

Diseño de un Sistema de Control de Velocidad para motores en una trefiladora seca de alambres de acero mediante sistema SCADA

Marco Antonio Quinta Cutter
maqc_1783@hotmail.com

ABSTRACT

El presente trabajo de investigación presenta un diseño de control de velocidad para motores de inducción, en una maquina trefiladora de alambres de acero de cuatro pasos (cuatro motores). Mediante el control de velocidad de los motores se proporciona una fuerza mínima necesaria para vencer el límite elástico del alambre original, y no sobrepasar el límite elástico del alambre final, de esta manera se evitan fallas en el proceso por rompimiento del alambre. Se emplea el uso de convertidores de frecuencia de principio de control escalar para el control de velocidad de los motores, se describe también un estudio de las variables que deben ser consideradas en un proceso de trefilación de alambres de acero. Utilizando herramientas de simulación se obtiene el modelo matemático de la planta (conjunto convertidor de frecuencia y motor de inducción) en el plano complejo de La Place, donde se aplican técnicas de control clásico de acuerdo a los requerimientos del proceso. En este trabajo se realiza un estudio de la implementación de un sistema SCADA (sistema de control y adquisición de datos) para la automatización electrónica de la maquina trefiladora con equipos disponibles en el Instituto de Electrónica Aplicada. Finalmente se presenta el resultado de las simulaciones, conclusiones y recomendaciones obtenidas en esta investigación

Keywords – SCADA, trefiladora, control de velocidad.

I. INTRODUCCIÓN

A. El proceso de Trefilación

La Trefilación¹ es un proceso Metalúrgico en el cual el alambre de acero u otro material, es sometido a una

¹BEUNENS Paul; (1994); Tecnología del alambre, Bekaert, Bélgica

deformación plástica en frio con el objeto de reducir su diámetro, en este proceso debido a la conservación de masa se produce un aumento en la longitud del alambre y cambios en sus propiedades físicas de este.

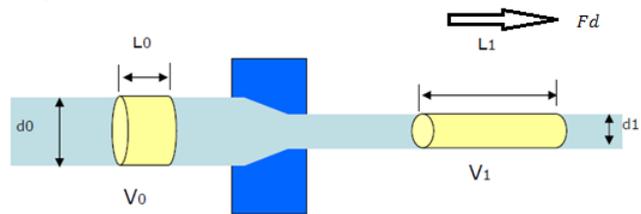


Figura 1: Conservación de masa durante el proceso de trefilado

d_0 = Diámetro original
 d_1 = Diámetro Final
 L_0 = Longitud original
 L_1 = Longitud Final
 V_0 = Volumen Inicial
 V_1 = Volumen Final
 F_d = Fuerza trefilado

La conservación de masa en el proceso puede escribirse de la siguiente forma:

$$v_o = v_1 \quad (1)$$

En general el esfuerzo se define como la fuerza interna por unidad de área en un objeto sometido a fuerzas externas. Un esfuerzo normal actúa perpendicular a la sección que lo soporta y se denota por²:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2)$$

²SCHEY J. A. (2002) "Procesos de Manufactura". Tercera Edición Editorial Mc Graw Hill/INTERAMERICANA EDITORES SA de CV, Pág. 80.

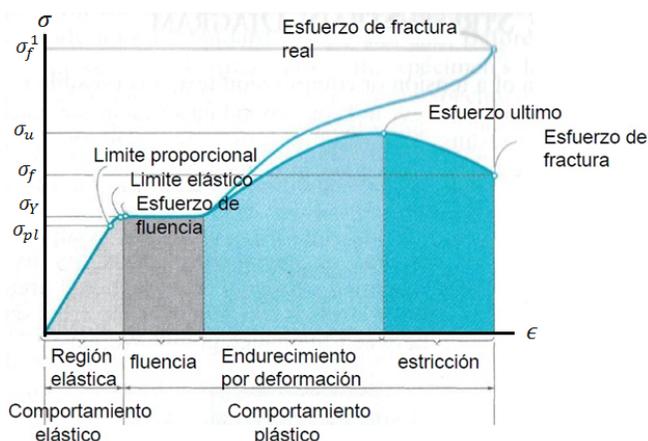


Figura 2: Curva esfuerzo vs deformación ingenieril y real de un acero de bajo límite de fluencia³

$$\sigma = \text{Esfuerzo} [N/m^2]$$

$$F = \text{Fuerza} [N]$$

$$A = \text{Area} [m^2]$$

B. Cambios Físicos del Acero durante el proceso de trefilado

Durante el proceso de trefilación, el acero sufre cambios en su estructura cristalográfica, cuando se aplica una tensión uniaxial (tensión uniforme en toda el área) a una barra de metal, primero se deforma elásticamente y después plásticamente ocasionando una deformación permanente hasta alcanzar su ruptura. Cuando un metal es deformado en frío (trefilación), el metal endurece por deformación y como resultado aumenta su resistencia y disminuye su ductilidad.

Estos fenómenos son muy conocidos por una rama de la mecánica que se llama Resistencia de materiales.

$$\sigma_{pl} = \text{Limite proporcional}$$

$$\sigma_Y = \text{Limite elástico, esfuerzo de fluencia}$$

$$\sigma_f = \text{Esfuerzo de fractura}$$

$$\sigma_u = \text{Esfuerzo último}$$

$$\sigma_f^1 = \text{Esfuerzo real último}$$

La relación entre la curva esfuerzo – deformación ingenieriles, y la curva esfuerzo – deformación reales, se ilustra en la figura 2. En determinaciones ordinarias de esfuerzo y deformación ingenieril o aparente, se calcula dividiendo la carga o la fuerza de deformación entre la sección transversal inicial.

³SCHEY J. A. (2002) “Procesos de Manufactura”. Tercera Edición Editorial Mc Graw Hill/INTERAMERICANA EDITORES SA de CV, Pág. 80.

En coordenadas logarítmicas la figura 2 tiene la siguiente relación.

$$\log \sigma = \log k + n \cdot \log \epsilon \quad (3)$$

$$\sigma = k\epsilon^n \quad (4)$$

$$\sigma = \text{esfuerzo} [N/m^2]$$

$$k = \text{constante} [N/m^2]$$

$$\epsilon = \text{porcentaje de reducción}$$

$$n = \text{coeficiente de endurecimiento de trabajo}$$

Cuando el material tiene un coeficiente n grande, significa que endurece más debido a la cantidad de deformación plástica en frío que si tuviera un coeficiente n pequeño.

C. Tensiones residuales en los alambres de acero

Las deformaciones que los alambres sufren a nivel cristalográfico, origina que se incremente considerablemente la resistencia a la tracción, la dureza, la fragilidad y disminuyen la ductilidad y la elasticidad⁴, este fenómeno es también conocido como acritud.

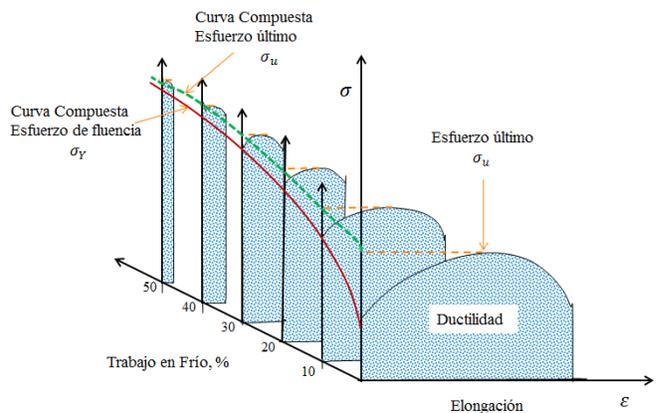


Figura 3: disminuye la ductilidad (YS)⁵

Para continuar con la reducción del alambre se debe eliminar los efectos de este fenómeno, esto se logra tratando térmicamente el alambre para eliminar las tensiones residuales, este tratamiento se llama recocido.

En la figura 4, se muestra la apariencia de la estructura cristalina vista en forma microscópica, la acritud y la estructura que se obtiene después del tratamiento térmico.

⁴MATEUS AYALA L. (2006), “Manual de Operaciones del Proceso de Trefilado de alambre de Acero y Aluminio”. Escuela Politécnica Nacional, Quito Ecuador, Pág. 34.

⁵SCHEY John A. (2002). “Procesos de Manufactura”. Tercera edición EDITORIAL MC GRAW HILL/INTERAMERICANA EDITORES SA de CV, Pág. 272

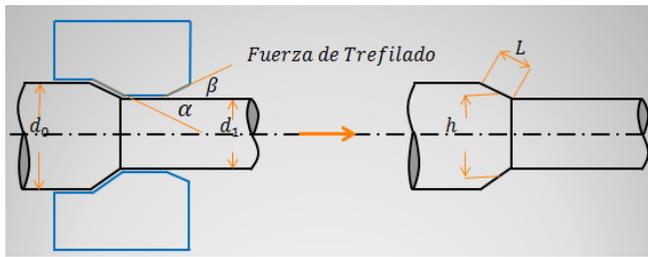
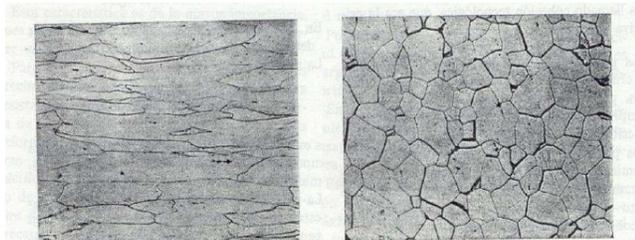


Figura 5: Geometría del dado⁸



ACRITUD

RESTAURACIÓN

Figura 4: Acritud y restauración de la estructura cristalina después del recocido⁶

D. Variables que influyen en un proceso de Trefilado

1) La Matriz o Dado⁷

El dado o matriz, es la pieza mecánica por donde se pasa el alambre para ser estirado, Es fabricado de diamante (natural o sintético) o carburo de tungsteno por su dureza.

Donde:

$$2\alpha = \text{Ángulo de entrada}$$

$$2\beta = \text{Ángulo de salida}$$

$$\frac{L}{h} = \text{Razón de contacto}$$

2) Refrigeración

Durante el proceso de trefilación, el alambre adquiere una temperatura que debe ser controlada, de no ser así estas podrían destruir la capa de lubricante y hacer variar las propiedades físicas del alambre, además de dañar el dado por exceso de temperatura, pero lo más importante; una transformación de fase del acero, por este motivo se

⁶BEUNENS Paul; (1994); Tecnología del alambre, Bekaert, Bélgica

⁷Alcubierre A. (2002), "Selección de hileras de diamante para la trefilación de hilos desde alambón, hasta diámetros súper fino"s Pág. 11. Sao Paulo, Brasil.

⁸SCHEY J. A. (2002) "Procesos de Manufactura". Tercera Edición Editorial Mc Graw HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. de C.V. Pág. 370.

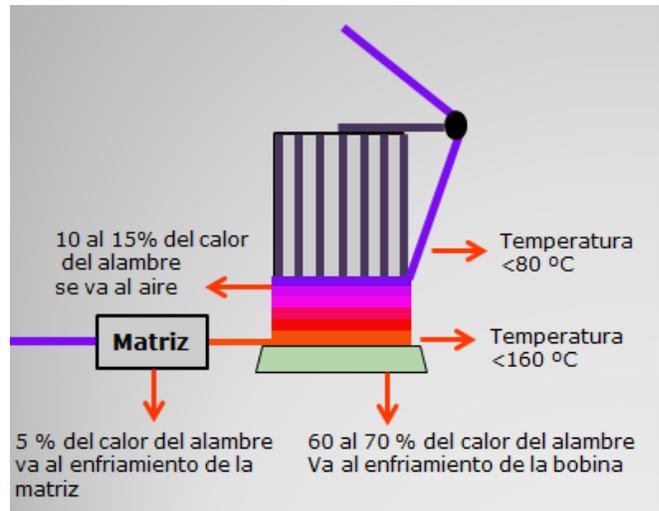


Figura 6: Distribución de la temperatura del alambre¹⁰

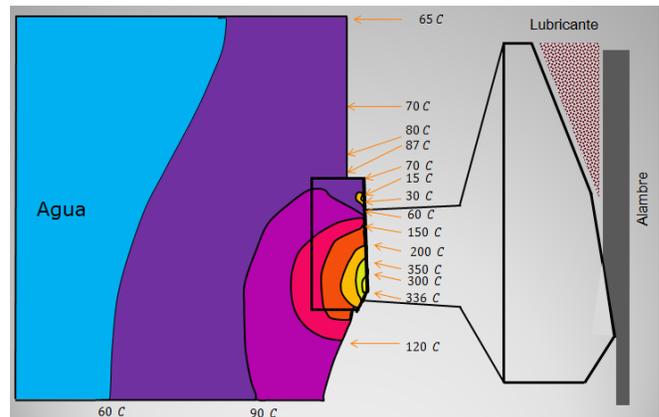


Figura 7: Temperaturas en el dado de trefilación¹¹

controla la temperatura para que sobrepase los 200 a 250 °C⁹.

La temperatura del dado esta también en función de la temperatura que adquiere el alambre, el dado esta refrigerado con agua para de esta manera no incremente su temperatura hasta valores que puedan afectar y destruir el lubricante, esta temperatura debe mantenerse hasta 50 a 60 °C para evitar estos efectos.

E. Mecánica del proceso de trefilado¹²

⁹Atiienza Ribera José M. (2001), "Tensiones Residuales en Alambres de Aceros Trefilados", Universidad Politécnica de Madrid, Pág. 99

¹⁰BEUNENS Paul; (1994); Tecnología del alambre, Bekaert, Bélgica

¹¹BEUNENS Paul; (1993). "La trefilación" Bekaert, Bélgica.

¹²SCHEY A. J. (2002) "Procesos de Manufactura", Tercera edición Editorial Mc Graw Hill//INTERAMERICANA EDITORES SA de CV, Pág. 371.

Cálculo de los diámetros anterior y posterior en función del porcentaje de reducción:

$$R\% = \left(\frac{1 - d1^2}{d0^2} \right) \cdot 100 \quad (5)$$

Cálculo de los diámetros anterior y posterior en función del porcentaje de alargamiento:

$$R\% = \left(\frac{d1^2 - 1}{d0^2} \right) \cdot 100 \quad (6)$$

Obtener la corrección de la no homogeneidad de la deformación:

$$L = \frac{do - d1}{2 \sin(\alpha)} \quad (7)$$

$$h = d1 + L \sin(\alpha) \quad (8)$$

Se calcula las áreas inicial y final del alambre:

$$A0 = \frac{\pi}{4} do^2 \quad (9)$$

$$A1 = \frac{\pi}{4} d1^2 \quad (10)$$

$$e = \frac{A0 - A1}{A0} \quad (11)$$

Cálculo de la deformación Logarítmica.

$$\epsilon = \ln\left(\frac{A0}{A1}\right) \quad (12)$$

Cálculo de del esfuerzo promedio:

$$\int \sigma \cdot d(\sigma) = \int_{\epsilon2}^{\epsilon1} K_{\epsilon} \cdot (\epsilon) \quad (13)$$

$$\sigma_{fm} = \frac{K}{\epsilon2 - \epsilon1} \left[\frac{\epsilon2^{n+1} - \epsilon1^{n+1}}{n+1} \right] \quad (14)$$

Consideración de los efectos de la fricción de la matriz y la no homogeneidad en la deformación.

$$\phi = 0,88 + 0,13 \frac{h}{L} \quad (\geq 1) \quad (15)$$

$$\sigma_{fr} = 1 + \mu \cdot \cot(\alpha) \quad (16)$$

De esta forma tenemos el esfuerzo resultante en el alambre luego de un porcentaje de reducción en una matriz de estirado.

$$\sigma_{salida} = \sigma_{fm} \cdot Q_{fr} \cdot \phi \cdot \epsilon \quad (17)$$

Así de acuerdo a la definición de esfuerzo de salida, calculamos la fuerza de trefilado:

$$F_{estirado} = \sigma_{salida} \cdot A1 \quad (18)$$

La potencia que se requiere para el estirado se obtiene de la definición de potencia en un motor de inducción.

$$P_{potencia} = F_{estirado} \cdot v \quad (19)$$

En una maquina trefiladora de varios pasos o para trefilados múltiples, la invariabilidad del volumen se aplica de nuevo y se impulsan tambores individuales a velocidades cada vez más elevadas para compensar la reducción de área. La velocidad de los motores individuales se controla para proporcionar la tensión o la fuerza adecuada para el trefilado.

$$A0v0 = A1v1 = A2v2 = A3v3 = Anvn \quad (20)$$

$$A0 > A1 > A2 > A3 > An \quad (21)$$

$$v0 < v1 < v2 < v3 < vn \quad (22)$$

II. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA CONVERTIDOR-MOTOR DE INDUCCIÓN (PLANTA)

Matlab nos proporciona la herramienta AC1, este bloque disponible en Simulink tiene incorporado los modelos matemáticos de un motor de inducción, un rectificador trifásico de onda completa (*Three - phase full converter*), un bloque de frenado automático (breaking chopper), un inversor DC AC controlado por el principio de control escalar (*Three - phase inverter*) y un regulador de Voltaje DC bus (*DC bus voltage regulator*).

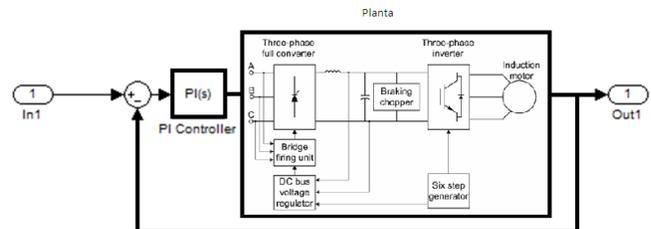


Figura 8: Diagrama de bloques de la Planta (conjunto convertidor de frecuencia y motor de inducción), controlador PI y lazo de realimentación del sistema planteado

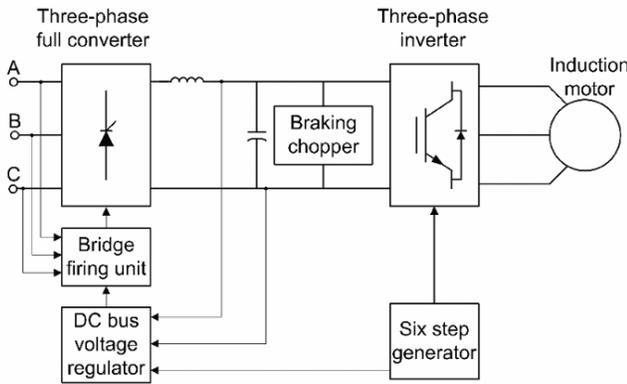


Figura 9: AC1, Six – Step VSI Induction Motor Drive (Fuente: Matlab 2010).

El sistema planta controlador consiste en los siguientes bloques: La planta está compuesta por el motor de inducción y el inversor trifásico de principio de control escalar. El lazo de realimentación está presente a la salida del rectificador trifásico, esta señal es llamada V_{bus} por el bloque en Matlab, esta señal es la que se realimenta negativamente con la señal de referencia V_{bus}^* , la diferencia de estas señales es la que utiliza el controlador PI para el control del sistema

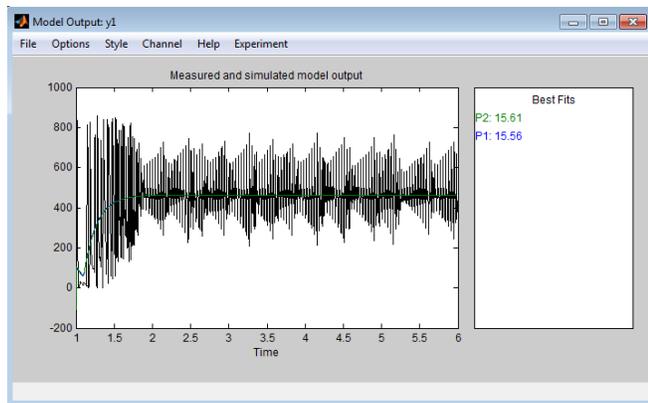


Figura 10: P1 Primera aproximación con un sistema de primer orden, P2 segunda aproximación con un sistema de segundo orden.

Las aproximaciones del comportamiento dinámico de la planta (Convertidor-motor) se muestran en la figura 10 con la ayuda de ident de Matlab. Gracias a ident de Matlab, podemos modelar un comportamiento dinámico de nuestra planta, en este caso establecimos dos aproximaciones, uno de primer orden y otro de segundo orden en el plano complejo de LaPlace. De esta manera tenemos un modelo de nuestra planta en donde es posible la aplicación de técnicas de control.

Función de Transferencia

$$\frac{0,9627}{0,167s + 0,373} \frac{0,9632}{0,1725s^2 + 0,1735s + 0,0373}$$

A. Diseño del controlador PI

El cálculo de las constantes PI del controlador se realiza para mejorar la respuesta de la misma, se utiliza la primera técnica de sintonización de controladores PID de Ziegler Nichols. Ya que este método está basado en enfoques experimentales para la sintonización de los controladores PID.

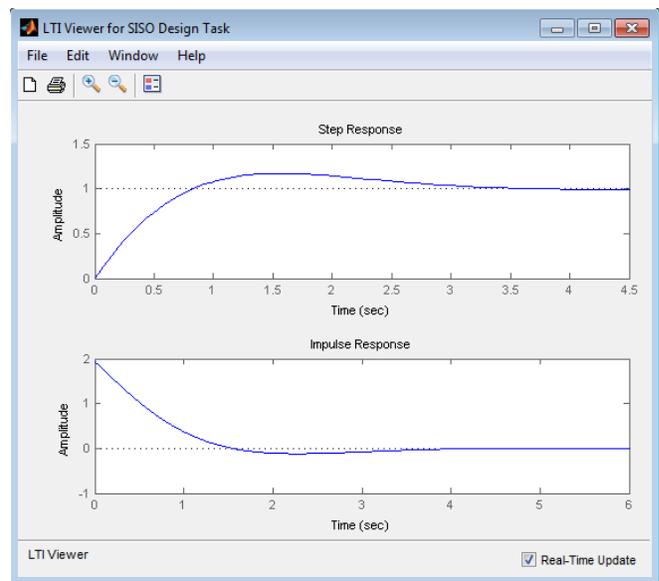


Figura 11: Respuesta al paso y al impulso del sistema de segundo orden con controlador sintonizado por Ziegler Nichols.

Los cálculos de las variables mecánicas y los límites del proceso, pueden resumirse en la tabla ??, en donde se indica la factibilidad o no del proceso.

Variable	Paso 1	Paso 2	Paso 3	Paso 4
$A_0 [mm^2]$	23,758	21,598	19,6342	17,850
$A_1 [mm^2]$	21,598	19,627	17,849	16,226
e	0,091	0,091	0,0909	0,0909
ϵ	0,095	0,096	0,0953	0,0953
$\sigma_{fm} [\frac{N}{m^2}]$	228,020	333,540	333.55	333,382
σ_{fr}	1,715	1,715	1,715	1,715
ϕ	1,231	1,230	1,231	1,231
$\sigma_{salida} [\frac{N}{m^2}]$	45,902	67,328	67,141	67,114
$F_{est} [N]$	991,390	1,321e3	1,198e3	1,089e3
$F_{limite} [N]$	5,122e3	5,240e3	4,761e3	4,328e3

Tabla 1: Cálculo de variables mecánicas

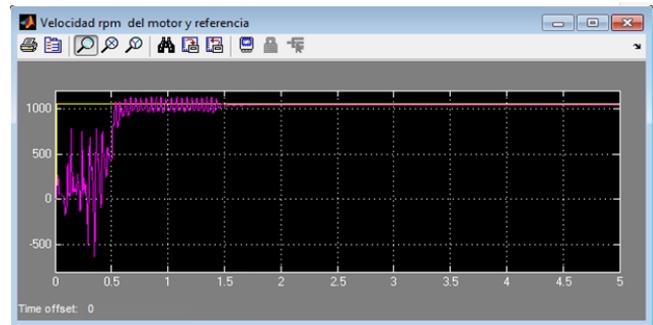
Los cálculos de las variables mecánicas por cada paso son realizadas en un archivo de extensión *.m en MatLab.

```

1 %Ecuaciones para el cálculo de variables en
  un proceso de trefilación de
2 %alambres de acero, Developed by Marco
  Antonio Quinta Cutter
3 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
4 %Parámetros del alambre
5 K=600; % Esfuerzo de fluencia Mpa
6 epsilon1=0.0953 %si no ha sido deformado
  antes
7 n=0.25; %coeficiente de endurecimiento
  por deformación
8 %Dimensiones de la matriz
9 alfa=4; %Angulo de la matriz (grados)
10 d0=4.7672; %diámetro inicial (mm)
11 d1=4.5453; %diámetro final (mm)
12 L=(d0-d1)/(2*sin(alfa*pi/180)); %hipotenusa
  de la zona de deformación
13 h=d1+L*sin(alfa*pi/180); %altura media
14 razón=h/L; %razón del trabajo redundante
15 %Variables del proceso de trefilación
16 mu=0.05; %coeficiente de fricción del
  lubricante
17 velocidad=2; %velocidad de trefilación m/s
18 % 1er y 2do paso: Hallar el área inicial Y
  final
19 A0=pi*(d0)^2/4
20 A1=pi*(d1)^2/4
21 % 3er paso: Deformación ingenieril
22 e=(A0-A1)/A0
23 %4to paso deformación logarítmica
24 epsilon2=log(A0/A1)
25 %6to paso esfuerzo de fluencia promedio
26 sigmafm=K*((epsilon2^(n+1)-epsilon1^(n+1))/(
  n+1))/(epsilon2-epsilon1)
27 %7mo paso Efectos de la no homogeneidad y la
  fricción en el proceso
28 Qfr=1+mu*cot(alfa*pi/180) %efecto de la
  fricción
29 phi=0.88+0.12*razón %Factor de trabajo
  redundante
30 sigmasal=sigmafm*Qfr*phi*epsilon2 %Esfuerzo
  del alambre trefilado
31 %8vo paso, Fuerza de estirado y potencia
  necesaria
32 F=sigmasal*A1
33 P=F*velocidad
34 %condiciones y límites del diseño
35 Flimite=0.8*K*epsilon2^(n)*A1
36
  
```

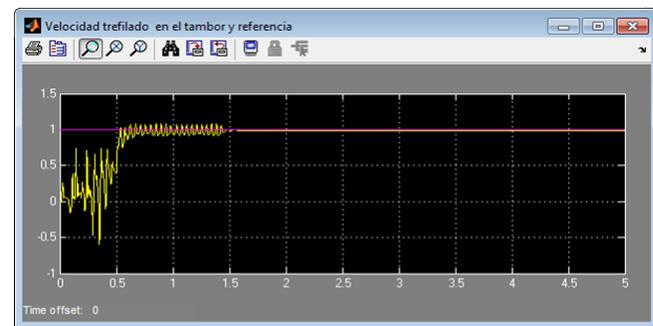
Código 1: Archivo *.m en Matlab para el cálculo de las variables del proceso.

Las variables mecánicas calculadas, se incluyen en la simulación como entradas y salidas, el resultado de la simulación del sistema para un paso se muestra a continuación.



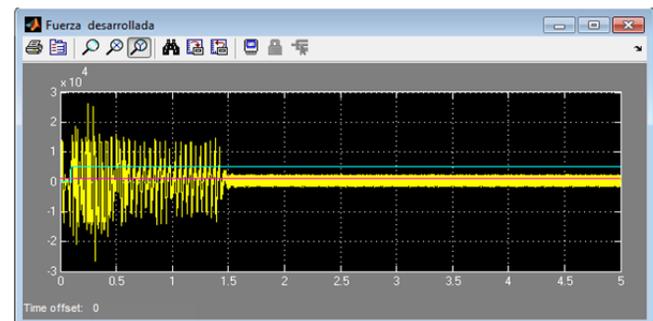
Velocidad de referencia [rpm]
Velocidad desarrollada por el motor [rpm]

Figura 12: Velocidad de referencia y velocidad desarrollada por el primer motor



Velocidad de referencia [m/s]
Velocidad desarrollada en el tambor [m/s]

Figura 13: Velocidad de referencia y velocidad de trefilado del primer tambor



Fuerza desarrollada por el motor de inducción en el tambor.
Fuerza de resistencia que presenta el alambre.
Fuerza de resistencia máxima que no debe ser sobrepasado en la Trefilación.

Figura 14: Fuerzas presentes y desarrolladas en un proceso de trefilación

III. DISEÑO DEL SISTEMA SCADA

De acuerdo al modelo CIM, la arquitectura de comunicaciones del sistema SCADA implementada en el presente trabajo es el siguiente:

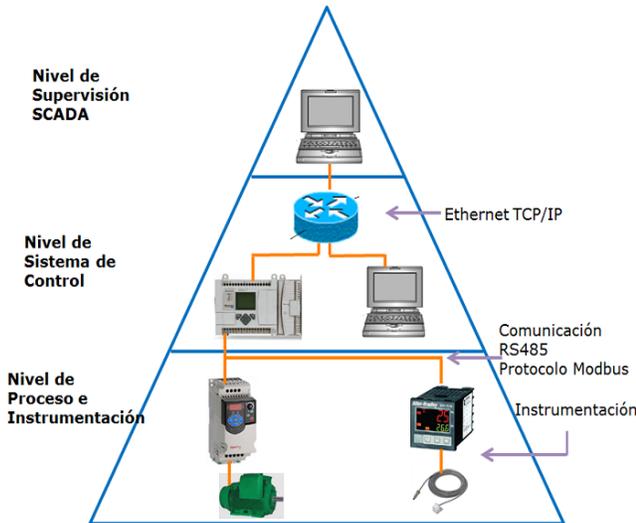


Figura 15: Estructura de comunicaciones y componentes del sistema SCADA implementado en el presente Trabajo

El sistema propuesto alcanza hasta el nivel SCADA del modelo CIM, sin embargo esto no limita la expansión del sistema hasta los niveles MES y ERP, esto debido a que al utilizarse un enrutador para la comunicación entre el nivel SCADA y el nivel de Control, se puede tener acceso a una red WAN.

A. Programación del sistema

Una máquina trefiladora seca de alambres de acero de cuatro pasos se describe en las figuras siguientes:

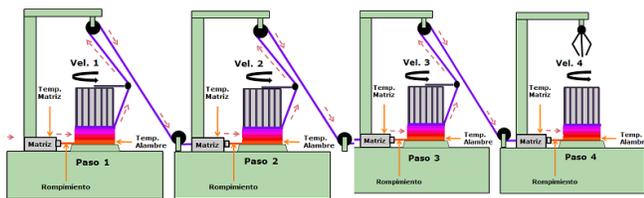


Figura 16: Trefiladora de alambres de acero de cuatro pasos, ubicación física de los sensores del proceso

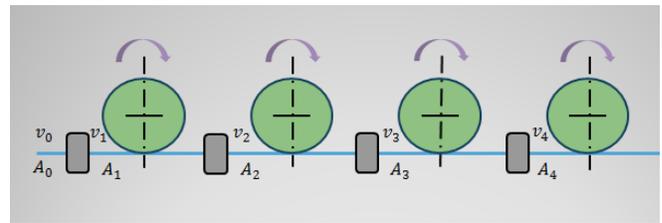


Figura 17: En una maquina trefiladora el caudal del flujo del material debe mantenerse



Figura 18: Flujo de datos en el sistema SCADA para el control de velocidades de la trefiladora seca

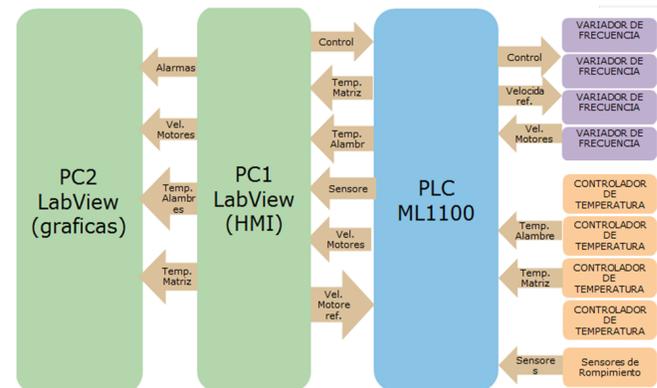


Figura 19: Programación gráfica HMI, monitoreo de alarmas de las variables del proceso velocidad y fuerza de trefilado

IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se realizó el estudio del proceso mecánico de trefilación de alambres de acero, con las variables y condiciones que se deben tomar en cuenta para evitar fallas en el proceso.
- Con los límites del proceso mecánico de trefilación de alambres de acero, se diseñó un sistema de control de velocidades de motores de inducción de tal forma que las fuerzas ejercidas en el alambre no superen los límites recomendados para el proceso de trefilación.

- Se simuló el modelo matemático de la planta en base a convertidores de frecuencia con principio de control escalar, motor de inducción y par de carga, en base al modelo electromecánico de sus componentes utilizando Simulink. Se realizó la simulación del comportamiento dinámico del sistema en el plano complejo de La Place, se aplicó la técnica de sintonizado de controladores de Ziegler y Nichols para el proceso.
- Se diseñó un Sistema de Control y Adquisición de Datos SCADA, para el control y monitoreo de las variables del proceso para una trefiladora seca de un paso. Para este hecho se ha utilizado equipos y software disponibles en el Instituto de Electrónica Aplicada, el funcionamiento del sistema implementado en el instituto se verifica correctamente.

- [11] Atienza Riera José Miguel. "Tensiones Residuales en Alambre de Aceros Trefilados". Tesis doct. Madrid - España: Tesis Doctoral Politécnica de Madrid, 2001.
- [12] Jesús Fraile Mora. *Maquinas Eléctricas*. McGraw Hill/Interamerica de España.
- [13] Mauricio Améstegui Moreno. *Mauricio*. La Paz, Bolivia: Universidad Mayor de San Andrés, 2003.
- [14] John A. Schey. *Procesos de Manufactura*. 3.^a ed. Universidad de Waterloo, Ontario, 2000.
- [15] Cheng Ching You. *Autotuning of PID Controllers, A relay Feedback Approach*. 2.^a ed. Faculty of Electrical Engineering, Eindhoven University of technology, Eindhoven - Netherlands, 2006.

REFERENCIAS

- [1] Paul Beunens. *Tecnología del alambre*. Bekaert - Belgica, 1994.
- [2] Bailey David y Wright Edwin. *Practical SCADA for industry*. Great Britain: Elsevier, 2003.
- [3] Sopena De y José Antonio Irabien. *Aceros Productos y Derivados*. I y II vols. Departamento Técnico de COSIMET, Bilbao, 1968.
- [4] Ramírez Córdova Walter Emilio. *Elaboración de un manual de procedimientos operativos para la estandarización del proceso de trefilación de alambre en la industria mecánica*. Universidad de San Carlos de Guatemala, 2001.
- [5] Mateus Ayala Luis Fernando. *Manual de Operaciones del Proceso de Trefilado de Alambre de Acero y Aluminio*. Inf. téc. Quito - Ecuador: Escuela Politecnica Nacional, 2006.
- [6] Escubierre Gerardo. *Selección de Hileras de Diamante para la Trefilación de hilos desde Alambros hasta diámetros súper finos*. ESTEVES DO BRASIL, Sao Paulo - Brasil, 2002.
- [7] Aillon Abril Marco Javier. "Diseño de una sistema SCADA de Control Automático de Temperatura y Humedad para Lechos de Producción de HUMUS de Lombriz en la Empresa BIOAGROTECSA CIA. LTDA". AMBATO, ECUADOR: Universidad Técnica de AMBATO, Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial, 2010.
- [8] Ogata Katsuhito. *Ingeniería de control Moderna*. Prentice-Hall Hispanoamericana, 1998.
- [9] Trzynadlowsky Andrzej M. *Control of Induction Motors*. Department of Electrical Engineering University of Nevada, 2001.
- [10] Stuart G. McCrady. *Designing SCADA Application Software a Practical Approach*. Canada: Elsevier, 2013.