y mantener en el punto de humedad requerido (el porcentaje se encuentra entre 14.5-17.5 %). Para este caso no se ejerce control directo de la corriente, ni la velocidad del motor puesto que el convertidor realiza este trabajo.

El reflejo de la corriente de una de las fases del motor acoplado al tornillo sinfín del mezclador IMIX, es utilizado para la medición indirecta de la humedad (ver Tabla 2), y de este modo reemplazar

la implementación de un sensor de humedad. Esta lectura es generada por los sensores de corriente suministrados internamente por el variador de frecuencia ZFREQ. De la misma forma, el transmisor está integrado internamente en el variador. La humectación se realizará a través de unos aspersores alrededor de la mezcladora haciendo forma de "U" con unas boquillas de aspersión fina, puesto que entre más fina sea la partícula de agua es mayor la penetración en la arcilla. La representación del diagrama de bloques del sistema de control se ve la figura 4:

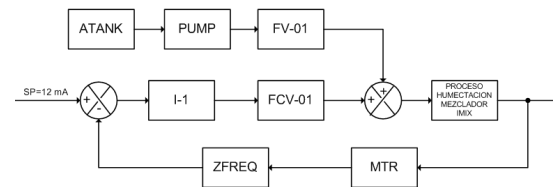


Fig. 4. Diagrama de bloques de bloques del sistema de control integrado al proceso de humectación

4. DIAGRAMA DE LAZO CERRADO

4.1 Modelado matemático del sistema Dinámico

Una descripción general de lazo cerrado proceso se tiene en cuenta en la figura 5:

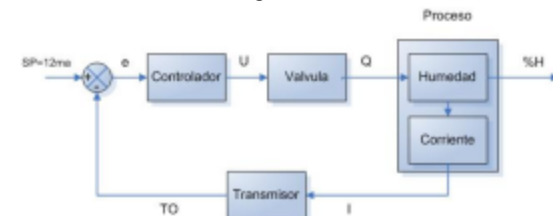


Fig. 5. Diagrama de lazo cerrado del proceso de humectación

Para la planta, la variable controlada es la humedad H y la variable manipulada es el caudal Q . Para esta aplicación se desconoce la función de transferencia del sistema, esta puede establecerse experimentalmente introduciendo entradas conocidas y estudiando la salida del sistema [2]. Para ello se estableció según la tabla 1:

Tabla 1. Datos obtenidos de la caudal y humedad

| % H | Q (cm ³ /min) |
|------|--------------------------|
| 7 | 0 |
| 16.5 | 693.43 |
| 17.5 | 766.43 |

De tal forma que la humedad en función esta descrita por:

$$H(t) = 0.0137 Q(t) + 7 \quad (1)$$

Para las pruebas de campo de corriente I y de la humedad %H en pleno proceso de humectación, se describe en la siguiente tabla (Tabla 2).

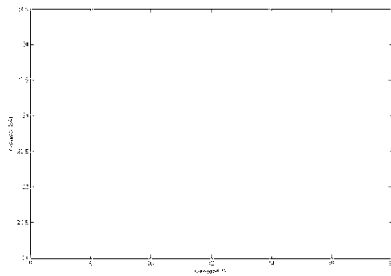
Tabla 2. Pruebas de campo de la humedad y corriente.

| I(A) | %H |
|-------|------|
| 24.2 | 7 |
| 21.48 | 16.5 |
| 21.2 | 17.5 |

A partir de este punto se establece el modelo matemático:

$$I(t) = -0.2857 H(t) + 26.2 \quad (2)$$

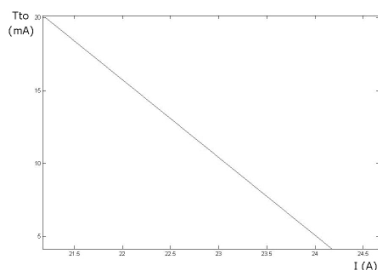
La linealizando el comportamiento de la corriente en función de la humedad tenemos en la Gráfica 1:



Gráfica 1. I vs %H

De este modo, el reflejo de humedad %H del 16.5 % en la corriente I es de 21.48 A. Se asume como premisa que $T_1 = 1$ min.

Del mismo modo para el transmisor, se toma la proyección de la corriente de fase y se tiene en la Gráfica 2:



Gráfica 2. Escalamiento señal del Transmisor (ma) Vs Corriente de Fase (I)

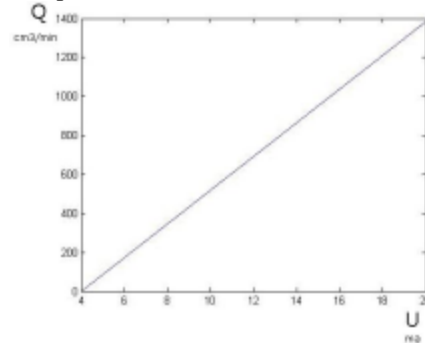
Donde la función que describe la gráfica es:

$$TO(t) = 0.37230 I(t) + 4 \quad (3)$$

A su vez se halla el caudal en función de la señal de mando, y se describe en:

$$Q(t) = -86.6788 U(t) - 346.715 \quad (4)$$

Cuyo comportamiento se describe en la Gráfica 3:



Gráfica 3. Q vs señal de mando

4.2 Obtención del controlador

Para obtener el punto de inicio de la planta obtenemos las ecuaciones diferenciales que describen el proceso:

$$\frac{dH(t)}{dt} = (-H(t) + 0.0137 Q(t) + 7) / 1 \quad (5)$$

$$\frac{dI(t)}{dt} = (-I(t) - 0.2857H(t) + 26.2) / 1 \quad (6)$$

$$\frac{dTO(t)}{dt} = (-TO(t) + 0.37230 I(t) + 4) / 0.01 \quad (7)$$

$$\frac{dQ(t)}{dt} = (-Q(t) - 86.6788 U(t) - 346.715) / 0.79 \quad (8)$$

De este modo, igualamos a cero las derivadas y llevarlas a un análisis en punto de equilibrio, esto es, llevando la tasa de derivación al estado mínimo. Obteniéndose:

$$H(t) = 21.3 \text{ m}$$

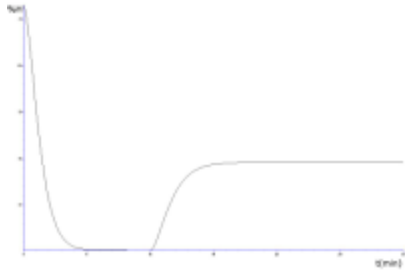
$$I(t) = 32.3 \text{ A}$$

$$Q(t) = 1041.6 \text{ cm}^3 / \text{min}$$

$$TO(t) = 16 \text{ mA}$$

Con el fin de iniciar la planta, y definirla paramétricamente, se utiliza el método de Ziegler y Nichols para determinar los parámetros de ajuste para un modelo de 1er orden y hallar el controlador PI. (Gráfica 4). Se aplica un escalón del 10% a la planta estabilizada dando parámetros iniciales a un

controlador, $K_p = 0.7$ y un $K_i = 0.1$. Además, se toma como set point un valor de 12 ma.



Gráfica 4. Definición Paramétrica de la planta

A partir de este punto se realizan los cálculos apropiados y se hallan los parámetros del controlador según [3] descritas a continuación.

La constante de tiempo del proceso, t_z :

$$t_z = 1.5(t|_{0.63\Delta O} - t|_{0.283\Delta O}) \quad (9)$$

Reemplazando se obtiene:

$$t_z = 1.5 * (1.9 - 0.9364) = 1.4454$$

Luego el tiempo muerto, t_{0z}

$$t_{0z} = t|_{0.63\Delta O} - t_z \quad (10)$$

Se obtiene:

$$t_{0z} = t|_{63\%} - t_z = 1.9 - 1.4454 = 0.4546$$

Para hallar la ganancia K_z del proceso en estado estacionario se determina primero:

$$\Delta TO = 17.925 - 16.025 = 1.9; \quad \Delta CO = 1.2$$

Donde ΔTO es el cambio de la respuesta de señal de salida transmisor y ΔCO es cambio del escalón a salida del controlador. Y como:

$$K_z = \frac{\Delta TO}{\Delta CO} \quad (11)$$

Se obtiene,

$$K_z = \frac{1.9}{1.2} = 1.5833$$

Una vez se obtienen los parámetros, de igual forma en [3] se toma de la tabla de fórmulas para ajuste para respuesta de razón de asentamiento de un cuarto para un controlador PI:

$$K_c = \frac{0.9}{K_z} \left(\frac{t_{0z}}{t_z} \right)^{-1} \quad (12)$$

$$t_i = 3.33 t_{0z} \quad (13)$$

$$K_i = \frac{K_c}{t_i} \quad (14)$$

Donde:

K_c : es la ganancia proporcional.

t_i : es el tiempo de integración.

K_i : constante de integración.

Reemplazando,

$$K_c = \frac{0.9}{1.5833} * \left(\frac{1.4454}{0.4546} \right) = 1.80$$

$$t_i = 3.33 * 0.4546 = 1.51$$

$$K_i = \frac{1.8073}{1.5138} = 1.19$$

Finalmente, para sintonizar el controlador, se excluye la parte derivativa donde, según [3]:

$$u(t) = \bar{u} + K_c e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (15)$$

Donde \bar{u} es el bias que equivale 12mA cuando alcanza la estabilidad y el error se vuelve cero. Y se obtiene que:

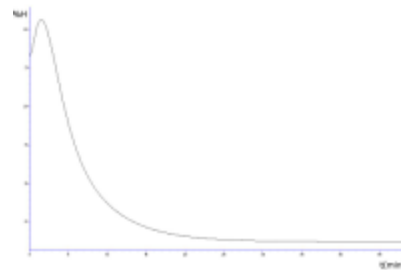
$$u(t) = 12 - (1.8 * e(t) + 1.19 * \int e(t) dt) \quad (16)$$

Donde el error esta definido como:

$$e(t) = 12 - TO(t) \quad (17)$$

Debido a que la planta es negativa, es decir, el aumento de la humedad $Q(t)$ visualiza inversamente la corriente $I(t)$.

Después se simula y se obtiene:

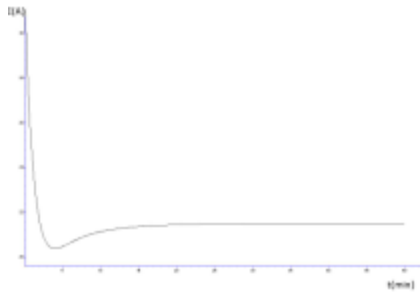


Gráfica 5. Humedad vs Tiempo.

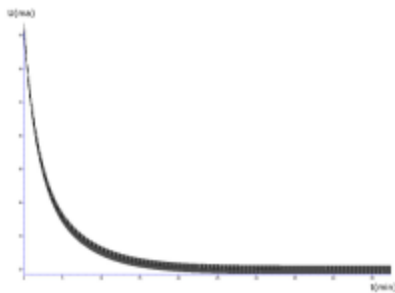
En la Gráfica 5, se observa que después de 30 min. la planta se estabiliza en el punto requerido %H=16.5%.

Simultáneamente la corriente de fase alcanza el valor 21.48 A, que manifiesta la arcilla en la humedad deseada. (Gráfica 6).

De este modo, el error (Gráfica 7) tiende a cero determinando que el transmisor llegó al punto requerido, y se estabiliza.



Gráfica 6. Corriente de fase vs Tiempo.



Gráfica 7. Error vs Tiempo

5. CALCULO DE CONFIABILIDAD

Las matemáticas que encierran el cálculo de la confiabilidad dadas en [5] exponen:

$$TPPF = \frac{1}{I} \quad (18)$$

$$R = e^{-It} \quad (19)$$

Donde

$TPPF$: es el tiempo promedio a fallar.

I : es la tasa de fallas

R : es la confiabilidad.

Para la medición de la confiabilidad de los elementos empleados en el Proceso de Humectación se tienen en cuenta ciertos aspectos técnicos recopilados en la industria como lo son las tablas internacionales *FARADIP* expuestas en un software de licencia privada, que se puede encontrar a través de [4]. Para este caso se asumió:

- λ Válvula de Bola=0.20 FPMH
- λ Válvula de Solenoide = 1.00 FPMH
- λ Controlador PLC= 5.0 FPMH

- λ Fuente 24 VDC= 4.0 FPMH
- λ Cableado= 0.5 FPMH

Teniendo estos dos aspectos se halla el porcentaje de confiabilidad de cada uno de los elementos nombrados anteriormente.

Para la válvula de bola $\lambda = 0.20$ FPMH, luego:
 $\lambda = 0.001752$ F/A

Luego la válvula de bola se tiene:

$$TPPF = \frac{1}{0.001752 \text{ F/A}} = 570.7$$

En su defecto, el $TPPF = 570.7$ años. Y la confiabilidad de una válvula de bola es:

$$R_1 = e^{-(0.001752 \text{ F/A})(\text{año})} = 0.9982495$$

Aproximadamente,

$$R_1 = 0.9982495 * 100 = 99.8 \%$$

Ahora en la válvula solenoide $\lambda = 1.0$ FPMH.

Convirtiendo el dato en Fallas por año (F/A):

$$\lambda = 0.00876 \text{ F/A}$$

Ahora bien, el $TPPF$ de una válvula solenoide se obtiene a continuación y se observa que:

$$TPPF = \frac{1}{0.00876 \text{ F/A}} = 114.155$$

En su defecto, aproximadamente el $TPPF = 114.155$ años. Se tiene que la confiabilidad de una válvula solenoide es:

$$R_2 = e^{-(0.00876 \text{ F/A})(\text{año})} = 0.991278$$

Aproximadamente,

$$R_2 = 0.991 * 100 = 99.1\%$$

Para el controlador PLC, $\lambda = 5.0$ FPMH

Convirtiendo el dato en Fallas por año (F/A):

$$\lambda = 0.0438 \text{ F/A}$$

Ahora bien, el $TPPF$ de un controlador se obtiene a continuación y se observa que:

$$TPPF = \frac{1}{0.0438 \text{ F/A}} = 22.83105 \text{ años}$$

Aproximadamente el $TPPF = 22.83$ años.

Se tiene que la confiabilidad de un controlador (PLC) es:

$$R_3 = e^{-(0.0438 \text{ F/A})(\text{año})} = 0.95714535$$

Aproximadamente:

$$R_3 = 0.95714535 * 100 = 95.7\%$$

La Fuente 24 VDC, $\lambda = 4.0$ FPMH

Convirtiendo el dato en Fallas por año (F/A) se obtiene que:

$$\lambda = 0.03504 \text{ F/A}$$

Ahora bien, el TPPF para una Fuente de 24 VDC se observa que:

$$TPPF = \frac{1}{0.03504 \text{ F/A}} = 28.538$$

El TPPF=28.53 años. Se tiene que la confiabilidad para una fuente de 24 VDC es:

$$R_4 = e^{-(0.03504 \text{ F/A})(1 \text{ año})} = 0.9655667$$

Y aproximadamente: $R_4 = 0.965566 * 100 = 96.5\%$

En el cableado $\lambda = 0.5$ FPMH. Convirtiendo el dato en fallas por año (F/A) se obtiene que:

$$\lambda = 0.00438 \text{ F/A}$$

Ahora bien, el TPPF del cableado utilizado, se obtiene a continuación y se observa que:

$$TPPF = \frac{1}{I} = \frac{1}{0.00438 \text{ F/A}} = 228.3$$

Aproximadamente el TPPF es 228.3105 años. Se tiene que la confiabilidad del cableado es:

$$R_5 = e^{-(0.00438 \text{ F/A})(1 \text{ año})} = 0.9956295$$

Y aproximadamente: $R_5 = 0.995 * 100 = 99.5\%$

La data de confiabilidades por componentes es:

Tabla 3. Confiabilidad de componentes de equipos

| Equipo/componente | FPMH | Índice de Confiabilidad (R) |
|-------------------|------|-----------------------------|
| Válvula de Bola | 0.20 | R1=99% |
| Válvula Solenoide | 1.0 | R2=99% |
| Controlador PLC | 5.0 | R3=95.7% |
| Fuente 24 VDC | 4.0 | R4=96.5% |
| Cableado | 0.5 | R5=99.5% |

La confiabilidad de un sistema serie, es la multiplicación de cada una de las confiabilidades como se describe a continuación, según [5]:

$$R_{TOTAL} = \left(\prod_{i=1}^n R_i \right) \quad (20)$$

Luego:

$$R_{TOTAL} = (R_1 * R_2 * R_3 * R_4 * R_5) \quad (21)$$

Y reemplazando:

$$R_{TOTAL} = (0.998) * (0.992) * (0.957) * (0.965) * (0.995)$$

$$R_{TOTAL} = 0.9097133024$$

Ahora para calcular el TPPF sustituimos R_{TOTAL} y lo calculamos a un tiempo t de un año.

$$I = \ln \left(\frac{1}{R_{total}} \right) \quad (22)$$

Reemplazando,

$$I = \ln \left(\frac{1}{0.9971} \right) = 0.09464$$

Sustituimos,

$$TPPF = \left(\frac{1}{0.09464} \right) = 10.5$$

Finalmente se obtiene que el tiempo promedio de falla es de 10.5 años.

6. CONCLUSIONES

Si se desconoce la función de transferencia de un sistema, esta se puede establecer experimentalmente capturando datos del proceso de forma directa, y así introduciendo las entradas conocidas, se evalúa la salida del sistema. Por tal razón debe haber un compromiso con la calidad de la data recopilada y la metodología utilizada en las pruebas de campo.

El sistema es estable si su salida permanece limitada para una entrada limitada. La salida se mueve de un estado estable a otro debido a los cambios en las señales de entrada.

La selección del sensor de humedad apropiado al proceso, demuestra que se pueden hallar nuevas alternativas como la planteada en el trabajo, que entrelazan de forma indirecta, todas las variables del proceso.

Como el proceso no es lineal, las características dinámicas de los demás elementos del circuito de control cambian de un punto de operación al siguiente, lo cual significa que un conjunto particular de parámetros de ajuste puede producir la respuesta que se desea únicamente en un punto de operación debido a que los controladores con retroalimentación estándar son dispositivos básicamente lineales y un controlador solo con acción proporcional no sería conveniente para ejercer control, para ello se complementa con la acción integral. Un incremento en la válvula de control da como resultado un decremento en la ganancia última del controlador.

Debido a que la planta no obedece los principios de linealidad, fue necesario recurrir a software de simulación de modelos matemáticos no lineales, que conjuntamente con el método Ziegler-Nichols obtuvieron los resultados esperados.

Este sistema tiene una confiabilidad de aproximadamente de 10 años y 5 meses, Con este sistema se podrá disminuir la brecha ocasionada por el fenómeno de una mala humectación en la arcilla.

Los parámetros óptimos de ajuste del controlador, dependen de la velocidad relativa de respuesta de la variable controlada a la perturbación; mientras más lenta sea la respuesta a la perturbación, con más rigor se puede ajustar.

REFERENCIAS

- [1]. http://patentados.com/invento/aparato_mezclador-continuo-de-mortero.html
- [2]. Katsuhiko, Ogata. *Ingeniería de control moderna*. Editorial Pearson Educación. Universidad de Minnesota. Tercera edición. Latinoamérica 1995.
- [3]. Smith Carlos, Corripio Armando. *Control Automático de Procesos*. Editorial Limusa, 2007.
- [4]. <http://www.technis.org.uk/software.html>
- [5]. Tarantino, Rocco. *Apuntes de Ingeniería de confiabilidad*, Univ. de Pamplona, 2007.
- [6]. Normas ISA 5.1 5.4.
- [7]. Creus Solé, Antonio., 1993 *Instrumentación Industrial*. Marcombo. Editores. Quinta Edición. 1996.
- [8]. Tarantino. R. y Aranguren, S. 2005. *Básico de Instrumentación Industrial*. Universidad de Pamplona. Colombia, 2006.
- [9]. Yaskawa. *Manual de Operación*, Variador de frecuencia F7 drive, 2007.