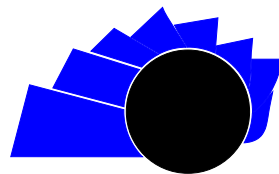




Visión Electrónica

Más que un estado sólido

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/visele/index>



VISIÓN ELECTRÓNICA

VISIÓN DE CASO

Sistema de control para alimentador de hilo de trama

Weft yarn feeder control system

Hugo F. Suárez V.¹, Aldemar Fonseca V.², Harold Vacca G.³

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historia del artículo:

Enviado: Noviembre de 2014

Recibido: Noviembre de 2015

Aceptado: Enero de 2015

Palabras clave:

Alimentador de hilo de trama

PID

Sistema de control híbrido

Variador de frecuencia VFD

RESUMEN

El presente artículo, resultado de la investigación realizada en la línea de diseño e implementación de sistemas de control para la industria textil en los proyectos curriculares de Tecnología Electrónica y de Ingeniería en Control, de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, describe el diseño de un sistema de control para dispositivos denominados: Alimentadores de Hilo de Trama (AHT). Se lleva a cabo una innovación tecnológica que le devuelve la funcionalidad a los AHT con recursos razonables, basados en tecnología actual. La alternativa propuesta consiste en el diseño de un sistema de control híbrido en lazo cerrado, compuesto por un control PID y un control Lógico Discreto, ambos implementados en un Variador de Frecuencia (VFD) con función interna de PLC y Control PID. Con el modelamiento físico se obtiene una función de transferencia que representa la dinámica del AHT; se diseña el compensador (control PID) y en conjunto con el control lógico se obtiene un suministro continuo y uniforme del hilo al telar por parte del AHT.

ABSTRACT

This article describes the process that leads to the design of a control system for a device named: Weft Yarn Feeder (WYF), used in the weaving of plastic fabric. This problem emerged by interest of repetitive damage in original control electronic cards of WYF and its short duration. Therefore, this research conducts a technological innovation that returns the functionality to this device WYF at reasonable prices with current technology. The alternative is a hybrid system closed loop control, and it consists of a PID control and Discrete Logic, both implementing at a variable frequency drive (VFD) with PID Control and in the PLC internal function. With physical modeling a transfer function representing the dynamics of WYF is obtained. With the compensator (PID control), in conjunction with the logic control designed, it is obtained the continuous and uniform supply of yarn to the loom by the WYF.



Keywords:

Weft yarn feeder

PID

Hybrid control system

Variable frequency drive VFD

¹Tecnólogo Electrónico, e Ingeniero en Control, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., lugar de trabajo: Ciplas S.A. Correo electrónico: hfsuarezv2@hotmail.com

²Ingeniero electrónico, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia; MSc. en Ing. Biomédica, Universidad Nacional de Colombia. Grupo de investigación INTEGRA, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; docente Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Colombia). Correo electrónico: afonseca@udistrital.edu.co

³Licenciado en matemáticas, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia; MSc. En matemática aplicada, Universidad EAFIT (Colombia); director grupo de investigación SciBas, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; docente Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correo electrónico: hvacca@udistrital.edu.co

Citar este artículo como: H. F. Suárez V, A. Fonseca V, H. Vacca G. "Sistema de control para alimentador de hilo de trama". *Visión Electrónica*, algo más que un estado sólido, Vol. 9, No. 1, 90-101, enero-junio 2015.

1. Introducción

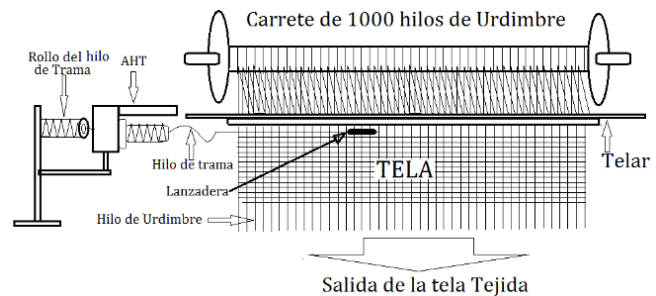
El sector textil en Colombia cuenta con una trayectoria de más de 100 años y, pese a las condiciones externas de sus socios comerciales, se ha mantenido vigente en la producción de telas para los diferentes sectores económicos nacionales e internacionales. Para la primera década del siglo XXI, el sector textil colombiano se había convertido en un eje productivo de la economía representando el 10 % del PIB manufacturero, el 1 % del PIB nacional y más del 5 % del total de exportaciones del país. Las confecciones constituyeron el 72 % de la producción, las fibras y tejidos el 28 %, las confecciones un 92 % del valor agregado de la cadena de valor y el 8 % del valor agregado de la industria [1], [2].

El Alimentador de Hilo de Trama (AHT) es un equipo fundamental en el proceso de fabricación de la tela plástica que se teje en un telar plano. Su función principal es la de proveer de manera uniforme e ininterrumpida el hilo que necesita el telar para fabricar la tela. El tejido o construcción de la tela está constituido básicamente por el entrecruzamiento perpendicular de dos tipos de hilos, uno denominado Urdimbre, que se extiende a lo largo de la tela y el otro llamado Trama que se extiende a lo ancho de la misma. El hilo de trama se entrecruza por los hilos de urdimbre cada vez que el telar plano tira de él intermitentemente disparando una lanzadera que lo sujeta de su extremo y lo lleva de izquierda a derecha en un proceso repetitivo una y otra vez [3]. Es allí donde el AHT entra en acción, pues este desbobina un rollo de hilo plástico colgado al lado del telar y lo enrolla esta vez sobre su tambor con el propósito de mantener constante la tensión del hilo, tensión que aumentaría si se colocase directamente el rollo de hilo plástico sin el AHT, dado que a medida que el telar consume el hilo de trama, el diámetro del rollo disminuye ocasionando revientes y enredos por la tensión excesiva sobre el hilo. En La Figura 1a(a) se describe el proceso de tejido al tiempo que se identifican todas sus partes principales.

La presente investigación se enfatiza en un AHT para uso en telares planos con lanzaderas. La patente de 1983, presentada por T. Yoshida, definía la estructura de un AHT así: un eje fijo soportado en solo un extremo por un soporte; un manguito angularmente ajustable montado en un eje fijo, el manguito tiene un orificio longitudinal a través del cual se extiende el eje fijo, el eje del orificio longitudinal está inclinado con respecto al eje del manguito; un rodillo montado de forma giratoria concéntricamente al manguito; un eje giratorio paralelo al eje fijo; un carrete montado en el eje rotativo que rota con el mismo; y el soporte que conecta el eje fijo, y el eje

giratorio y sus extremos libres [4].

Figura 1a: Descripción del proceso de tejido y sus partes



Fuente: elaboración propia.

Desde entonces a hoy han existido en el mercado diversos AHT, como el Chrono-X2 cuyas partes se muestran en la Figura 1b. Este, posee sensores dedicados: un sensor mecánico, un detector de rotura de hilo, un sensor de reserva de hilo, un sensor óptico y un ajuste de control de balón (control de apertura de las espiras sobre el tambor del AHT). El fabricante destaca que posee fallas comunes: el alimentador no arranca; el alimentador no para; la reserva de hilo es baja o vacía; se rompe frecuente el hilo a la entrada; se rompe frecuente el hilo a la salida; o los fusibles se funden repetidamente. Todas ellas se solucionan, pero comprende comprobaciones secuenciales de los sensores óptico y mecánico, [5].

El Luna-X2, de Iro AB, Aros Electronics AB, de funcionamiento similar al anterior, posee, en tanto, control vectorial sin sensor, [6]. El Duling DL-122, de Transally, Figura 2, posee un microprocesador que controla y ajusta la velocidad del motor a través de la tecnología de un convertor de frecuencia embebido para realizar el seguimiento del hilo de alimentación de forma automática. El alimentador, no obstante, es ideal para máquinas de tejer con pinzas donde se requiere un alimentador de trama pequeña y compacta, por lo que utiliza un sensor piezoeléctrico de salida para la detección de la trama introducida a la máquina de tejer [7].

No obstante, recientemente se han registrado invenciones de dispositivos que detectan paradas accidentales del hilo sin emplear sensores dedicados para AHT, provistos de un tambor estacionario y con un dispositivo de frenado de trama controlado; en general, métodos para utilizarse en líneas de tejer en la que los alimentadores tienen un funcionamiento discontinuo. Opciones que emplean mecanismos de umbral de tiempo para determinación de paradas, [8].

Figura 1b: Alimentador Chrono-X2 [6]

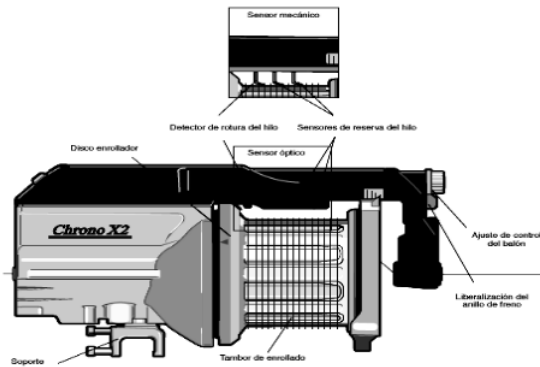
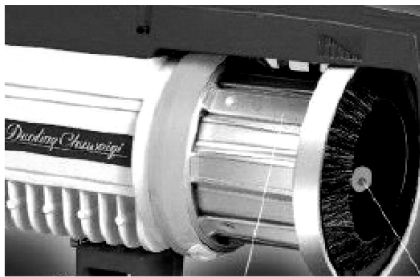


Figura 2: Alimentador DL-122 [7]



En cuanto a maquinaria textil, en [9] se documenta una reingeniería del sistema de control para una máquina circular tejedora de punto Mayer, tipo: IHLG III F. Allí, el arranque y control de velocidad del motor se realiza con la ayuda de un driver o variador de frecuencia; los sensores de detección de hilo (memingers) y los de detección de deformación de aguja, al igual que el motor, no obstante, deben ser los sugeridos por el fabricante; se utilizan 84 sensores de presencia de hilo, y 11 sensores que detectan la deformación de agujas, observándose se utiliza gran cantidad de energía, materia prima y tiempo, así como una gran cantidad de señales que se deben procesar.

De otro lado, y finalmente, en [10] se estudia la denominada tensión de entrada en hilado como uno de los parámetros más importantes en la industria tejedora de trama. Este parámetro debe mantenerse entre ciertos límites con el fin de producir tejido de punto sin fallos y la parada prematura de la máquina debido a la rotura del hilo; presenta un sistema de supervisión, un sensor de fuerza de bajo costo, y se introduce un nuevo actuador para el control de la tensión en el hilo.

Como se puede apreciar de lo expuesto, la problemática es vigente. Por lo anterior, el presente artículo describe la alternativa de innovación y desarrollo de un diseño de sistema de control para un solo

alimentador de hilo de trama con el objetivo de mantener el nivel del hilo enrollado sobre el cuerpo del alimentador mientras el telar tira de él en su proceso de tejido intermitente.

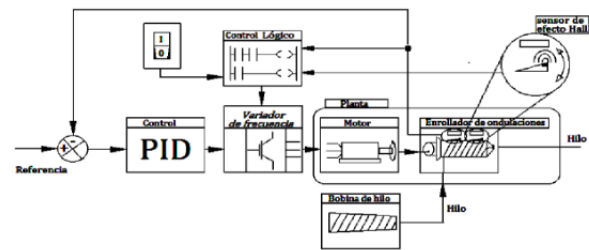
El artículo se estructura de la siguiente manera: en el apartado 2 se describen los materiales y métodos empleados; en el apartado 3, se describe la alternativa; en el apartado 4, se ilustran las pruebas; en el 5 se exhiben los resultados; y en el 6 las conclusiones.

2. Metodología

2.1. Modelamiento del sistema [11]

El sistema se construye por la combinación del modelado por análisis de sistemas físicos y del modelado por identificación de sistemas, [12]. El desarrollo, finalmente, se basa en el diagrama de bloques de la Figura 3, donde se puede identificar un sistema de control híbrido que está compuesto por un control PID de variable continua y un control lógico discreto. Estos sistemas de control se implementan en un variador de frecuencia VFD que maneja la velocidad del motor para controlar el nivel del hilo enrollado sobre el tambor del AHT.

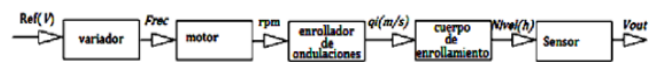
Figura 3: Diagrama de bloques de la solución



Fuente: elaboración propia.

En la representación mostrada del diagrama de bloques de la Figura 4, se pueden observar todos los dispositivos que conforman el sistema en lazo abierto.

Figura 4: Diagrama de bloques del sistema en lazo abierto



Fuente: elaboración propia.

Cada bloque representa un sistema que se debe modelar para obtener finalmente una función de transferencia que represente la dinámica del AHT. El desarrollo de la solución propuesta, siguió el siguiente método:

- Modelamiento de cada bloque de manera independiente
- Simulación en conjunto para observar la respuesta global del sistema usando Matlab®
- Diseño del compensador para controlar el nivel de hilo enrollado en el tambor del AHT

2.1.1. Planta

Este bloque consta de dos sub-bloques: el del motor y el del enrollador de ondulaciones. El motor es el que provee el movimiento al enrollador de ondulaciones y de su velocidad depende la longitud de hilo por unidad de tiempo que se enrolla sobre el tambor del AHT, por tal motivo el control PID propuesto manipula la frecuencia de salida del VFD para controlar el nivel del hilo enrollado.

El enrollador de ondulaciones es el sistema mecánico que enrolla el hilo sobre el cuerpo o tambor del AHT, sobre este están instalados dos sensores de efecto Hall analógicos, un sensor en el extremo izquierdo es quien mide el nivel del hilo y por lo cual es realimentación del sistema de control PID. Por otra parte, otro sensor en el extremo derecho es quien mediante la palpación (contacto) del hilo; determina el arranque y paro automático del motor cuando el telar inicia el tejido, además por la combinación de las señales de los dos sensores se determina cuándo se ha terminado el rollo del hilo de trama.

2.1.2. Variador de Frecuencia VFD

El VFD es el actuador en el sistema de control, y es el dispositivo electrónico sobre el cual se implementarán el control Lógico y el control PID gracias a sus funciones especiales de Control PID y PLC.

2.1.3. Control PID

Este bloque en la estructura del lazo de control es el que de manera automática controla el nivel del hilo enrollado, manipulando la frecuencia de salida del VFD.

2.1.4. Control lógico

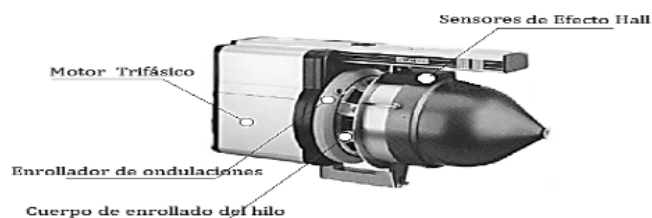
Este control, desde el punto de vista de la automatización, recibe las señales de los dos sensores de efecto Hall y las procesa para responder automáticamente a los eventos de arranque y parada del motor del AHT cuando el telar inicia o detiene el tejido de la tela, terminación de la bobina del hilo, y a la señal del interruptor encendido y apagado del AHT.

2.1.5. Bobina de hilo

Aunque no hace parte propiamente de la solución planteada, se ha agregado al diagrama de bloques para una adecuada interpretación del proceso de tejido.

En la Figura 5 se puede apreciar las partes activas del AHT marca ROJ de la Empresa Ciplas SA, al que se pretende desarrollar el sistema de control.

Figura 5: Partes activas del AHT de la Empresa CIPLAS SA [5]



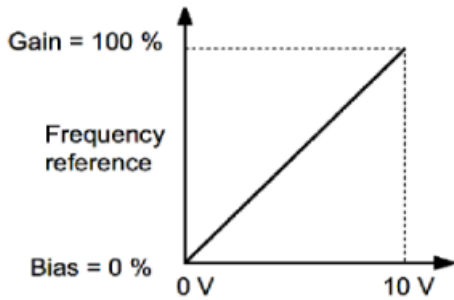
3. Desarrollo de alternativa de solución

3.1. Bloque del variador de frecuencia

La función del VFD es la de alimentar el motor con un voltaje trifásico generado por el inversor PWM. La frecuencia del voltaje trifásico se varía en un rango de 0 a 60 Hz para variar la velocidad del motor con lo que se logra controlara el hilo que se enrolla sobre el tambor del AHT. La variación de frecuencia se realiza a través una entrada analógica dispuesta en la tarjeta I/O del variador.

En la Figura 6 se observa la relación entre la entrada analógica y la frecuencia de salida. El parámetro Gain represente el valor de frecuencia máxima que habrá a la salida del variador de velocidad cuando la entrada sea de 1000VDC, y el parámetro Bias represente el valor en frecuencia mínima que tendrá el variador cuando su entrada analógica sea de 0 VDC.

Figura 6: Relación entrada-salida del variador [13]



La relación entre la frecuencia de salida y el voltaje de la entrada analógica es lineal; por lo tanto, con la pendiente de la recta se puede obtener la ecuación que representa el comportamiento del bloque del variador.

3.2. Bloque del motor

En este bloque se analiza la variable “velocidad angular del rotor” ya que de ella depende el flujo del hilo de enrollado en el tambor del AHT.

Para ello se usó el modelo matemático de la máquina asincrónica del paquete POWER SYSTEM de Matlab, esta herramienta usa los parámetros eléctricos del motor para reproducir su dinámica. Los parámetros de la máquina asincrónica se pueden obtener realizando las pruebas de: motor en Vacío, Prueba de Resistencia en DC, Rotor Bloqueado.

Los datos se registran en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros del motor

PARÁMETROS ELÉCTRICOS DEL MOTOR					
	Valores de placa	Bobinado Estatórico	Bobinado Rotórico	Estator y Rotor	Parámetros Físicos
Potencia(W)	746				
Frecuencia(Hz)	60				
Voltaje(Vrms)	90				
Resistencia (Ohm)		2.74	683		
Inductancia (H)		0.000989	0.005974	0.1048	
Inercia(Kgm ²)					0.0018
Fricción(Nms)					0.0137
Pares de Polos					2

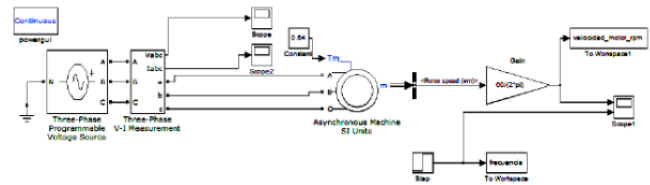
Fuente: elaboración propia.

En la Figura 7 se observa el diagrama de bloques en Simulink Power System con la implementación del modelo de la máquina asincrónica.

La respuesta a una señal escalón de 60 Hz, obtenida a partir del modelo de la máquina asincrónica, se puede

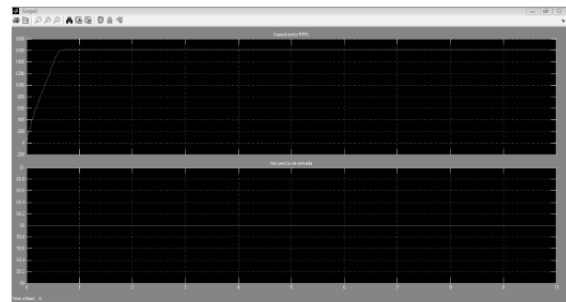
observar en la Figura 8, la cual muestra la velocidad alcanzada por el motor en rpm. La respuesta del modelo muestra que se alcanza una velocidad de 1620 rpm; aproximadamente en un tiempo cercano a los 0,6s.

Figura 7: Simulación de la máquina asincrónica



Fuente: elaboración propia.

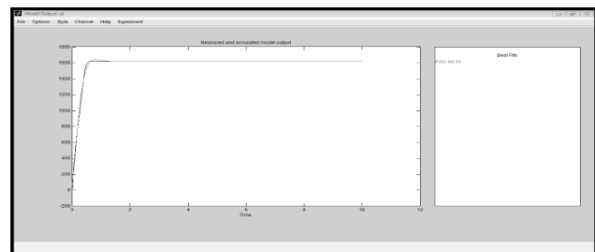
Figura 8: Respuesta del motor



Fuente: elaboración propia.

Finalmente, para obtener la función de transferencia del bloque del motor se usó la herramienta de identificación de Matlab®, Ident. La mejor estimación se alcanzó con un 94.35% de exactitud y representa un sistema puro de segundo orden. La comparación de la estimación versus el modelo teórico se observa en la Figura 9.

Figura 9: Identificación del motor



Fuente: elaboración propia.

El bloque del motor se describe mediante la siguiente función de transferencia (1), en la cual ingresa la frecuencia y a su salida se obtiene la velocidad del motor en RPM.

$$\frac{N(s)}{F(s)} = \frac{26,93}{0,0276922s^2 + 0,265344s + 1} \quad (1)$$

3.3. Bloque del enrollador de ondulaciones

El enrollador de ondulaciones esta acoplado mecánicamente al eje del motor y es el sistema mecánico que enrolla el hilo alrededor del tambor del AHT, por lo cual al bloque ingresa la variable de velocidad en rpm y a su salida se tiene un flujo de hilo en unidades de m/s pues, por cada revolución del ondulator, se enrolla alrededor del tambor una longitud de hilo l_h de la siguiente forma: $l_h = 2\pi R$, donde R es el radio del tambor del alimentador de trama.

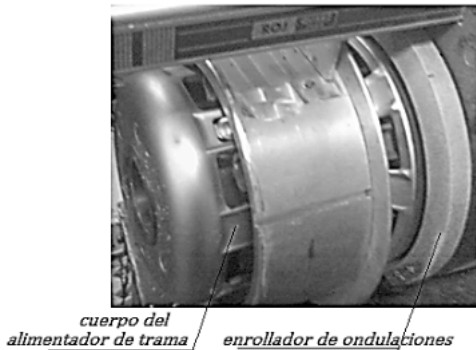
El flujo de entrada al tambor del alimentador es (2).

$$q_i = \frac{2\pi R}{60} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (2)$$

3.4. Bloque del cuerpo o tambor de enrollado

En esta sección se analiza el modelo que describe la dinámica del tambor de enrollado del AHT. La Figura 10 corresponde a la descripción física del tambor de enrollado del AHT.

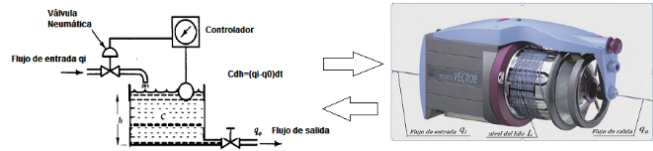
Figura 10: Cuerpo del alimentador de trama



Fuente: Ciplas S.A.

Para su modelamiento, se hace una analogía con un modelo muy conocido de la teoría de control, el de un tanque de agua al que se le desea hacer un control de nivel mediante la regulación del flujo entrante de agua a la vez que se vacía por una salida de agua en su parte inferior, como se muestra en la Figura 11.

Figura 11: Analogía entre el AHT y el control de nivel de un tanque [11]



En consecuencia, la capacidad de almacenamiento del hilo sobre el cuerpo del AHT es proporcional a la diferencia entre la diferencia de flujos de hilo de entrada y salida; la ecuación diferencial que modela el sistema del tambor (tanque) es entonces dada por (3):

$$q_i - q_o = \frac{dC}{dt} \quad (3)$$

Donde q_i y q_o representan el flujo entrante y el flujo de salida respectivamente del hilo de trama; C representa la capacidad de almacenamiento del hilo sobre el cuerpo del alimentador de trama. Análogamente, como en el tanque C depende de su área transversal, en el tambor del AHT, C depende de la separación entre las espiras del hilo enrollado, así como en (4):

$$C = KL \quad (4)$$

Donde K representa la separación entre las espiras del hilo; es decir, el avance que tiene el hilo sobre el tambor, a medida que se enrolla y se llena el AHT; este valor es constante en el tiempo ya que se pre-ajusta por medio una perilla dispuesta para tal fin. L representa el nivel de hilo almacenado. El flujo de salida q_o en el AHT no depende de la variable de estado L (como si sucede con el modelo del tanque lleno de agua, pues a más altura del nivel mayor flujo de salida), depende exclusivamente de la frecuencia con la que el telar dispara la lanzadera que transporta el hilo de trama y por lo tanto no se puede relacionar con la planta, de modo que la diferencia del flujo de entrada y el flujo de salida se puede expresar como un flujo de neto como en (5).

$$q_i - q_o = q_n \quad (5)$$

Por lo tanto, la ecuación diferencial que modela el tambor del AHT se describe mediante (6):

$$q_n = K \frac{dL}{dt} \quad (6)$$

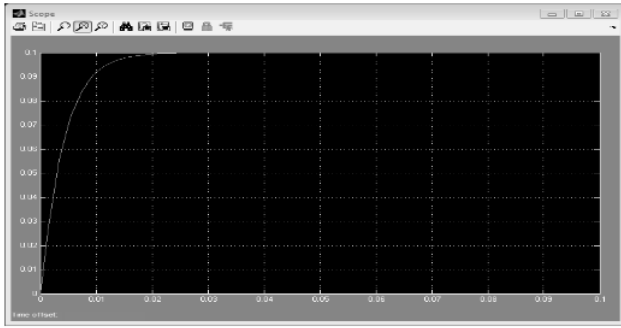
3.5. *Bloque del sensor*

El sensor que mide el nivel de hilo almacenado L , es un sensor de efecto Hall que viene con el equipo, tiene un tiempo de respuesta de 20ms y su ganancia es de 100 mV/mm, por lo que su función de transferencia, en la forma cero-polo-ganancia, está dada por (7):

$$S(s) = \frac{25000}{s + 250} \tag{7}$$

Al tener una respuesta 10 veces más rápida que la respuesta del motor, el sensor se puede colocar en lazo directo para facilitar el diseño del compensador PI. En la Figura 12 se observa la respuesta del sensor ante una señal escalón de 1mm:

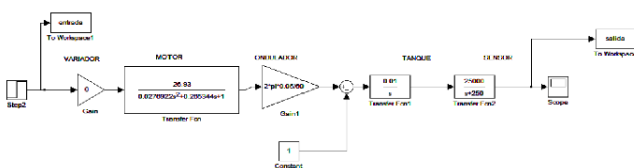
Figura 12: Respuesta del sensor



Fuente: elaboración propia.

De manera que el conjunto $G(s)$: variador, motor, enrollador de ondulaciones, tambor de enrollado y sensor, tiene el siguiente modelo en diagrama de bloques mostrado en la Figura 13. El flujo de salida del tambor (tanque) se ha conectado al sistema como un valor constante para hacer la simulación.

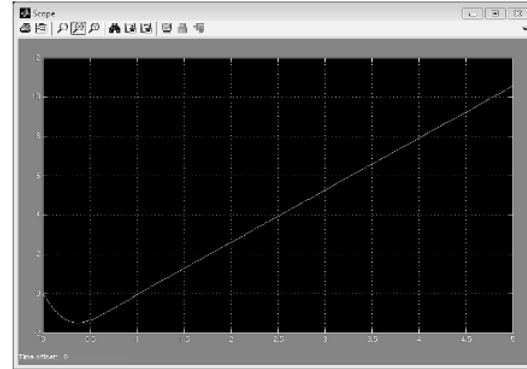
Figura 13: Diagrama de bloques final $G(s)$



Fuente: elaboración propia.

La respuesta de $G(s)$ ante una señal escalón se muestra en la Figura 14:

Figura 14: Respuesta de $G(s)$

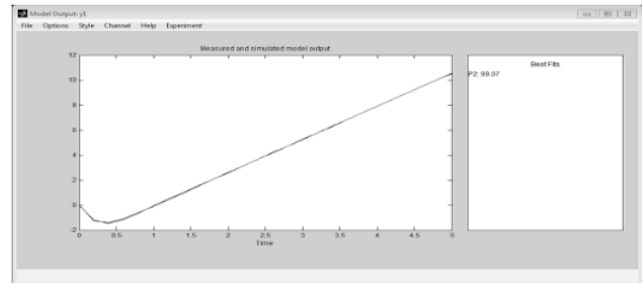


Fuente: elaboración propia.

3.6. *Diseño del compensador PI*

Para la realización del controlador se hizo un proceso de identificación del modelo de $G(s)$, con el ánimo de facilitar su diseño en la herramienta Sisotool de Matlab®. El mejor resultado usando ARX tiene un 99.07% de exactitud. En la Figura 15 aparece la comparación entre los dos sistemas.

Figura 15: Identificación de la planta



Fuente: elaboración propia.

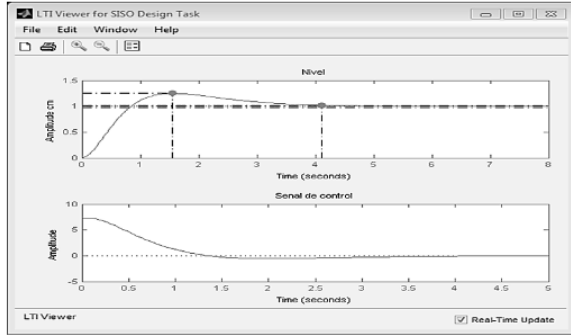
La función de transferencia $G(s)$, en tiempo continuo, del modelo estimado queda descrita por (8):

$$G(s) = \frac{23,629}{(1 + 86,72S)(1 + 0,1959S)} \tag{8}$$

El compensador se diseñó con la herramienta de Matlab® Sisotool, en la cual se ingresó la función de transferencia $G(s)$. Se establecieron como requerimientos de diseño: un sobreimpulso menor al 25%, y un tiempo de estabilización menor a cinco segundos; el criterio de selección de los requerimientos, se basa en la señal de control para que no se sature. La respuesta del sistema

con el compensador, ante una señal escalón unitario, se puede observar en la Figura 16.

Figura 16: Respuesta del compensador



Fuente: elaboración propia.

Se puede observar que el sistema responde en un tiempo aproximado de 4.1 segundos, y tiene un sobre-impulso de 24%. La función del compensador corresponde a un control PI, la acción derivativa no se incluyó porque en las pruebas realizadas ocasionaba una saturación extrema de la señal de control. Por lo tanto, el compensador $C(s)$ queda descrito como en (9):

$$C(s) = \frac{1,6S + 1,3}{S} \tag{9}$$

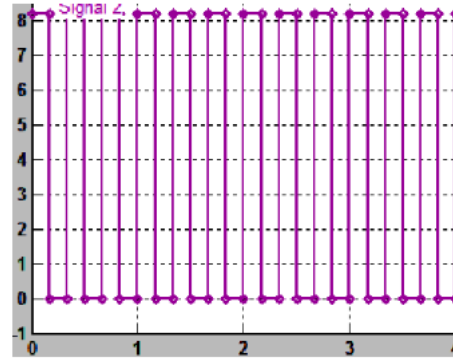
La frecuencia de viaje de la lanzadera tiene un comportamiento intermitente propio del funcionamiento del telar (oscilatorio), que se puede describir mediante una onda cuadrada positiva como se observa en la Figura 17. El telar requiere una longitud de hilo de 2,5 m equivalente al ancho de la tela cada 333,33 ms, por lo tanto, el flujo del hilo demandado por el telar está dado por (10).

$$f_k = \frac{2,5m}{0,3s} = 8,33 \tag{10}$$

La frecuencia de tejido 3 Hz, el tiempo efectivo durante el cual el telar demanda hilo de 50% de un ciclo y calculando el flujo con la integral de valor medio se tiene que $q_0 = 4,7m/s$.

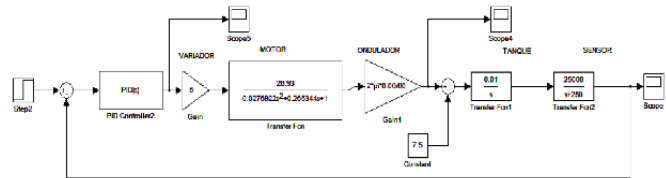
Este valor promedio de q_0 se introdujo en el modelo de bloques para comprobar la efectividad del controlador ante una referencia de 5cm de nivel, como se puede apreciar en la Figura 18, donde se implementó el control PI con constantes $k_p = 1,6$ y $k_i = 1,3$.

Figura 17: Comportamiento simulado del telar



Fuente: elaboración propia.

Figura 18: Control en lazo cerrado



Fuente: elaboración propia.

3.7. Diseño del control lógico

El control lógico, para ser operado de manera sencilla y segura, debe cumplir con los siguientes requerimientos:

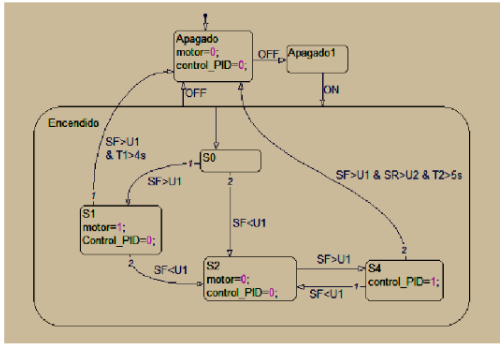
- Start Stop por medio de un interruptor de 2 posiciones.
- Al presionar el interruptor de Start, el AHT debe llenarse hasta que palpe el sensor de efecto hall instalado en el extremo derecho.
- Al terminarse la bobina de hilo el alimentador de trama debe detenerse.
- Cuando el telar inicie el proceso de tejido debe entrar a trabajar el control PI de nivel diseñado.

El control lógico se representa mediante una máquina de estados de Moore como se puede apreciar en la Figura 19.

4. Pruebas y validación del modelo

En primer lugar, se conecta un saturador en la salida del modelo con el fin de limitar el valor máximo de salida de $G(s)$ pues el tambor de enrollamiento del AHT no se llena infinitamente de hilo; por lo tanto, la primera prueba consiste en comparar la respuesta del modelo con la respuesta real del AHT, en condiciones iniciales iguales a cero, de nivel y flujo de salida; teniendo presente que el sensor de efecto Hall genera una salida máxima de 10 VDC. La respuesta del modelo en condiciones iniciales iguales a cero, de nivel y flujo de salida, se puede apreciar en la Figura 20.

Figura 19: Máquina de estados del control lógico



Fuente: elaboración propia.

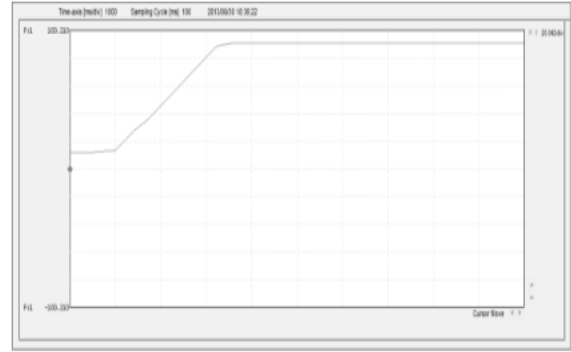
Figura 20: Respuesta del modelo del AHT



Fuente: elaboración propia.

Ahora la respuesta real del AHT, ante las mismas condiciones anteriores, se aprecia en la Figura 21. Se puede observar la similitud del comportamiento, así como el tiempo de respuesta hasta alcanzar el valor máximo de su salida de voltaje, el cual representa el nivel de hilo enrollado.

Figura 21: Respuesta real del AHT



Fuente: elaboración propia.

Al analizar el modelo del AHT obtenido mediante el diagrama de bloques, se encuentra que su polo dominante está dado por el integrador que corresponde al modelo individual del tambor de enrollamiento. Por lo tanto, para determinar la exactitud del modelo se tomaron tres parámetros:

- El tiempo de asentamiento t_c
- La ganancia del sistema $Gain$
- El sobreimpulso S_p

Tiempo de asentamiento: Corresponde al tiempo que tarda el sistema en entrar en la franja del 2% de su máxima valor de salida. Este tiempo se ha medido por medio de la función de osciloscopio integrada en el software del VFD.

Tiempo de repuesta $t_c = 2,24s$

De la misma manera se mide el valor máximo alcanzado por en el tiempo de respuesta, se debe tener en cuenta que el osciloscopio del software esta normalizado en porcentaje y se debe hacer una escalización dada por (11) para obtener el valor en las mimas unidades del modelo identificado.

$$Gain = \frac{4,1div}{5div} * \frac{100 \cdot 210\%}{100} * \frac{10 VDC}{0,85(Sensor\ gain)} = 9,66 VDC \quad (11)$$

El sistema no posee sobre impulso.

Los mismos parámetros medidos sobre el modelo en diagrama de bloques realizado en Matlab® mediante el proceso de identificación son los siguientes:

$$t_c = 2,27s \text{ y } Gain = 10VDC$$

Los datos recolectados se han registrado en la Tabla 2 donde se puede observar el error que posee cada uno con respecto a la respuesta física del AHT.

Tabla 2: Error de los parámetros del modelo versus sistema real del AHT

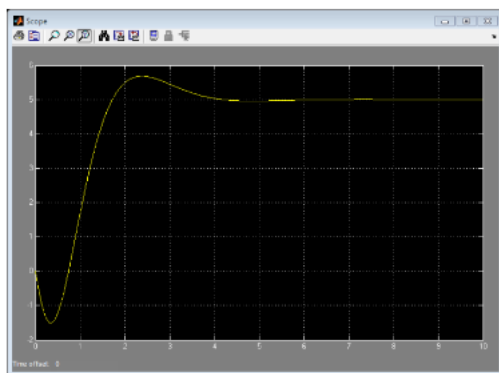
DATOS	SISTEMA REAL AHT	MODELO DEL AHT	ERROR e%
Tiempo de asentamiento t_c	2.24s	2.27s	1.34
Ganancia $Gain$	9.66 VDC	10VDC	3.51
Sobreimpulso S_p	0	0	0

Es bien conocido por la teoría de control que una pequeña variación de los parámetros de una planta en lazo abierto, son poco representativos cuando la planta posee un control en lazo cerrado con realimentación negativa. Como el modelo se utiliza para diseñar el compensador PI, tiene margen de error permisible para tal fin.

Al probarse el sistema de control con una referencia de 5cm de nivel este responde en 3.7 segundos aproximadamente con un sobreimpulso de 16% y se estabiliza en 5cm, sin error de estado estacionario.

En la Figura 22 se observa que entre cero y un segundos el nivel decrece a valores negativos, esto quiere decir que el AHT se alcanza a quedar sin hilo partiendo de condiciones iniciales iguales acero ante el tiro del telar.

Figura 22: Respuesta del sistema controlado

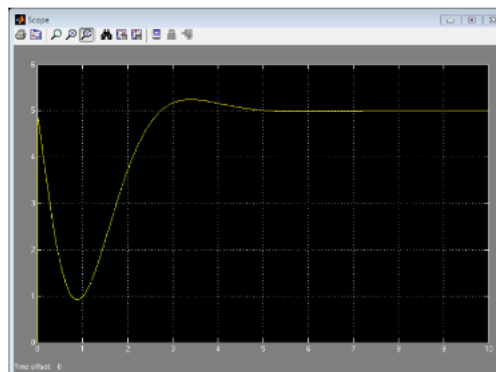


Fuente: elaboración propia.

Para solucionar este problema, se realizó un proceso de pre-llenado del AHT hasta 5cm de nivel; es decir, parte de la condición inicial de nivel igual a 5cm. En la Figura 23 se observa que el nivel ya no toma valores negativos si

no que desciende hasta un valor de 1cm y luego alcanza la referencia de 5cm.

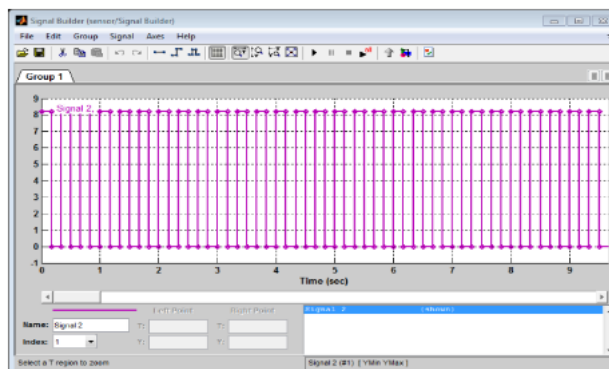
Figura 23: Respuesta con pre-llenado



Fuente: elaboración propia.

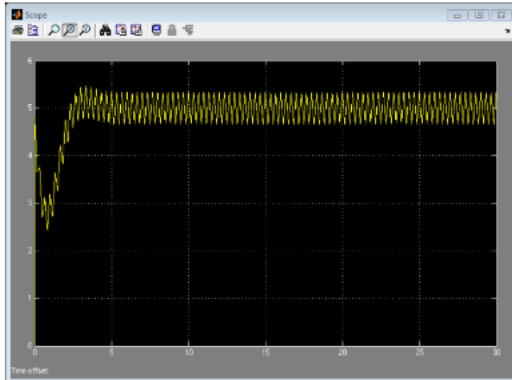
Finalmente, el compensador se probó con la señal que representaba, aproximadamente, la demanda de hilo -la cual fue construida con el bloque Signal Builder de Simulink®- como se muestra en la Figura 24.

Figura 24: Frecuencia de viaje del hilo de trama



Fuente: elaboración propia.

En la respuesta obtenida (Figura 25) se observa que el nivel oscila conforme varía la señal de la demanda del telar, pero el valor medio del nivel oscilante converge a 5cm, por lo cual el nivel alcanza la referencia y controla de manera efectiva el nivel del hilo almacenado en el AHT para que el telar pueda operar ininterrumpidamente.

Figura 25: Comportamiento del nivel del hilo

Fuente: elaboración propia.

5. Resultados

Al realizarse las pruebas de funcionamiento al AHT, luego de implementar el control híbrido en el variador de frecuencia, se comprobó la operación correcta durante el proceso de tejido.

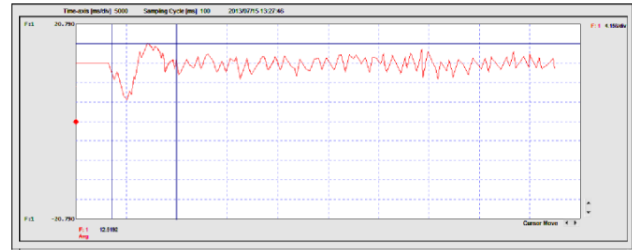
El alimentador de trama se puso a prueba y operó satisfactoriamente a las siguientes pruebas del control lógico:

- El alimentador de trama arranca y se detiene inmediatamente con el interruptor de dos posiciones.
- Al arrancar, el proceso de pre llenado se completa cuando se alcanza el umbral en el sensor de efecto Hall del extremo derecho.
- Cuando se termina el hilo de la bobina de trama el sistema se detiene y opera de nuevo pasando el interruptor a OFF y luego a ON.

5.1. En el control PI

El software de programación del VFD cuenta con una herramienta de osciloscopio integrada; este osciloscopio tiene un tiempo de muestreo de 100 ms, la magnitud de la escala del eje Y la representa como un porcentaje del valor real en la entrada analógica y el eje X corresponde al tiempo en valores reales.

Para probar el control PI se tomó, con el osciloscopio del variador de frecuencia, la señal del sensor de nivel y se analizó el sobre-impulso, el tiempo de estabilización y el valor medio del nivel. En la Figura 26 se muestra el comportamiento del nivel del hilo en el tiempo sobre el alimentador de trama.

Figura 26: Señal real del sensor del nivel del hilo

Fuente: elaboración propia.

Al medir los parámetros de rendimiento del sistema de control sobre la gráfica anterior, se obtuvieron los siguientes resultados aproximados: Sobreimpulso del 30%; Tiempo de estabilización 6.3 s.

Los valores obtenidos tienen un error del 20 % para el sobreimpulso y del 26 % del tiempo de estabilización, comparados con los establecidos en el apartado 3.6. Para el diseño del compensador, se puede observar de la señal de la Figura 22 que tiene un comportamiento semejante a la de la señal de la Figura 25. Es interesante resaltar que, aunque los resultados difieren de los esperados, no representan una desventaja para el control; por el contrario, gracias a este sobreimpulso, se garantiza que durante el tiro súbito del hilo de trama por la lanzadera del telar el AHT no se desocupa mientras se estabiliza el nivel del hilo.

6. Conclusiones y trabajos futuros

El rechazo a las perturbaciones de un sistema de control en lazo cerrado permite que así la señal del error en estado estacionario no sea la función constante igual a cero, el valor medio de dicha señal si puede converger a cero. La respuesta real del AHT, ante las mismas condiciones iniciales iguales a cero de nivel y flujo de salida, no diverge del modelo propuesto y simulado, pues la similitud del comportamiento, así como el tiempo de respuesta alcanza el valor máximo de su salida de voltaje que representa el nivel de hilo enrollado. El error en el contraste de Tiempo de asentamiento, Ganancia y Sobreimpulso, no sobrepasan el 3,5 %.

La evaluación de la tecnología es una instancia vital en la realización de cualquier proyecto, pues la evolución tecnológica permite que el uso de equipos provea soluciones compactas, eficaces y económicas al integrar varias funciones de control, que en épocas pasadas debían realizarse con la integración de varios dispositivos.

En perspectiva, se ha encontrado que en empresas como Hilat SAS, empresa textilera muy cercana a Ciplas SAS, buscan soluciones al proceso de fabricación de telas debido a la presencia y funcionamiento simultáneo de 8 Alimentadores de hilo de trama por telar. En tal sentido, la alternativa propuesta puede ser un punto de partida para múltiples controles centralizados para los mismos propósitos aquí expuestos.

7. Reconocimientos

A la empresa CIPLAS S.A. por facilitar y disponer todos los recursos para la implementación del Control de AHT desarrollado, así como la disponibilidad de su planta de producción para medir desperdicios y efectividad de la alternativa tecnológica durante periodos de tiempo laborales.

A los grupos de investigación Intergra y Scibas, adscritos al CIDC de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, por su asesoría práctica y teórica.

Referencias

- [1] C. Sabogal C y J.C. Granda, “Plan prospectivo estratégico de Microsoft para ser líderes de soluciones integrales en el sector textil colombiano al 2015” Tesis Esp. Universidad de la Sabana, Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas, Instituto de Postgrados, Especialización en Gerencia Estratégica, Chía, 2012.
- [2] Inexmoda, “Dirección de Competitividad e Internacionalización Observatorio Económico Nacional del Sector. Sector textil/confeción-diseño y moda en Colombia”. 2015, mayo, [En línea] Disponible en: <http://www.inexmoda.org.co>
- [3] Hilanderías Bogotá, “Historia del hilado”. 2015, mayo, [En línea] Disponible en: <http://www.hilanderiasbogota.com/>
- [4] T. Yoshida “Weft Yarn Feeder”. United States Patent, vol. 4, no. 369, pp. 818, jan, 25, 1983, [En línea] Disponible en: <http://www.google.com.tr/patents/US4369818>
- [5] ROJ, “Chrono-X2 instrucciones de manejo”. 2012, oct, [En línea] Disponible en: <http://www.roj.com>
- [6] From weft feeders with induction motors to advanced integral motor products with PM technology, 2015, mayo, [En línea] Disponible en: <http://www.prizz.fi/sites/default/files/tiedostot/linkki2ID427.pdf>
- [7] Transally, “Product Catalogues”. 2015, mayo, [En línea] Disponible en: <http://www.transally.com.cn>
- [8] Patentes para alimentadores de hilo de trama, 2015, mayo, [En línea] Disponible en: <http://www.google.com/patents/US8340805>
- [9] P. Ayala, R. Álvarez y X. Calderón “Reingeniería del sistema de control para una Máquina circular textil tejedora de punto, marca: Mayer, tipo: IHLG III F”. 2012, octubre, [En línea] Disponible en: <http://www.repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/3793>
- [10] A. Catarino, A. Rocha, J.L., Monteiro, & F. Soares, “Surveillance and Control of the Yarn Input Tension on Circular Weft Knitting. Machines: New Approaches” 2015, mayo, [En línea] Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=1490814>
- [11] K. Ogata “Ingeniería de Control Moderna”. México D.F.: Pearson editores, Tercera edición, pp. 330–407, 1998.
- [12] E. López Guillén. “Identificación de Sistemas. Aplicación al modelado de un motor de continua” 2012, octubre, [En línea] Disponible en: <http://www.depeca.uah.es/depeca/repositorio/asignaturas/32328/Tema6.pdf>
- [13] Yaskawa Electric Corporation©, Yaskawa AC Drive Technical Manual, 2007-2008.