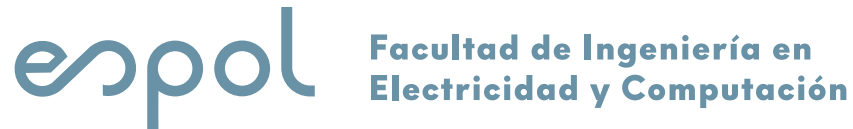




ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación



“ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE DOS CONTROLADORES DISCRETOS
UNO PID Y OTRO EN VARIABLES DE ESTADO PARA UN SISTEMA DE
SECADO DE ETIQUETAS EN UN EQUIPO FLEXOGRÁFICO”

TRABAJO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del Título de:

MAGÍSTER EN AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL INDUSTRIAL

Presentado por:

Wladimir Alberto Del Rosario Alvarado

Guayaquil – Ecuador

2020

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, a mi esposa, mis hijos y a mis padres por la ayuda que siempre me han brindado en los momentos duros y difíciles de mi vida ya que siempre han estado conmigo dándome su apoyo incondicional.

DEDICATORIA

Dedico la tesis a Dios y a mi familia.

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

PhD.

DECANO (S) FIEC

MG.Franklin Kuonqui

DIRECTOR

MSc.

VOCAL PRINCIPAL

DECLARACIÓN EXPRESA

La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación me corresponde exclusivamente; y doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual.

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

Wladimir Alberto Del Rosario Alvarado

RESUMEN

El presente trabajo consiste en el diseño de dos controladores discretos y comprobar cuál de ellos tienes un mejor desempeño en el secado de etiquetas de una maquina flexográfica.

En el primer capítulo se expone el problema a resolver, los antecedentes, todos los objetivos que se persiguen en el presente trabajo y la justificación del desarrollo.

En el segundo capítulo se presenta el fundamento teórico de los tipos y funcionamiento de los equipos flexográficos, así como de los tipos de sensores y actuadores disponibles, también se incluye los conceptos de identificación de sistemas y las bases teóricas de los controladores discreto.

El tercer capítulo presenta la metodología usada para identificar la planta, y diseñar el controlador PID, así como el controlador por reubicación de **polos**

En el capítulo cuatro se presentan los resultados gráficos y numéricos de los desempeños de los controladores previamente diseñados, así como la comparativa entre ambos para la correspondiente selección del que tenga el mejor desempeño.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimiento	II
Dedicatoria	III
Tribunal de Graduación	IV
Declaración Expresa	V
Resumen	VI
Índice General	VII
Tribunal de Graduación	X
Índice de figuras	X
Índice de tablas	XIII
1 Introducción	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Antecedentes	2
1.3 Objetivos	3
1.4 Justificación	4
2 Fundamentos Teóricos	5
2.1 Equipos Flexográficos	5

2.1.1	Flexografía	5
2.1.2	Proceso Flexográfico	6
2.1.3	Tipos de equipos flexográficos	8
2.2	Identificación de sistemas	13
2.2.1	Tipos de identificación de sistemas	14
2.2.2	Estructura del modelo	14
2.2.3	Métodos de identificación	15
2.2.4	Métodos de identificación No Paramétricos	16
2.2.5	Métodos de identificación Paramétricos	17
2.3	Sensores	19
2.3.1	Temperatura	21
2.3.2	Humedad	23
2.3.3	Velocidad	27
2.4	Actuadores	29
2.4.1	Neumáticos	29
2.4.2	Hidráulicos	30
2.4.3	Eléctricos	31
2.5	Elementos de calentamiento	31
2.5.1	Resistencias calefactoras	31
2.5.2	Lámparas de calor	31
2.5.3	Lámparas incandescentes	32
2.6	Variadores de Frecuencia	32
2.7	Motores AC	33
2.7.1	Motores asíncronos	33
2.7.2	Motores síncronos	34
2.8	Controladores discretos	34
2.8.1	PID	34

2.8.2	Reubicación de polos por variables de estado	36
3	Metodología	38
3.1	Identificación de los subsistemas del equipo flexográfico	38
3.1.1	Subsistema de calentamiento	39
3.1.2	Subsistema de desplazamiento	40
3.2	Diseño de controladores discretos	43
3.2.1	Controlador PID	43
3.2.2	Controlador de reubicación de polos en variables de estado	44
3.3	Simulación del desempeño de los controladores	47
3.3.1	Controlador PID	48
3.3.2	Controlador de reubicación de polos en variables de estado	49
4	Pruebas y análisis de resultados	50
4.1	Desempeño del controlador PID	50
4.2	Desempeño del controlador por reubicación de polos	55
4.3	Comparativa de los dos controladores	59
	Conclusiones y Recomendaciones	60
	Bibliografía	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Área de pintado y secado de etiquetas	2
Figura 2.1	Proceso de impresión flexográfico	6
Figura 2.2	Impresora flexográfica tipo torre, Modelo AC-480-6B [3] .	9
Figura 2.3	Impresora flexográfica tipo línea, modelo HRY- 480 . . .	10
Figura 2.4	Partes de una impresora flexográfica con tambor central [5]	12
Figura 2.5	Impresora flexográfica tipo tambor central, modelo UNIFLEX UFL-6800	13
Figura 2.6	Representación de un sistema real con ruido	17
Figura 2.7	Representación general de un sistema con ruido	18
Figura 2.8	Representación del funcionamiento de un sensor de humedad mecánico	24
Figura 2.9	Representación del funcionamiento de un sensor de humedad por conductividad	25
Figura 2.10	Sensor de humedad superficial infrarrojo MCT460-T . .	26
Figura 2.11	Diagrama interno de un sensor de velocidad RVDT . . .	28
Figura 2.12	Diagrama general de un variador de frecuencia	32
Figura 2.13	Voltaje de salida del variador con PWM y salida de corriente promedio	33
Figura 2.14	Esquema de un controlador PID discreto promedio . . .	35
Figura 2.15	Diagrama de bloques a lazo cerrado	37

Figura 3.1	Cámara de secado marcado en rojo	39
Figura 3.2	Lámpara halógena de 500W	39
Figura 3.3	Gráfica de humedad VS velocidad	41
Figura 3.4	Comportamiento de la humedad en el tiempo	42
Figura 3.5	Comparativa planta real y planta identificada	43
Figura 3.6	Representación de variables de estado	44
Figura 3.7	Representación de variables de estado con observador .	45
Figura 3.8	Lazo de Control por Observador de Estados	47
Figura 3.9	Diagrama de Bloques con el Controlador PID	48
Figura 3.10	Respuesta del Controlador PID Implementado	48
Figura 3.11	Diagrama de Bloques con el Controlador por Variables de Estado	49
Figura 3.12	Respuesta del Controlador de Variables de Estado Implementado	49
Figura 4.1	Respuesta de humedad y acción de control para 4 colores	51
Figura 4.2	Respuesta de humedad y acción de control para 3 colores	52
Figura 4.3	Respuesta de humedad y acción de control para 2 colores	53
Figura 4.4	Respuesta de humedad y acción de control para 1 color	54
Figura 4.5	Respuesta de humedad y acción de control para 4 colores	55
Figura 4.6	Respuesta de humedad y acción de control para 3 colores	56

Figura 4.7	Respuesta de humedad y acción de control para 2 colores	57
Figura 4.8	Respuesta de humedad y acción de control para 1 color	58
Figura 4.9	Comparativa de ambos controladores para una etiqueta de 4 colores	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1	Tabla de valores promedios de tiempo de recorrido hasta cámara de secado	40
Tabla 3.2	Tabla de valores promedios de velocidad para cada color	41

Capítulo 1

1. Introducción

1.1. Descripción del problema

En el proceso de producción de las etiquetas cuando se necesita hacer diseños a color, para lo cual se utilizan tintas en base agua y algunos materiales como polipropileno, termo transferencia o térmico. En el momento de la impresión de las etiquetas no llegan a secarse entre las estaciones de cada de color; por consiguiente, las etiquetas llegan húmedas a la estación de rebobinado. En consecuencia, se necesita bajar la velocidad para mejorar su secado lo que genera tiempos muertos en los procesos productivos provocando incrementos en los costos de producción y reducción de la productividad.

Además, al no disponer de un sistema control de secado la calidad del producto cambia significativamente entre los lotes de producción,

generando en muchos casos desperdicio de producción por no alcanzar en todos los lotes la calidad deseada.

Por último, los tiempos muertos en el proceso de producción unido a los desperdicios generados por la falta de uniformidad en la calidad del producto genera que se incremente el consumo de energía promedio por cada etiqueta impresa.



Figura 1.1: Área de pintado y secado de etiquetas

1.2. Antecedentes

Existen variables que se pueden controlar de forma sencilla durante el proceso, pero hay otras que no se pueden controlar debido a la velocidad de operación del equipo, troquelado (100mts/min) o impresión a full color (50mts/min), y que muchas veces son imposible de verificar en línea, por lo que obligatoriamente se debe detener la máquina cuando ya se ha impreso al menos 200mts para verificar con una lupa la calidad de impresión, y si se encuentran problemas

de impresión esto representa tiempo y dinero perdido porque implica: tiempo de parada, para realizar cambios en la máquina que corrijan los defectos y material perdido.

Estas pérdidas aparecerán por cada vez que se repita el proceso hasta lograr que la impresión sea la adecuada (sin defectos), por lo que se quiere analizar el problema más frecuente para enfocarse de forma más directa en un correcto plan de acción y así evitar pérdidas de material por defecto durante el primer muestreo.

1.3. Objetivos

Diseñar un sistema de control de secado de etiquetas para un equipo flexográfico que reduzca los costos de producción mediante la reducción de los tiempos de producción y la homogeneización de la calidad del producto.

Objetivos Específicos

- Modelar los subsistemas de calentamiento y desplazamiento del equipo flexográfico para el diseño de los controladores.
- Diseñar los controladores discretos PID y por reubicación de polos en variables de estado para reducir los tiempos de producción.
- Simular el comportamiento de los controladores para la determinación del controlador con mejor desempeño.

1.4. Justificación

El diseño de un sistema de control de secado permitirá reducir los tiempos muertos en la producción en aproximadamente un 30% generando un gran ahorro económico al reducir las horas de trabajo del personal de producción.

Además, al contar con un sistema de control de secado, esta etapa del proceso no dependerá de la habilidad del operario para seleccionar la velocidad adecuada de funcionamiento. En consecuencia, la calidad del producto será más ~~informe~~ y se reducirá la cantidad de desperdicios generada.

Finalmente, la reducción de horas de trabajo y de desperdicios dará como resultado la reducción del consumo de energía promedio por etiqueta impresa. volviendo el proceso más amigable con el medio ambiente.

Capítulo 2

2. Fundamentos Teóricos

2.1. Equipos Flexográficos

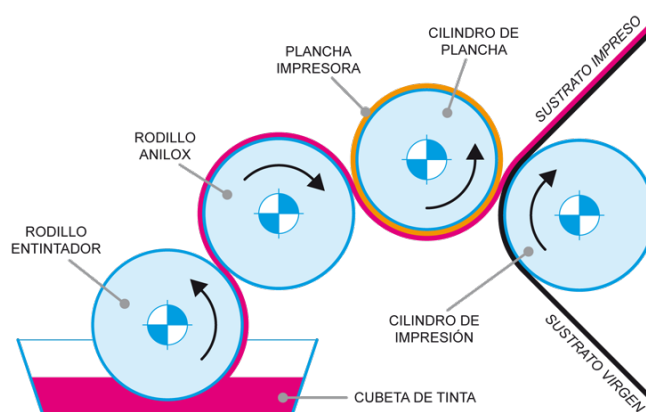
2.1.1. Flexografía

Es una técnica de grabado de alta velocidad comparado con la litografía. Su principio básico se ~~basa~~ en el uso de placas flexibles con relieves, donde las zonas que están en relieve serán las impresas con respecto a las bajas que son las no impresas [1]. La placa flexible es también conocida como cliché y son hechas a base de fotopolímero, el cliché se fija a un tambor o cilindro, luego recibe la tinta por el anilox el cual es un cilindro que permite dosificar la tinta de forma uniforme gracias a las ranuras que posee en su superficie. Posterior a ello el cliché entra en contacto con el sustrato o material donde será transferida en forma de imagen que se desea

producir [1]. Este tipo de impresión se caracteriza por realizarse a altas velocidades, lo que le permite un alto volumen de impresiones a bajo precio. Por lo cual es necesario el uso de tintas líquidas de secado rápido, pero en el caso de usar un sustrato que no es de rápida absorción es necesario el uso de secadores ubicados en el interior de la impresora [1].

2.1.2. Proceso Flexográfico

El proceso flexográfico se divide en cuatro partes:



Ejemplo de proceso de impresión en **Flexografía**

Figura 2.1: Proceso de impresión flexográfico

Rodillo de la fuente o tinta

Es un rodillo metálico recubierto de un tipo caucho o material sintético, diseñado para rotar en un recipiente que contiene tinta especial. Es el encargado de transportar la tinta hasta el rodillo dosificador o anilox. Generalmente este rodillo gira a menor

velocidad que el rodillo anilox, con la finalidad de que el proceso de limpieza con el rodillo anilox sea más fácil [2].

Rodillo dosificador o ANILOX

Es un rodillo metálico que en su superficie tiene grabado finas celdas que van desde 80 a 500 líneas/pulgada. También podemos encontrar rodillos anilox con superficie recubierta de cerámica que puede tener o no la estructura grabada. El propósito del rodillo anilox es proporcionar una película de tinta a la plancha impresora que se encuentra encima. Esto se logra gracias a la ubicación del rodillo entintador y el rodillo anilox, los cuales están en contacto a cierta presión de tal forma que solo habrá cabida para la tinta en las celdas del rodillo anilox, la baja velocidad del rodillo entintador ayuda a que la tinta se escurra y no exista exceso [2].

Rodillo de plancha

Es un rodillo metálico que se encuentra ubicado entre el rodillo anilox y el rodillo de impresión. El sustrato entra en contacto con este y transfiere la imagen. El diámetro del rodillo de plancha es menor al de los demás y ser del diámetro del piñón de mando, esto le permite acomodar la plancha de impresión y la cinta de doble faz. El rodillo anilox entrega una película de tinta a las partes de alto relieve de la plancha de impresión que a su vez transfiere la imagen a la superficie del sustrato [2].

Cilindro de impresión

Es un cilindro metálico usado para transportar el sustrato y ponerlo en contacto con la plancha de impresión. Es de suma importancia que la velocidad de los rodillos de impresión, plancha y anilox tengan la misma velocidad. Para obtener una buena calidad de impresión es necesario que el diámetro de los rodillos sea exacto, el paralelismo debe ser perfecto y no debe existir esfuerzo en los piñones y rodamientos a lo largo de la línea de producción [3].

2.1.3. Tipos de equipos flexográficos

Los diferentes tipos de equipos flexográficos vienen dados por arquitectura, es decir en la disposición que tienen ubicadas las unidades de impresión.

TORRE

Este tipo de impresora se caracteriza por la ubicación de sus estaciones de color, se encuentran dispuestas una encima de otra ya sea de uno o ambos lados de la máquina con respecto a la estructura principal. Su fabricación viene desde una hasta ocho estaciones de color, siendo las más comunes las impresoras de seis estaciones de color.

Ventajas

- Permite la impresión de ambos lados del sustrato siempre y cuando exista una buena capacidad de secado para lograr que la tinta se seque completamente antes de imprimirse el reverso

de la cinta.

- Fácil acceso a sus estaciones de color, lo cual permite realizar cambios de tinta y mantenimiento.
- Permite altos volúmenes de impresión.

Desventajas

- Presenta limitaciones al imprimir en sustratos muy delgados o flexibles

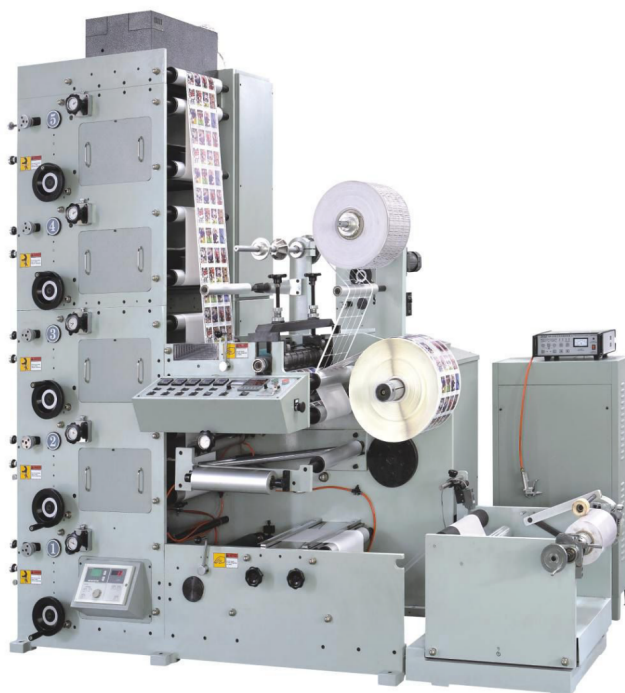


Figura 2.2: Impresora flexográfica tipo torre, Modelo AC-480-6B [3]

LINEA

Este tipo de impresora se caracteriza por tener sus estaciones de color ubicadas de forma lineal dispuestas horizontalmente, cada una

de sus estaciones de color son unidades complejas e impulsadas por mismo eje de transmisión [4].

Ventajas

- Impresiones de alta calidad y un alto nivel de flexibilidad a la hora de imprimir un tipo de etiqueta.
- Imprimen en casi todo tipo de sustrato como empaques flexibles, películas sin soporte, mangas y envolturas.
- Capacidad de impresión de etiquetas en gran cantidad en un solo paso.
- Bajo costo operativo.
- Sistemas de secado de alta capacidad con velocidad de hasta 12.000ppm.
- Reducción de desperdicios y tiempos de preparación cortos.

Desventajas

- Posee una mecánica compleja.
- Necesita de un especialista en caso de un desperfecto mecánico.

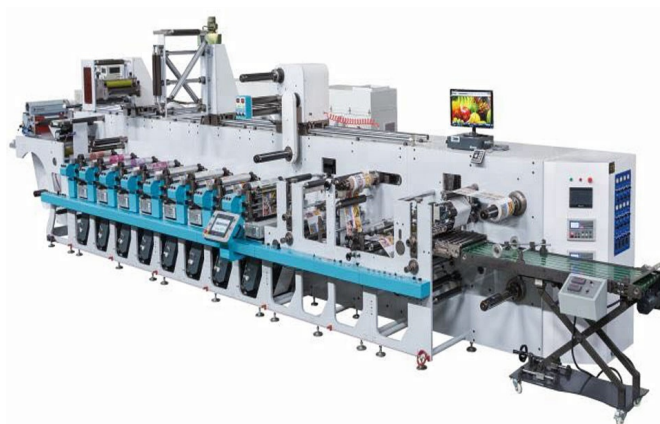


Figura 2.3: Impresora flexográfica tipo línea, modelo HRY- 480

TAMBOR CENTRAL

Este tipo de impresora se caracteriza por tener sus estaciones de color ubicadas alrededor de un cilindro de impresión en la estructura principal de la máquina. En este caso el sustrato o cinta se encuentra soportada por el cilindro impresor, ésta se ajusta al cilindro a medida que avanza por cada estación de color. Su fabricación viene desde cuatro hasta ocho estaciones de colores, aunque las más comunes son las de seis estaciones [5].

Ventajas

- Alta velocidad de impresión debido a su capacidad de imprimir varios colores a la vez.
- Habilidad para mantener un excelente registro.
- Menor distancia entre estaciones de color gracias a los sistemas de secado actuales.
- Permite la impresión multicolor.
- Presenta diversos diámetros de cilindros de impresión.

Desventajas

- El mantenimiento y cuidado debe ser riguroso, ya que cualquier tipo de golpe, mancha de tinta, polvo o raya se verían reflejadas en la impresión final.

Elementos de una impresora flexográfica tipo tambor

1. Des embobinador, lugar para ubicar la bobina de trabajo.

2. Alineadores de banda, ayudan a que la cinta o sustrato no se mueva y la impresión salga centrada.
3. Rodillo pisón, ayuda a mantener adherido el sustrato al tambor central.
4. Tambor central, cilindro principal en donde se ubican las estaciones de color.
5. Estaciones de color, sistema encargado de proporcionar la tinta.
6. Sistema de secado entre estaciones de color, proporcionan calor para acelerar el secado y recibir un color seguido de otro, evitando los problemas de trapping.
7. Túnel de secado, ayuda a la eliminación de solventes y secado completo.
8. Calandra de refrigeración, ayuda a reducir la temperatura de la cinta o sustrato y evitar que se deforme o pegue al momento de embobinarlo.

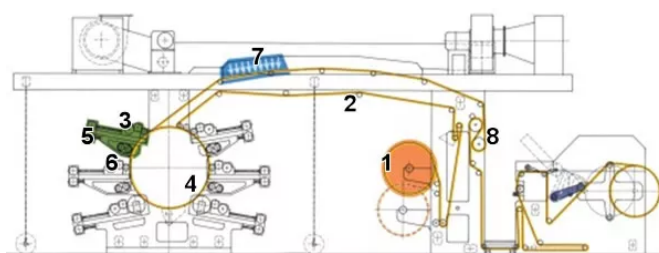


Figura 2.4: Partes de una impresora flexográfica con tambor central [5]

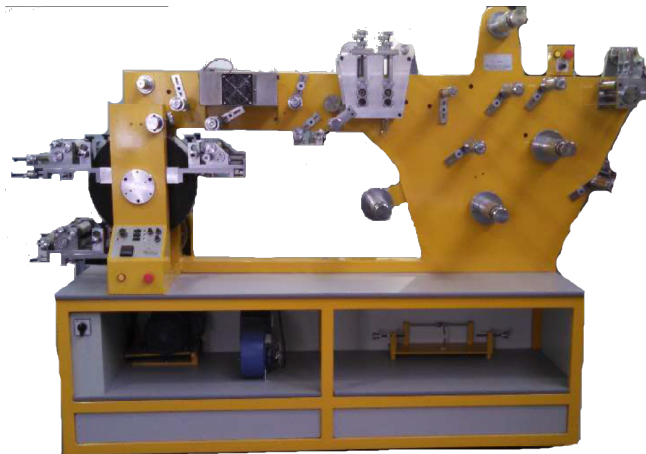


Figura 2.5: Impresora flexográfica tipo tambor central, modelo UNIFLEX UFL-6800

2.2. Identificación de sistemas

La identificación de sistemas hace referencia a todos los métodos y técnicas usados para diseñar y construir un modelo matemático de un sistema dinámico en estudio. La forma convencional es usando modelos matemáticos que se enfocan en el uso de las leyes de la física tales como leyes de Newton, leyes de Kirchoff o leyes de Maxwell, al ser analizados con estas herramientas el desarrollo de modelos desde este enfoque suele ser complejo, en ocasiones imposible de realizar en corto tiempo [6]. Debido a estos antecedentes surge la identificación de sistemas como una alternativa a los demás métodos. La identificación de sistemas consiste en tomar mediciones a la entrada y salida del sistema dinámico, luego se trata de hallar una relación matemática que permita describir el proceso. Incluso es posible realizar un estudio sin conocer a detalle la mecánica del sistema y en ocasiones no es necesario conocer de la mecánica interna.

2.2.1. Tipos de identificación de sistemas

Identificación de caja gris.- Para este tipo de identificación no es necesario conocer a detalle de la mecánica interna del sistema, se basa en tener una idea general de su funcionamiento, a eso se le conoce como estructura del sistema. Una vez que se tiene esa idea a priori del sistema es necesario enfocarse en aquello que no se conoce del sistema, lo desconocido se conoce como parámetros. El trabajo es hallar el valor apropiado de dichas variables de acuerdo con los datos de entrada y salida tomados.

Identificación de caja negra.- En este enfoque no se tiene idea del funcionamiento del sistema, lo que importa es hacer un “mapeo” de los datos ~~tomado~~ a la salida y entrada del sistema, es decir, analizar los datos recogidos para tener una idea de cómo es el funcionamiento del sistema. Esto permite al ingeniero montar un mapa de flujo operacional para tener una visión más clara. El objetivo final es expresar una relación entre la entrada y salida que puede ser realizada con cualquier método o técnica, ya sea matemática o alguna de otra índole que permita al ingeniero llegar al objetivo deseado.

2.2.2. Estructura del modelo

La estructura del modelo es el conjunto de características que otorgan al modelo una identidad genérica. Un ejemplo práctico es, si lo que se está haciendo es un modelado de una función de

transferencia parte de ello es conocer el número de polos y ceros de dicha función. En este caso aquello que tiene que ser encontrado son los coeficientes de la función, tanto del numerador como del denominador, es decir los parámetros del sistema dinámico [7].

2.2.3. Métodos de identificación

Uno de los métodos usados para la identificación de sistemas es el método de análisis de frecuencia que consiste en usar señales sinusoidales a diferentes frecuencias a la entrada del sistema para luego obtener el valor de ganancia y desfase a la salida, estos resultados se verán reflejados en un diagrama de Bode. Esto permite al usuario encontrar una función que se ajusta al diagrama de Bode y por lo tanto al sistema. De igual forma se tiene el método de análisis transitorio, consiste en la obtención de parámetros en base a la respuesta al escalón que mediante fórmulas predeterminadas se puede hallar las constantes de tiempo dependiendo del orden del sistema [7].

Sin embargo, este tipo de métodos son determinísticos, es decir dependen de la precisión con la que se tomaron los datos y no toman en cuenta otro tipo de aspectos como el ruido. En la actualidad se busca el uso de métodos estocásticos, ya que estos toman en consideración aspectos del entorno y son ideales para aplicaciones en la ingeniería.

2.2.4. Métodos de identificación No Paramétricos

Este tipo de método se caracteriza por entregar como resultado, funciones o curvas y no parámetros como su nombre lo indica. Usados para hacer un análisis preliminar y tener una idea general, para luego aplicar un método paramétrico, pero existen ocasiones en donde se usan para modelar sistemas complejos en donde no es fácil encontrar una estructura que sea acorde al proceso. Dentro de los métodos no paramétricos tenemos el análisis espectral y análisis de correlación [7].

Análisis correlación.— Se usa para determinar o aproximar la respuesta al impulso $h(t)$ o la respuesta al escalón $s(t)$ en el dominio del tiempo a partir de resultados obtenidos a la entrada/salida. Por ejemplo, si el sistema tiene características que se asemejan al ruido blanco, entonces se puede usar como entrada una PRBS y es correlacionada con una PBRS desplazada en el tiempo puede demostrarse que el resultado puede ser una estimación muy cercana a la respuesta al impulso [7].

Análisis espectral.— Se usa para determinar una respuesta en frecuencia a diferencia del análisis de correlación que trabaja en el dominio del tiempo. Determina una respuesta en frecuencia para diferentes valores de esta, que van a depender de la entrada/salida del sistema. Obedece a la ecuación que dice que la razón espectral está dada por la densidad espectral de potencia entre la entrada/salida y la densidad espectral de potencia de la salida.

$$H(\omega) = \frac{\phi_{yu}(\omega)}{\phi_u(\omega)} \quad (2.1)$$

2.2.5. Métodos de identificación Paramétricos

A diferencia de los métodos no paramétricos, éstos tienen como objetivo la obtención de parámetros para la estructura de un sistema elegida previamente. Existen dos métodos muy importantes que se asemejan a la identificación lineal como: EL método de subespacio y el método de error de predicción [8].

Método de predicción de error.– El Prediction Error Method o PEM por sus siglas en ingles es la unión de varios métodos particulares como: OE, ARX, BJ, ARMAX y demás[8].

Un sistema real con ruido puede ser representado de la siguiente manera como en la Figura (2.6).

$$y(t) = G_0(q^{-1})u(t) + v_0(t) \quad (2.2)$$

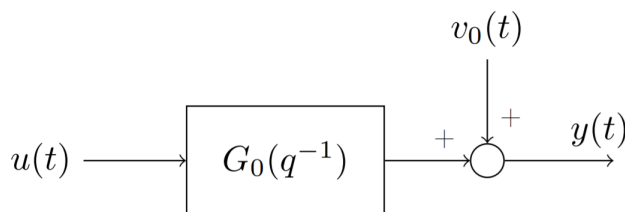


Figura 2.6: Representación de un sistema real con ruido

En donde $u(t)$ es la entrada, $y(t)$ la salida, $G_0(q^{-1})$ la función de transferencia (real), q^{-1} el operador lineal de retardo y $v_0(t)$

representa el ruido o cualquier perturbación a la salida. El método PEM propone la siguiente estructura para modelar un sistema con ruido.

$$y(t) = G(q^{-1}, \theta) u(t) + H(q^{-1}, \theta) e(t) \quad (2.3)$$

En donde θ es un vector que representa parámetros desconocidos, $H(q^{-1}, \theta)$ una función de transferencia, $e(t)$ ruido blanco, en este caso el ruido es una secuencia aleatoria con baja autocorrelación y su media es casi cero.

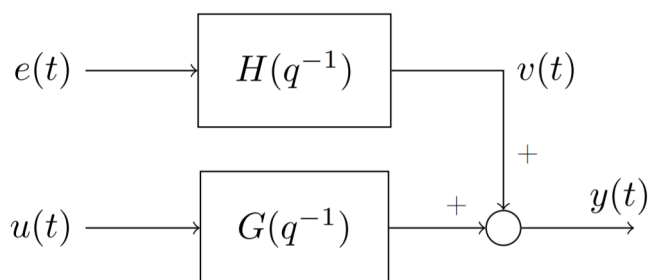


Figura 2.7: Representación general de un sistema con ruido

El PEM tiene más eficacia cuando se analiza estructuras complejas como BJ, ARMAX en donde el ruido es modelado de forma sofisticada y se visualiza que los residuos están relacionados a la salida e inclusive pueden tener distintas varianzas.

Método de subespacio.— Este método trabaja sobre la estructura del modelo, es decir se manejan las variables de estado a partir de la estructura. Los parámetros obtenidos son considerados matrices y se basa en que los subespacios generados por las matrices construidas a partir de los datos de entrada/salida contienen información del modelo subyacente. Una de las ventajas sino

siendo las más importante es que permite estimar los parámetros y a su vez el orden del sistema. Esto marca la diferencia a la hora de elegir el enfoque al que esta direccionado el sistema, es decir en el PEM se puede escoger el orden del sistema teniendo una idea general del sistema lo que se conoce como enfoque de caja gris o probar sistemas con un orden diferente hasta encontrar el adecuado o lo que se conoce como enfoque de caja negra.

2.3. Sensores

Es un dispositivo capaz de detectar estímulos externos y dar una respuesta en consecuencia. Permite recolectar información del medio en donde se encuentra ubicado. Es capaz de medir magnitudes físicas para luego convertirlas en una señal eléctrica capaz de ser procesada por un microcontrolador y accionar un tipo de actuador. Este proceso se puede describir en tres sencillos pasos [9]:

1. Al medir el fenómeno físico el sensor emite una señal eléctrica que depende de la variable física medida.
2. La señal eléctrica pasa por un proceso de acondicionamiento y es traducida en voltaje.
3. La señal de voltaje es amplificada y pasa con un convertidor analógico/digital y pasa a ser una señal de voltaje discreta.

Parámetros estáticos

Existen parámetros que definen como se comporta un sensor en tiempo real [9].

- Rango, se refiere al valor máximo y mínimo que el sensor soporta en su entrada y es capaz de entregar a su salida.
- Exactitud, cual es la máxima desviación de lectura con respecto a su señal de entrada, es decir el máximo error esperado entre la señal medida y la ideal.
- Repetitividad, hacer lecturas con una precisión especificada.
- Reproducibilidad, el mismo proceso por repetitividad, pero se efectúa cuando se hacen medidas distintas en diferentes condiciones.
- Resolución, la medida más pequeña que es capaz de detectar el sensor.
- Error, indica la diferencia entre el valor medido y el real.
- No linealidades, si la respuesta del sensor es lineal las no linealidades típicas son: histéresis, zona de corte y saturación.
- Sensibilidad, la capacidad de reaccionar al presentarse cambios en la entrada.
- Excitación, nivel de tensión y corrientes necesarios para operar.
- Estabilidad, capacidad del sensor de mostrar una misma salida frente a un rango en donde la entrada es constante.

Clasificación según la energía

- Activos, emana energía luego de realizar el procesamiento de la señal. En esta categoría se encuentran los cristales piezoeléctricos, termocuplas, etc.
- Pasivos, reciben energía para poder realizar el procesamiento de la señal. En esta categoría están lo fotodiodos, termistores, etc.

Clasificación según su principio de funcionamiento

- Digitales
- Primarios
- Reactancia variable y electromagnética
- Resistivos
- Generadores

2.3.1. Temperatura

Son dispositivos capaces de medir cambios de temperatura y transformarlo en señales eléctricas procesados por un equipo eléctrico o microprocesador. Existen tres tipos de sensores de temperatura: RTD, termopares y termistores [10]. Un sensor de temperatura está conformado por el elemento sensor, la cubierta que además está llena de un material sensible a la temperatura que le permite transmitir dicho cambio al elemento sensor y el cable que conecta al equipo electrónico. Termopar Son dos alambres fabricados de metales diferentes y unidos en un extremo, cuando

la junta percibe un cambio de temperatura se genera una fuerza electromotriz (FEM) entre los extremos de los alambres, a medida que la temperatura aumenta la FEM también. Cabe recalcar que el aumento de la fuerza electromotriz no necesariamente es lineal [10].

Tipos de sensores de temperatura

Resistencia (RTD)

Son sensores metálicos, su principio se basa en el cambio de resistencia eléctrica al cambiar la temperatura del material. Los hay de dos tipos, los termistores y RTD. Los termistores se basan en el cambio de resistencia del semiconductor de cerámica y los RTD en el cambio de resistencia de un metal. En este tipo de sensor, al aumentar la temperatura la resistencia baja en forma no lineal.

Bimetálicos

Este tipo de sensor aprovecha la dilatación térmica, de unen dos tiras de metal y al calentarse un extremo se dilatará más que el otro y la lectura se ve reflejada en una articulación mecánica a un indicador como un apuntador. No son tan sensibles la temperatura como los RTD y no necesitan de una fuente de alimentación.

Por dilatación de fluidos

Esto dispositivo tienen dos grandes clasificaciones: los de mercurio y los líquido orgánico. También existen con gas en lugar de usar líquidos, el mercurio es considerado un elemento que pone en riesgo el ambiente por eso tiene regulaciones al ser transportado. Los sensores por dilatación de fluidos no necesitan de energía eléctrica y no se puede tomar mediciones instantáneas o datos que puedan ser registrados.

Por cambio de estado

Los sensores de cambio de estado como los de cristales líquidos cambian de estado al alcanzar cierta temperatura. Son poco precisos ya que el tiempo de respuesta dura varios minutos y no responden a cambios de temperatura transitorios, además el cambio de temperatura es irreversible. Es comúnmente usado para hacer medición de temperatura de equipos industriales que no han superado cierto nivel de temperatura.

2.3.2. Humedad

Un sensor de humedad se encarga de medir el nivel de líquido o humedad relativa presente en un área determinada, además pueden ser usados para interiores y exteriores. Están disponibles en analógicos y digitales.

El sensor analógico mide la humedad relativa usando un condensador, que internamente este hecho de una película de vidrio o ceramida y el material aislante que es el que absorbe el agua es de polímero. Internamente material aislante toma y libera el agua haciendo que cambie el nivel de carga en el condensador a nivel eléctrico.

El sensor digital recepta los datos mediante microsensors que calibran la humedad relativa de la zona en donde se encuentra ubicado, estos datos son convertidos mediante un proceso de conversión analógico digital realizado por un microchip interno.

Tipos de sensores de humedad

Mecánicos.- Este tipo de sensor aprovecha el cambio de dimensiones que tienen ciertos materiales al ser expuestos a la humedad como las fibras orgánicas y sintéticas. Al aumentar la humedad relativa también aumenta el tamaño de las fibras, esta deformación es amplificada y graduada mediante palancas mecánicas o circuitos electrónicos de acuerdo con la proporcionalidad de humedad relativa.

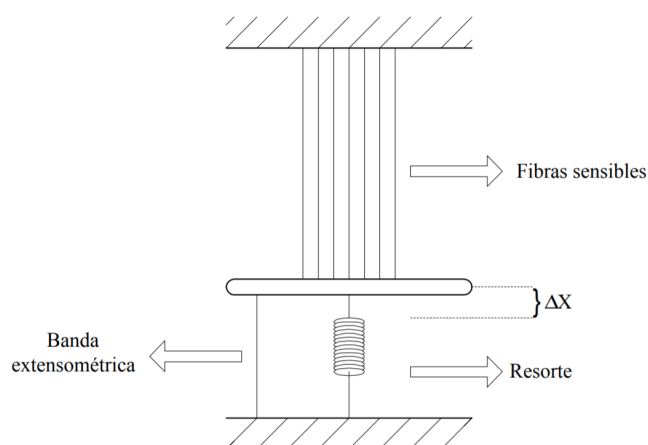


Figura 2.8: Representación del funcionamiento de un sensor de humedad mecánico

En la Figura 2.8 se puede apreciar que el desplazamiento ΔX puede ser medido de muchas maneras, en este caso se lo hace mediante una banda extensiométrica, al variar ΔX la banda extensiométrica también lo hará, cambiando su resistencia y por ende esto puede ser convertido a voltaje mediante un puente de Wheatstone.

Conductividad.- Cuando se tiene una mezcla gaseosa con vapor de agua se tendrá una cantidad de moléculas de agua que se encuentran en la superficie, al haber presencia de agua sobre

la superficie permite el flujo de corriente eléctrica siendo ese el principio de conductividad.

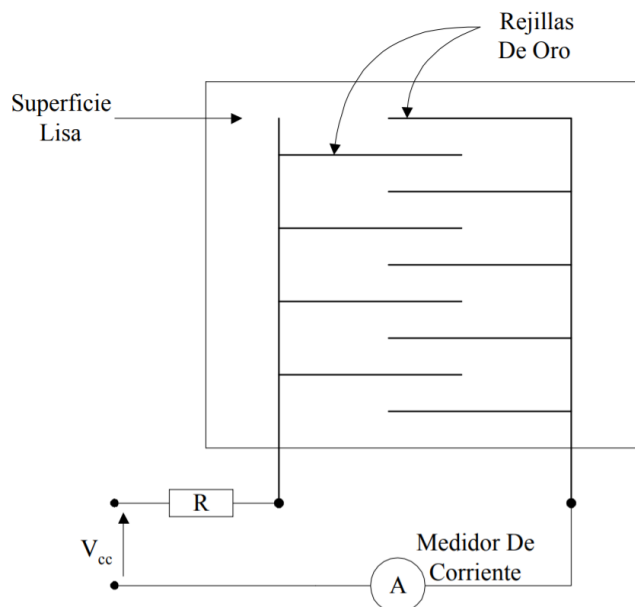


Figura 2.9: Representación del funcionamiento de un sensor de humedad por conductividad

En la Figura 2.9 se tiene una superficie pulida sobre la cual se encuentran dos rejillas de oro separadas una de la otra. Dependiendo del nivel de humedad relativa presente habrá una cantidad de moléculas de agua presentes en la superficie y al someter a un potencial continuo a las rejillas se generará una corriente que puede ser medida con un amperímetro que permita registrar la corriente que se genera en el proceso. La resistencia R es un elemento de protección en caso de un cortocircuito. Cabe recalzar que para que este procedimiento sea útil es necesario que la superficie este completamente limpia.

Capacitivo.- Son los más usados por la meteorología y las

industrias, ya que son de bajo costo, fácil producción y alta fidelidad. Su funcionamiento se basa en la capacidad que tiene un condensador de cambiar su constante dieléctrica. Si se usa como dieléctrico una mezcla gaseosa su valor obedecerá a la ecuación 2.4.

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (2.4)$$

Donde C es la capacitancia, ϵ la constante dieléctrica, A el área de las placas del condensador, D la distancia entre las placas.

Infrarrojo.- Las moléculas están en constante movimiento y poseen movimientos rotatorios y vibratorios, que se asemejan a un movimiento armónico simple. La energía tanto del movimiento rotacional como del vibracional están cuantizados y para que una molécula pase de nivel energético a otro se necesita de una cantidad de energía específica dependiendo del tipo de molécula. Su función es absorber la radiación contenida en las moléculas de vapor de agua.



Figura 2.10: Sensor de humedad superficial infrarrojo MCT460-T

2.3.3. Velocidad

Este dispositivo es capaz de medir y convertir la velocidad a la que va cualquier objeto en una señal eléctrica. Un sensor de velocidad está conformado por una bobina de alambre y un imán, cuando el objeto se mueve el imán también lo hace, generando un campo magnético variable que a su vez genera una corriente eléctrica que es proporcional a la velocidad del objeto. Existen otros sensores que tiene un imán fijo y un bobina variable, ahora al moverse el objeto la bobina se mueve dentro del campo magnético que generara una corriente eléctrica de igual manera que el tipo de sensor anterior.

Tipos de sensores de velocidad

Dinamo Tacométrico.- Un dinamo es un generador de tensión, su funcionamiento se basa en dos imanes semicilíndricos opuestos y una bobina en su interior que es capaz de girar libremente. Mediante un sistema de escobillas y un colector, se obtienen los niveles de tensión a la salida del sensor. Se pueden encontrar dos tipos de dinamo tacométrico, aquellos que entregan a su salida un nivel de tensión pulsante y continua, con magnitud y frecuencia proporcional a la velocidad, además requieren de un circuito acondicionador más complejo. Los otros entregan un nivel de tensión continuo y proporcional a la velocidad y no necesita de un circuito acondicionador de señal.

Encoder.- Es un dispositivo electromecánico que permite codificar el movimiento mecánico mediante pulsos eléctricos, también

conocido como transductor rotativo que mediante una señal eléctrica es capaz de indicar la velocidad, posición angular y aceleración de un motor [13]. Un encoder está compuesto por un disco fijado a un eje giratorio, es un disco de vidrio que se encuentra codificado con unas partes opacas y otras transparentes que permiten o bloquean el paso de la luz emitida por emisores infrarrojos [13]. Los hay de diferentes tipos de encoder como los incremental, de cuadratura, absoluto, monovuelta y multivuelta.

RVDT.- Son conocidos como sensores de posición rotativo que permiten medir un ángulo sin contacto. Este tipo de sensor es conocido por su fiabilidad y resistencia en condiciones complicadas. Internamente está compuesto por un devanado primario y dos secundarios. La fuerza electromagnética que es inducida al devanado secundario puede ser modelada como una función de desplazamiento rotatorio. Los devanados secundarios son colocados de tal forma que produzcan una fuerza electromagnética de 180 entre ellos como se muestra en la Figura 2.13.

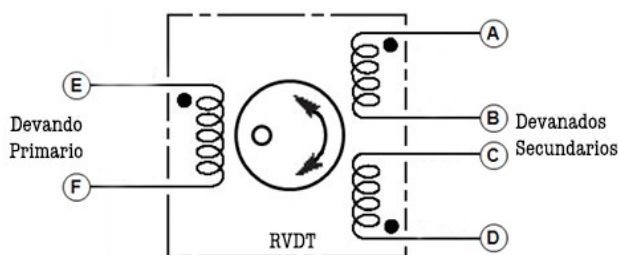


Figura 2.11: Diagrama interno de un sensor de velocidad RVDT

2.4. Actuadores

Dispositivos mecánicos que proporcionan fuerza capaz de mover un dispositivo mecánico. Esta fuerza puede venir de tres posibles fuentes: presión hidráulica, fuerza motriz, presión neumática.

Según la energía que usan se dividen en tres grupos:

- Eléctricos
- Hidráulico
- Neumático

Los actuadores neumáticos usan aire comprimido como fuente de energía para trabajar y son usados generalmente en el control de movimientos rápidos, pero de poca precisión. Los actuadores hidráulicos usan fluidos como fuente de energía y son usados en manipuladores con gran capacidad de carga. Los actuadores eléctricos son los más usados por su fácil control y demás ventajas [10].

2.4.1. Neumáticos

Su fuente de energía es el aire a presión, este debe estar a una presión entre 5 y 10 BAR. Se dividen en motores y cilindros neumáticos. Cilindros

Los cilindros neumáticos se dividen en simple y doble efecto. En los de simple efecto se desplaza un embolo provocando un empuje ejercido por la presión del aire, el otro lado es desplazado en consecuencia del efecto que produce el muelle En los de doble

efecto el aire es el encargado de empujar al embolo en ambas direcciones ya que puede ser introducido de forma arbitraria por una de las cámaras.

Motores neumáticos.- Hay dos tipos de motores neumáticos, que son los más usados, los motores de aletas rotativa y pistones axiales. Este tipo de motor convierten el aire comprimido en movimiento lineal o rotativo, siendo una alternativa de los motores eléctricos en casos donde no son recomendable usarlos como en la minería y campos industriales.

2.4.2. Hidráulicos

A diferencia de los actuadores neumáticos estos usan aceites minerales a presión, los fluidos normalmente se comprimen a una presión de entre 50 y 100 BAR, en ocasiones puede llegar hasta 300 BAR. El grado de compresión de los fluidos es mucho menor que el del aire, por ende, tienen mayor precisión.

Este tipo de actuadores presenta estabilidad en situaciones donde existen cargas estáticas, es capaz de soportar cargas sin necesidad de usar energía, para que se produzca movimiento del émbolo es necesario cambiar el volumen de aceite.

Existen ciertas desventajas con los actuadores hidráulicos, ya que al trabajar con presiones relativamente altas llegan a sufrir de fugas de aceite, su instalación es más complicada ya que es necesario el uso de sistemas de refrigeración, equipos de filtrado, unidades de control de distribución y eliminación de aire.

2.4.3. Eléctricos

Los actuadores eléctricos ofrecen sencillez, control y precisión en acondicionamientos electrónicos, siendo los más usados por los robots industriales.

Tipos de actuadores eléctricos.

- Motores de corriente continua DC.
- Motores de corriente alterna AC.
- Motores a paso.

2.5. Elementos de calentamiento

Son aquellos elementos que convierten energía eléctrica en calor, ya sea por disipación o por radiación los mismo que se clasifican en los siguientes tipos.

2.5.1. Resistencias calefactoras

Son filamentos de Níquel y Cromo cuya aleación soporta 1000 grados Celsius, su funcionamiento se basa en que al circular una corriente entre sus terminales disipan calor.

2.5.2. Lámparas de calor

Son aquellas lámparas construidas para generar calor y no luz, en este tipo de lámparas el filamento se mantiene a baja temperatura

evitando producir luz en el espectro visible, pero produciendo calor y luz en el espectro infrarrojo.

2.5.3. Lámparas incandescentes

Son aquellas construidas para generar luz, para dicho efecto su filamento se eleva a más de 1000 grados Celsius.

2.6. Variadores de Frecuencia

Un variador de frecuencia es un equipo de control de velocidad rotacional de motores AC, también llamados drivers. Su principio de funcionamiento se basa en la conversión del voltaje AC a DC para luego pasar por un inversor controlado por PWM con el objetivo de variar la corriente final que pasa por el motor.

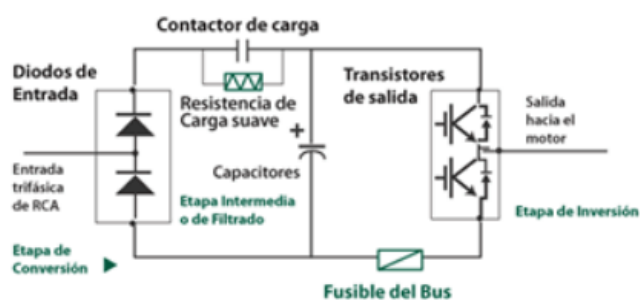


Figura 2.12: Diagrama general de un variador de frecuencia

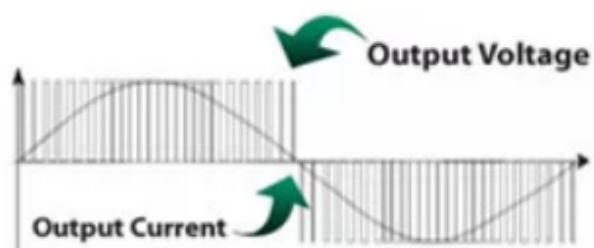


Figura 2.13: Voltaje de salida del variador con PWM y salida de corriente promedio

Finalmente, la velocidad del motor se rige por la ecuación 2.5:

$$RPM = 120 \frac{f(1-s)}{P} \quad (2.5)$$

Donde f es la frecuencia de alimentación en Hz, s es el desplazamiento y P es el número de polos del motor.

2.7. Motores AC

Se denominan motores de corriente alterna por su tipo de alimentación eléctrica, funcionan con corriente alterna. Es un dispositivo capaz de transformar energía eléctrica en energía mecánica de rotación por acción de los campos magnéticos. Se conoce los de tipo síncrono y asíncrono.

2.7.1. Motores asíncronos

El ~~rote~~ rotor de un motor asíncrono está constituido por barras conductoras paralelas al eje, como una trampa para ardillas, de allí el nombre de motor de jaula. El estator tiene un conjunto de bobinas que al ser excitadas con la corriente alterna se produce un

campo magnético en las proximidades del estator y a su vez este induce corriente en el rotor.

La frecuencia de la corriente alterna determina la velocidad con la que gira el campo magnético del estator, mientras que el rotor sigue girando, pero mucho más despacio, esa diferencia de velocidades da la denominación de asíncrono.

2.7.2. Motores síncronos



A diferencia de los motores asíncronos estos operan a la misma velocidad que la del estator. La velocidad es controlada por la frecuencia de la alimentación, puede ser variada mediante un convertidor de frecuencia. Es importante que no exista pérdida de sincronismo, para evitarlo se usa un sensor de posición en el rotor y controlar que todo momento la posición de estator con respecto al rotor.

2.8. Controladores discretos

2.8.1. PID

Método que se aplica para realizar el control de procesos tanto cotidianos como industriales. El método de PID discreto consiste en una suma de ganancias Proporcional, Integrador y Derivativo. Esto es, con el fin de lograr características dinámica y estable en el sistema. Sin embargo, este control se aplica dado un tiempo de muestreo determinado por el controlador o un agente externo que

muestra la señal de entrada y envía una respuesta cada tiempo determinado.

Este método es efectivo para realizar control mediante dispositivos sincrónicos que funcionan a una frecuencia de muestreo determinada [11].

$$u(z) = Ke(z) + KT_0K_I \frac{z^{-1}}{1-z^{-1}}e(z) + \frac{KT_D}{T_0}(1-z^{-1}) \quad (2.6)$$

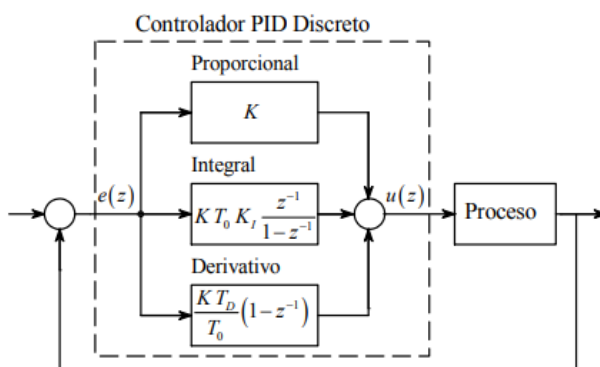


Figura 2.14: Esquema de un controlador PID discreto promedio

Controlador proporcional

Esta parte del controlador permite realizar una acción de control basado en la diferencia entre la referencia y la variable medida, con el objetivo de llegar a un error nulo entre ambas. El error del proceso normalmente no se puede eliminar en un proceso dinámico, por lo que siempre se tendrá una señal de salida [11].

Controlador integral

La parte integral del controlador está basado en la suma del error del sistema en cuestión del tiempo. Cuando el sistema logra

la estabilidad, la acción integral permite reducir el error a cero. Esto permite estabilizar el sistema al ser añadido al controlador proporcional.

Controlador derivativo

La acción derivativa se basa en el cambio que se produce en el error del sistema en el periodo muestreado. De esta manera, si el error es grande, la salida tomará un gran valor debido a la diferencia entre la referencia y el error. El efecto que tiene la acción derivativa en el sistema es, que aumentará la velocidad de reacción de la salida de este, haciendo que se reduzca el tiempo de estabilización. Sin embargo, sacrifica un poco el porcentaje de overshoot del sistema, haciéndolo más oscilante.

2.8.2. Reubicación de polos por variables de estado

La reubicación de polos se aplica para obtener un comportamiento en la planta basándose la ubicación de polos de esta y reubicándolos a una posición deseada, donde su comportamiento seguirá las especificaciones del diseño.

Para el diseño de un controlador por reubicación de polos, es necesario conocer a priori la dinámica de la planta, para conocer los polos originales y poder manipular su ubicación a lazo cerrado y así obtener una respuesta específica.

La representación en tiempo discreto de las especificaciones del diseñador se observa en la ecuación (2.7).

$$A(z^{-1})y(t) = z^{-d}B(z^{-1})u(t) \quad (2.7)$$

Donde $A(z^{-1})$ son los polos de lazo abierto, $y(t)$ es la salida del sistema, d el retardo en el tiempo, $B(z^{-1})$ los ceros de lazo abierto y $u(t)$ la acción de control.

Basándose en la teoría de control la asignación de polos sigue una estructura de seguidor de referencia y se puede expresar como se observa en la ecuación (2.8).

$$R(z^{-1})u(t) = T(z^{-1})w(t) - S(z^{-1})y(t) \quad (2.8)$$

lo que en diagrama de bloques se representa como se observa en la Figura 2.15.

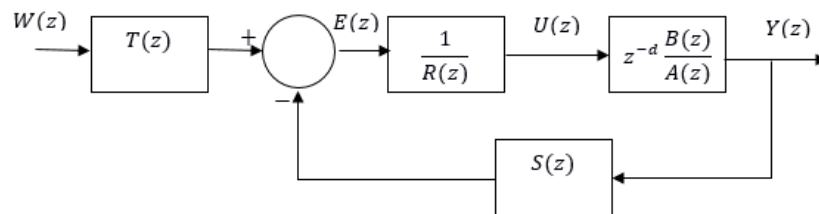


Figura 2.15: Diagrama de bloques a lazo cerrado

Capítulo 3

3. Metodología

3.1. Identificación de los subsistemas del equipo flexográfico

El equipo flexográfico se compone de varios subsistemas destinados a una función particular, los mismo que se muestran a continuación:

- Subsistema de desplazamiento.
- Subsistema de pintado.
- Subsistema de calentamiento.
- Subsistema de troquelado.

De estos subsistemas los que están estrechamente relacionados con el secado de las etiquetas son el subsistema de calentamiento y desplazamiento

3.1.1. Subsistema de calentamiento

El subsistema de calentamiento está compuesto por dos lámparas halógenas de 500 vatios cada una, las mismas que cumplen la función de secar las etiquetas luego del proceso de pintado y antes del proceso de troquelado.

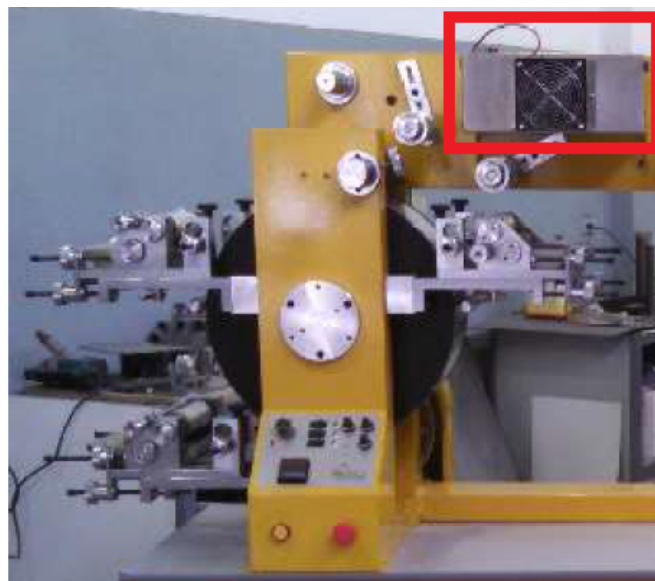


Figura 3.1: Cámara de secado marcado en rojo



Figura 3.2: Lámpara halógena de 500W

Debido a que el objetivo es secar las etiquetas a la mayor velocidad posible para no perjudicar la producción el subsistema térmico se lo considerara constante y a máxima temperatura.

3.1.2. Subsistema de desplazamiento

El subsistema de desplazamiento está compuesto por el motor AC y los rodillos que conforman el recorrido de la cinta de etiquetas. Tomando como base que el objetivo del sistema es llevar la humedad de las etiquetas pintadas a un nivel igual a cero (secas), y teniendo en cuenta que la fuente de calor es constante, se diseñó un experimento para medir el tiempo promedio que tarda en recorrer cada color desde el momento que fue aplicado sobre la etiqueta hasta que sale de la cámara de secado.

# Colores	Tiempo desde aplicación del color hasta el secado [s]
1	6.55
2	5.51
3	3.10
4	2.88

Tabla 3.1: Tabla de valores promedios de tiempo de recorrido hasta cámara de secado

Basándonos en estos datos se puede apreciar que el cuarto color en ser aplicado es el más crítico debido a que en solo 2.88 segundos sale de la cámara de secado, por lo tanto, dependiendo de la cantidad de colores aplicados se puede hacer que el ultimo color siempre tarde el mismo tiempo para secarse, por lo tanto, dicho tiempo se convertirá en el tiempo de estabilización de nuestra función de transferencia.

$$T_s = 2,88[s] \therefore \tau = 0,72[s] \quad (3.1)$$

Una vez determinado el tiempo mínimo para que el secado sea completo o lo que es lo mismo que la humedad llegue a cero

se puede determinar la velocidad necesaria para que cada color cumpla ese tiempo mínimo, para lo cual se diseñó un nuevo experimento para determinar la velocidad promedio para que cada color logre el tiempo de secado mínimo anteriormente establecido.

# Colores	Velocidad [m/s]
1	0.6787
2	0.5521
3	0.4255
4	0.2988

Tabla 3.2: Tabla de valores promedios de velocidad para cada color

Como se observa la velocidad es proporcional a la cantidad de colores aplicados, y con la medición de la humedad relativa en el caso de cuatro colores evaluada a 0.6787 [m/s] la cinta mantuvo un 68% de humedad mientras que al pasar a 0.2988 [m/s] la cinta llego a 0% de humedad.

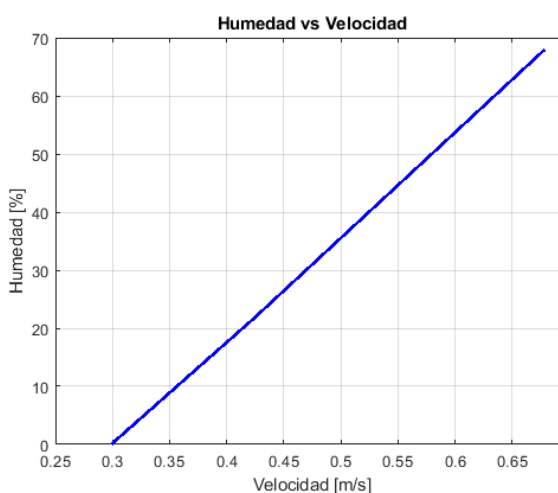


Figura 3.3: Gráfica de humedad VS velocidad

Como se observa en la figura 3.3, la relación es lineal lo que nos permite calcular una pendiente como se muestra en la ecuación 3.2.

$$k = \frac{68 - 0}{0,6787 - 0,2988} = 183,1869 \quad (3.2)$$

Finalmente, para identificar el comportamiento de la humedad con respecto al tiempo se seleccionó una etiqueta de 4 colores a la cual se le hizo adquisición de datos de humedad a una velocidad de 0.2988 [m/s], con lo que se obtuvo el comportamiento de la humedad en el tiempo como se observa en la figura 3.5.

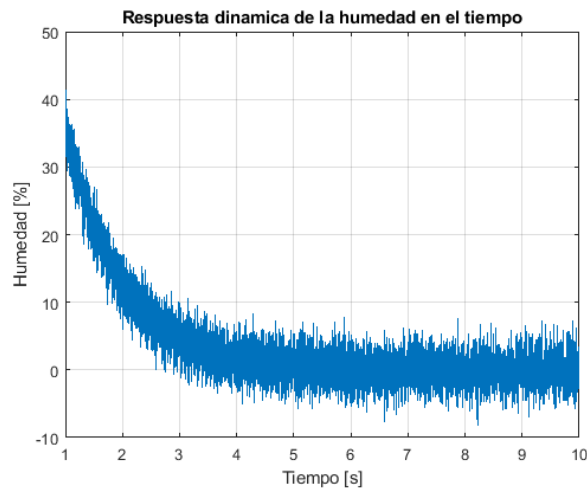


Figura 3.4: Comportamiento de la humedad en el tiempo

Una vez analizando el comportamiento se denota que se la puede aproximar a un sistema de primer orden con lo cual determinó la función de transferencia Humedad vs Velocidad.

$$G(s) = \frac{H(s)}{V(s)} = \frac{k}{\tau s + 1} = \frac{183,1896}{0,72s + 1} \quad (3.3)$$

La misma que al compararla con los datos registrados se la puede considerar una buena aproximación a la planta real.

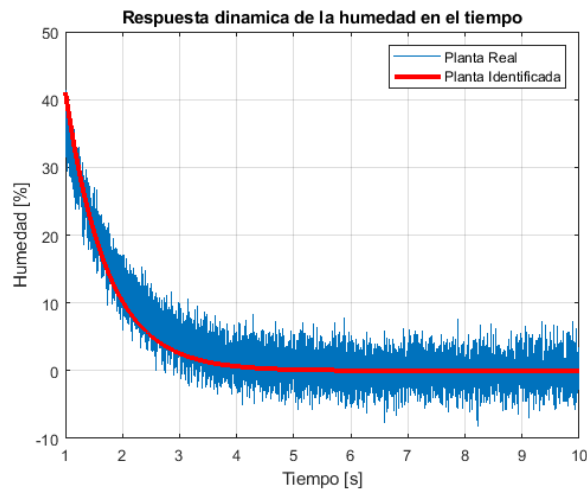


Figura 3.5: Comparativa planta real y planta identificada

3.2. Diseño de controladores discretos

Para el diseño de controladores discretos se tuvo que discretizar la función de transferencia $G(s)$ usando un tiempo de muestro de 0.005 [s], obteniendo la función de transferencia discreta que se muestra a continuación:

$$G(z) = \frac{1,268}{z - 0,9931}; T_m = 0,005[s] \quad (3.4)$$

3.2.1. Controlador PID

Una vez establecida la función de transferencia discreta de la planta se procede a establecer los parámetros de diseño:

- Tiempo de estabilización < 2.88 [s]
- Sobrenivel porcentual = 0 [%]

Usando SISOTOOL con los parámetros de diseño establecido y

ajustando los valores de polos y ceros con la técnica del lugar geométrico de las raíces, se obtuvo el controlador de la ecuación 3.5.

$$PID = k_p + \frac{k_i T_m}{z - 1} + \frac{k_d(z - 1)}{T_m} \quad (3.5)$$

$$PID = 0,00312 + \frac{0,0095}{z - 1} + 0,498(z - 1)$$

$$T_m = 0,005[s]$$

3.2.2. Controlador de reubicación de polos en variables de estado

Para el diseño por reubicación de polos se debe tener en cuenta que el sistema sea controlable, bajo ese criterio se podrá determinar la matriz de ganancia de realimentación de estado K requerida para la ubicación de los polos en los lugares requeridos por el diseño, para lo cual se usa el esquema mostrado en la figura 3.6, donde $x(k)$ son los estados presentes y $x(k + 1)$ los estados futuros.

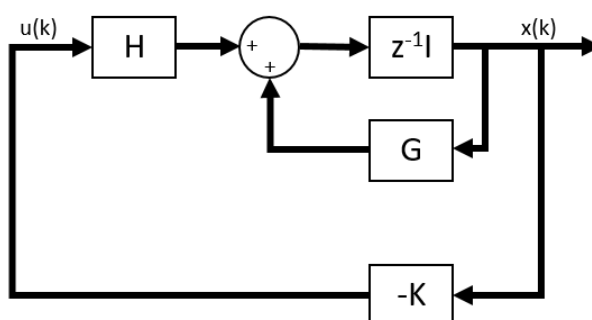


Figura 3.6: Representación de variables de estado

$$x(k+1) = (G - HK)x(k) \quad (3.6)$$

Pero el sistema mostrado anteriormente necesita que todas las variables de estado sean medibles, pero debido a las características de la planta es no es posible de forma directa lo cual es necesario la implementación de un observador de estados, que nos permita estimar los valores no medibles a partir de la variable de salida y de control, para lo cual el sistema debe ser observable, por lo tanto se asume que los estados $x(k)$ no están disponibles para compararse con el estado esperado $\tilde{x}(k)$. Sin embargo, dado que se conoce la salida esperada y puede medirse $\tilde{y}(k) = C\tilde{x}(k)$ se la podrá comparar con $y(k)$, para lo cual se usa el esquema que se muestra en la figura 3.7.

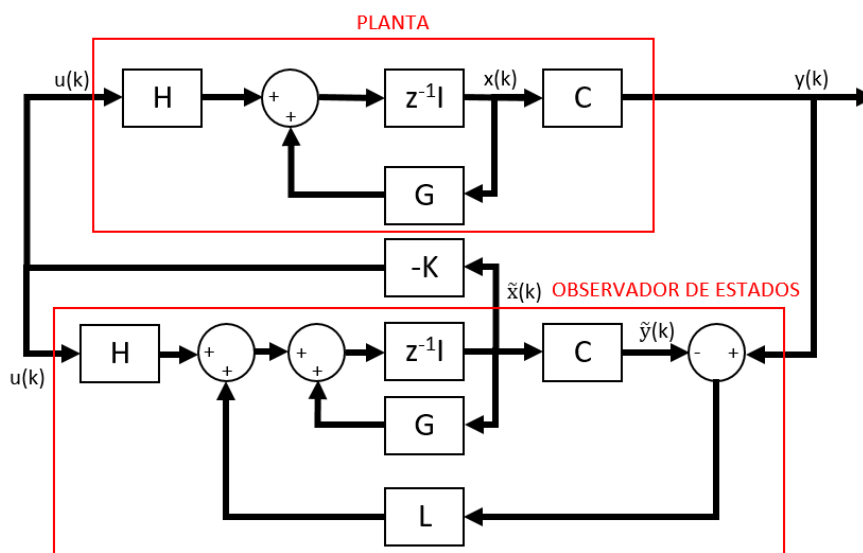


Figura 3.7: Representación de variables de estado con observador

Este observador de estados se llama observador predictivo, pues el estimado $\tilde{x}(k+1)$ está un periodo de muestreo adelante de la

medición $y(k)$, Donde los valores característicos de $(G - LC)$, se los conocen como polos del observador.

$$x(k+1) - \tilde{x}(k+1) = (G - LC)[x(k) - \tilde{x}(k)]$$

$$e(k) = x(k) - \tilde{x}(k)$$

$$e(k+1) = (G - LC)e(k) \quad (3.7)$$

Debido a que la matriz $(G - LC)$ es estable, entonces el vector de error $e(k)$ convergirá a cero para cualquier error inicial, y si los valores característicos tienen un comportamiento dinámico adecuadamente rápido el error tenderá a cero a una velocidad adecuada.

Donde las matrices K y L se las determina de la siguiente forma:

$$|zI - G + HK| = 0 \quad (3.8)$$

$$|zI - G + CL| = 0 \quad (3.9)$$

Los polos del observador por lo general se seleccionan para que la respuesta de este sea mucho más rápida que la respuesta del sistema, con ello en base la función de transferencia pulso del controlador quedará definida como:

$$D(z) = -\frac{U(z)}{Y(z)} = K[zI - G + HK + LC]^{-1}L \quad (3.10)$$

Adicionalmente si se desea tener un error de estado estacionario igual a cero, ante una entrada escalón se debe agregar un factor

de corrección K_o en la referencia. Con lo cual el lazo de control quedaría definido como se observa en la figura 3.8.

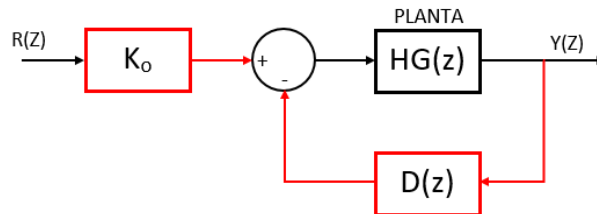


Figura 3.8: Lazo de Control por Observador de Estados

Donde K_o se la obtiene de la evaluación del límite:

$$K_o \lim_{z \rightarrow 1} \frac{HG(z)}{1 + D(z)HG(z)} = 1 \quad (3.11)$$

Finalmente, todas las ecuaciones se implementaron en Matlab, con lo que se obtuvo la función de transferencia pulso del controlador y K_o como se muestra a continuación.

$$D(z) = \frac{5,655e^{-5}z - 5,616e^{-5}}{z^2 - 0,984z + 7,17e^{-5}}$$

$$K_o = -34,8896$$

3.3. Simulación del desempeño de los controladores

Una vez diseñados los controladores se procedió a comprobar su desempeño a una entrada escalón unitario desde Simulink.

3.3.1. Controlador PID

Como se puede observar en la figura 3.10 el tiempo de estabilización cumple los requerimientos de estar alrededor de 2.88 segundos, de igual manera el error de estado estacionario es cero al llegar al mismo valor de la referencia.

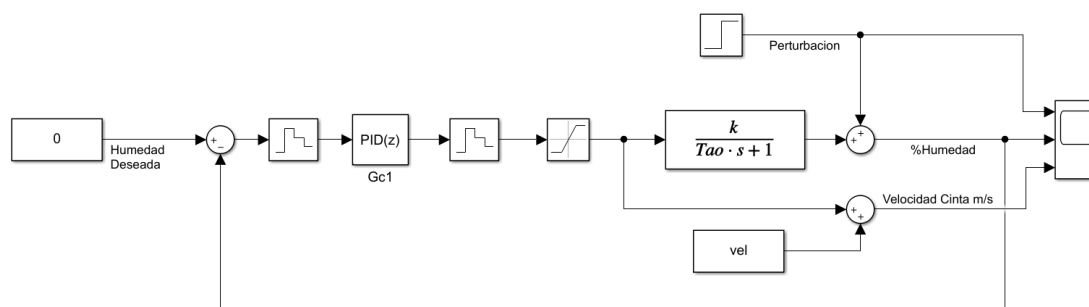


Figura 3.9: Diagrama de Bloques con el Controlador PID

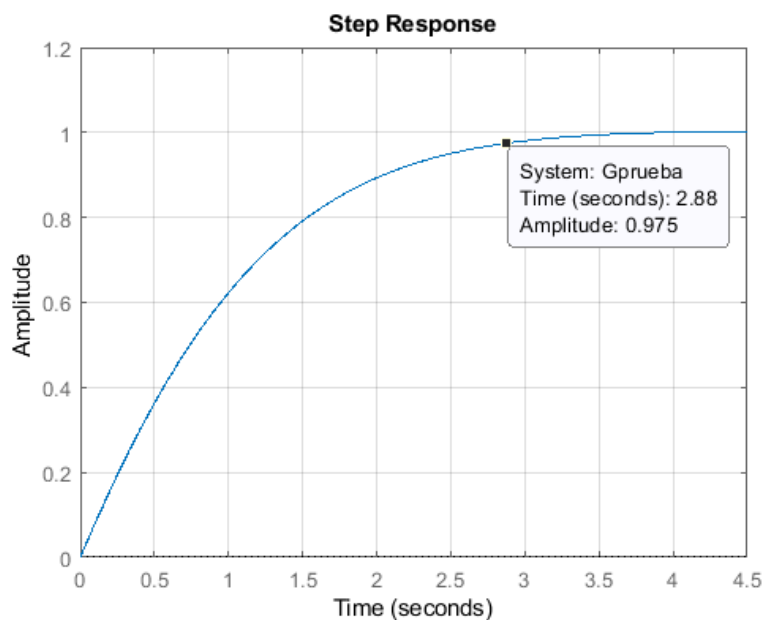


Figura 3.10: Respuesta del Controlador PID Implementado

3.3.2. Controlador de reubicación de polos en variables de estado

Como se puede observar en la figura 3.11 el tiempo de estabilización cumple los requerimientos de estar alrededor de 2.88 segundos, de igual manera el error de estado estacionario es cero al llegar al mismo valor de la referencia.

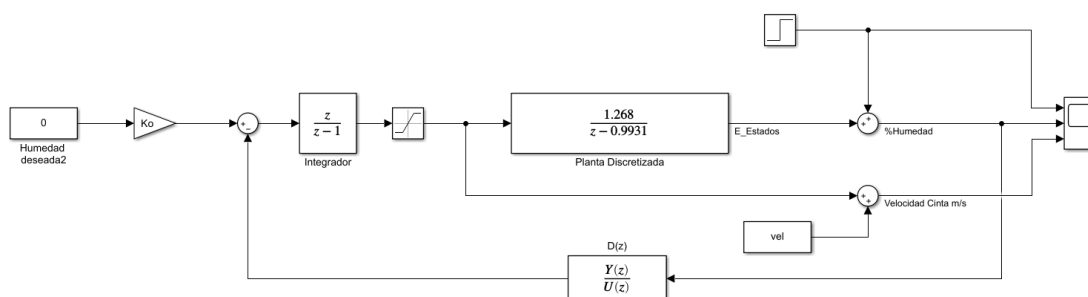


Figura 3.11: Diagrama de Bloques con el Controlador por Variables de Estado

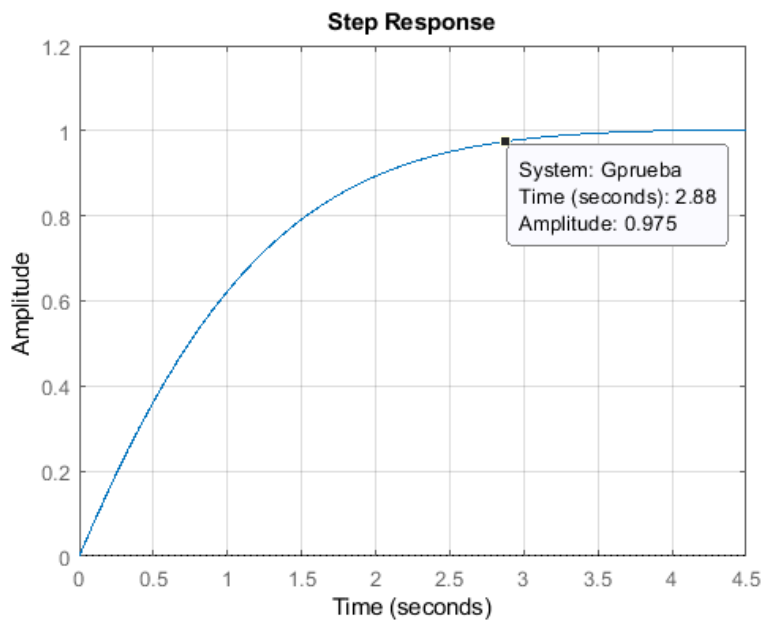


Figura 3.12: Respuesta del Controlador de Variables de Estado Implementado

Capítulo 4

4. Pruebas y análisis de resultados

4.1. Desempeño del controlador PID

Una vez comprobado el desempeño del controlador PID, es necesario probar su eficiencia ante perturbaciones de 20 % más en la humedad que es un valor aproximado que se altera durante el proceso, la cual se prueba para la cantidad de colores aplicados la cual va desde un color hasta 4 colores en la etiqueta.

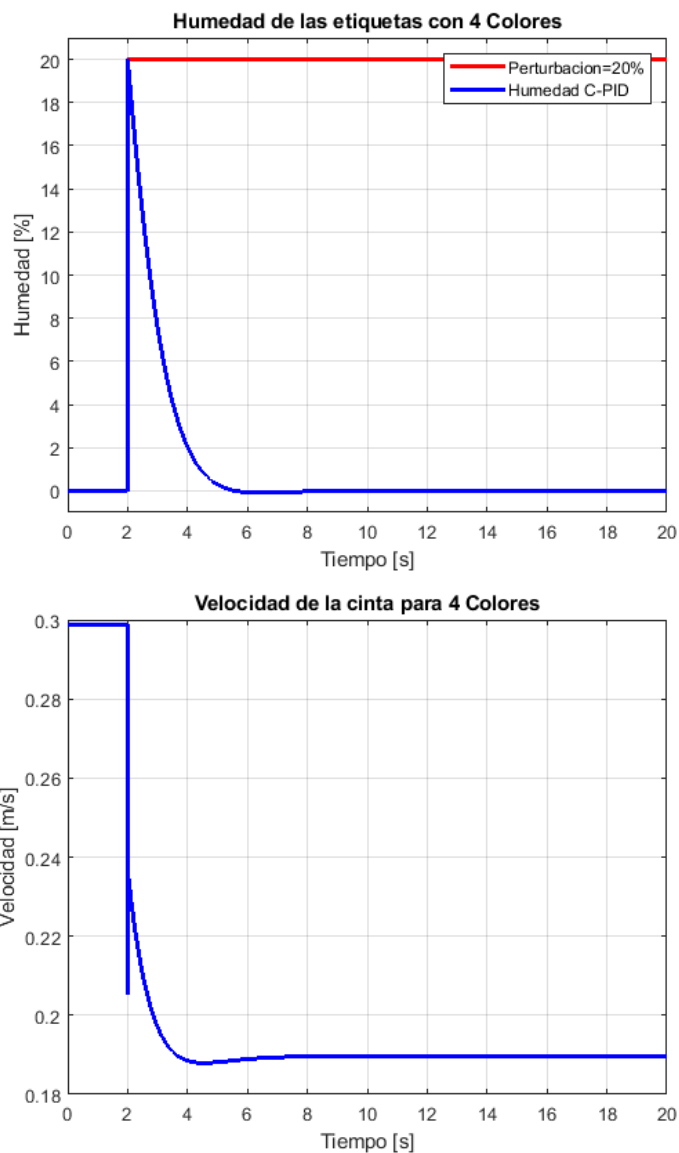


Figura 4.1: Respuesta de humedad y acción de control para 4 colores

Como se puede apreciar en la figura 4.1 una perturbación del 20 % en la salida, es completamente compensada reduciendo la velocidad de $0.2988[m/s]$ hasta $0.1912[m/s]$, llevando la humedad de las etiquetas de 4 colores nuevamente a 0%.

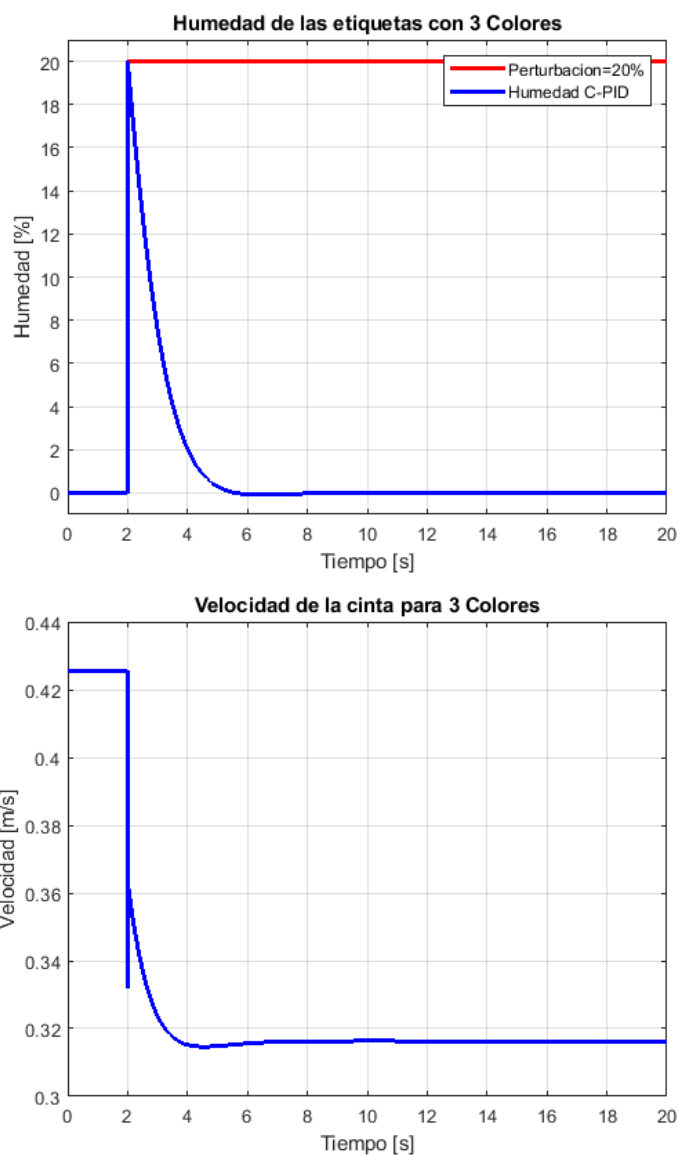


Figura 4.2: Respuesta de humedad y acción de control para 3 colores

Como se puede apreciar en la figura 4.2 una perturbación del 20 % en la salida, es completamente compensada reduciendo la velocidad de 0.4255[m/s] hasta 0.3189[m/s], llevando la humedad de las etiquetas de 3 colores nuevamente a 0%.

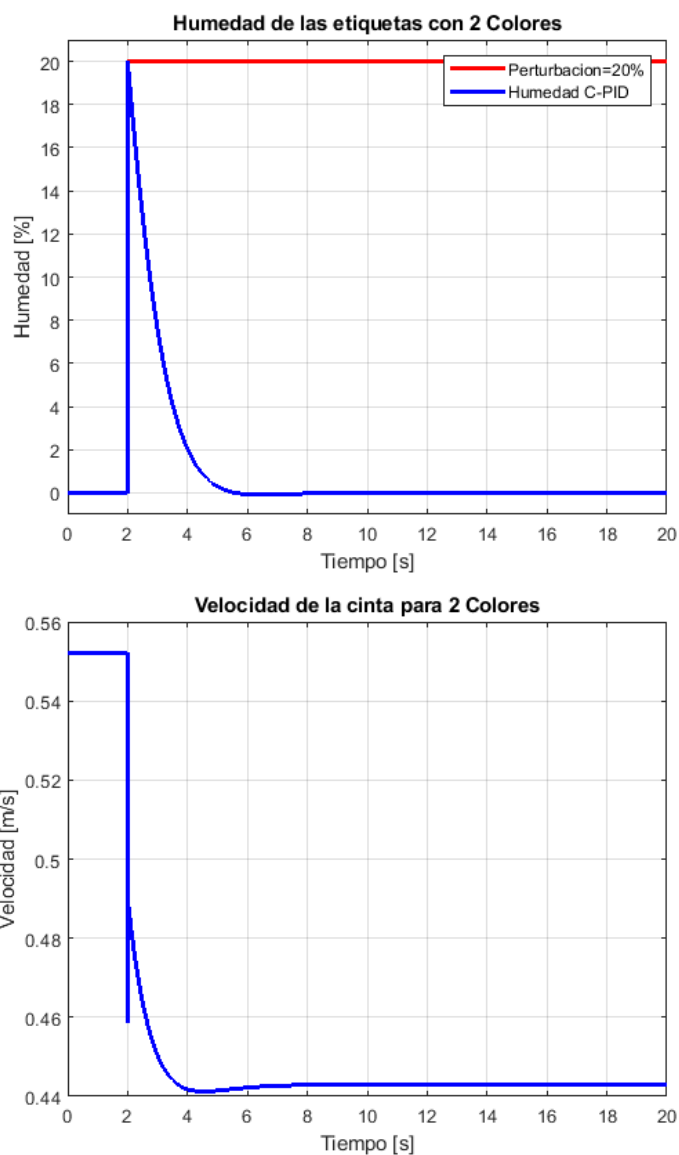


Figura 4.3: Respuesta de humedad y acción de control para 2 colores

Como se puede apreciar en la figura 4.3 una perturbación del 20 % en la salida, es completamente compensada reduciendo la velocidad de $0.5521[m/s]$ hasta $0.4415[m/s]$, llevando la humedad de las etiquetas de 2 colores nuevamente a 0%.

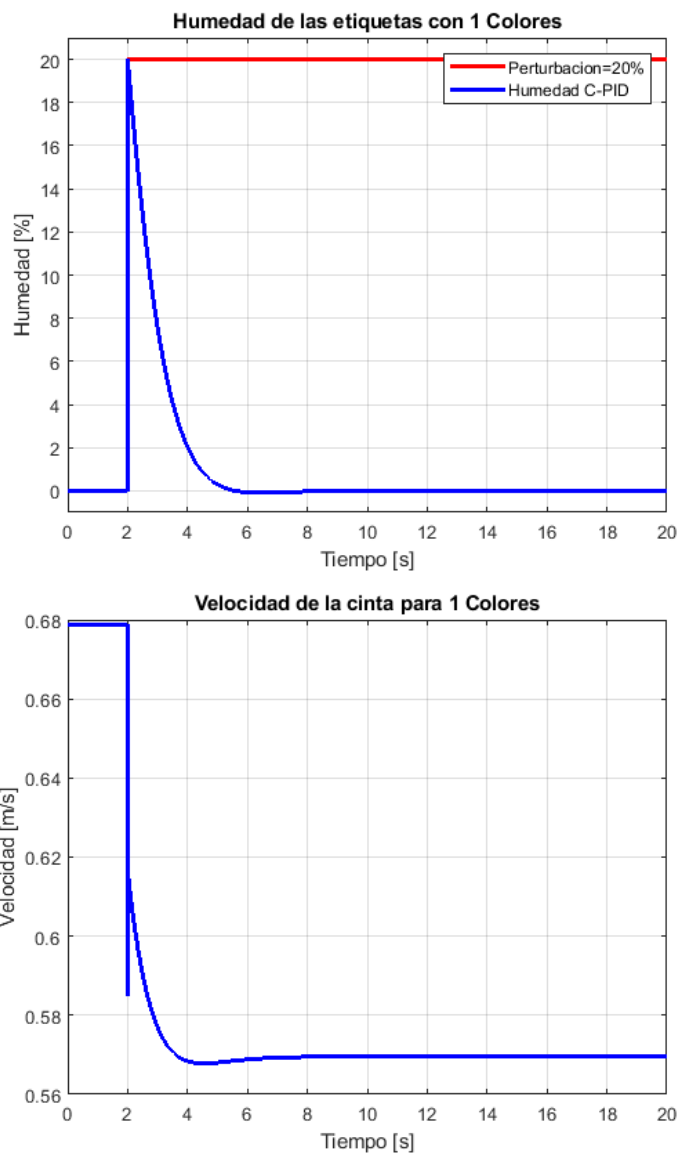


Figura 4.4: Respuesta de humedad y acción de control para 1 color

Como se puede apreciar en la figura 4.4 una perturbación del 20 % en la salida, es completamente compensada reduciendo la velocidad de 0.6787[m/s] hasta 0.5676[m/s] , llevando la humedad de las etiquetas de 1 color nuevamente a 0 %.

4.2. Desempeño del controlador por reubicación de polos

Una vez comprobado el desempeño del controlador por reubicación de polos, es necesario probar su eficiencia ante perturbaciones de 20 % más en la humedad.

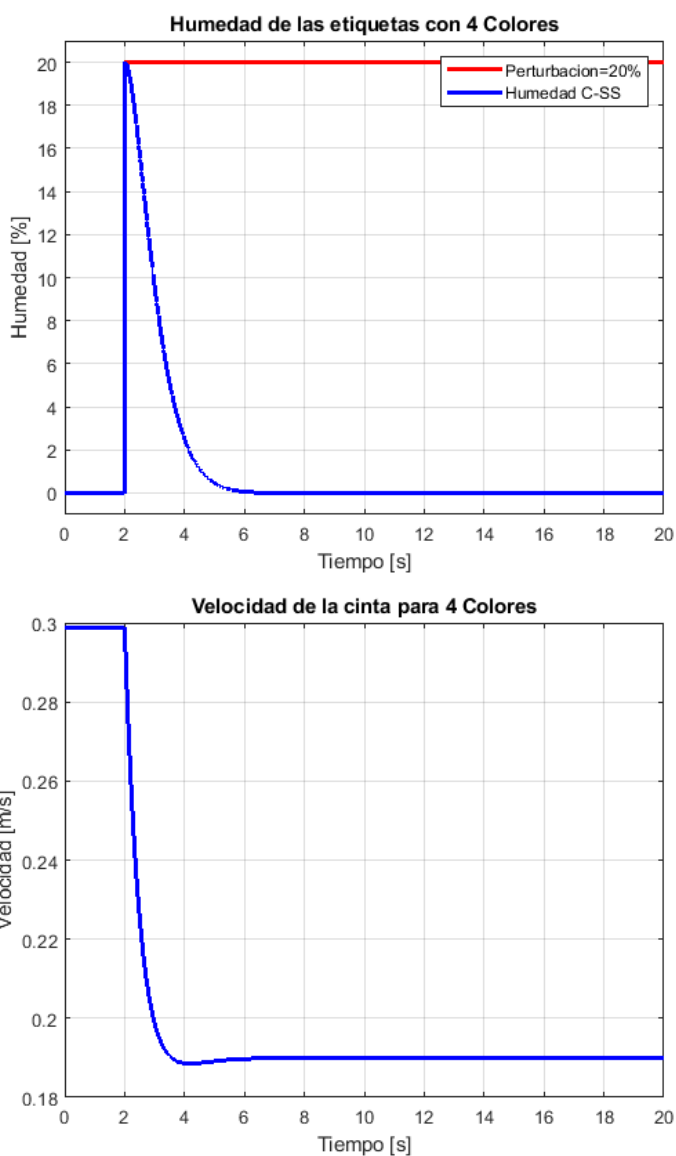


Figura 4.5: Respuesta de humedad y acción de control para 4 colores

Como se puede apreciar en la figura 4.5 una perturbación del 20 % en la salida, es completamente compensada reduciendo la velocidad de 0.2988[m/s] hasta 0.1912[m/s], llevando la humedad de las etiquetas de 4 colores nuevamente a 0 %.

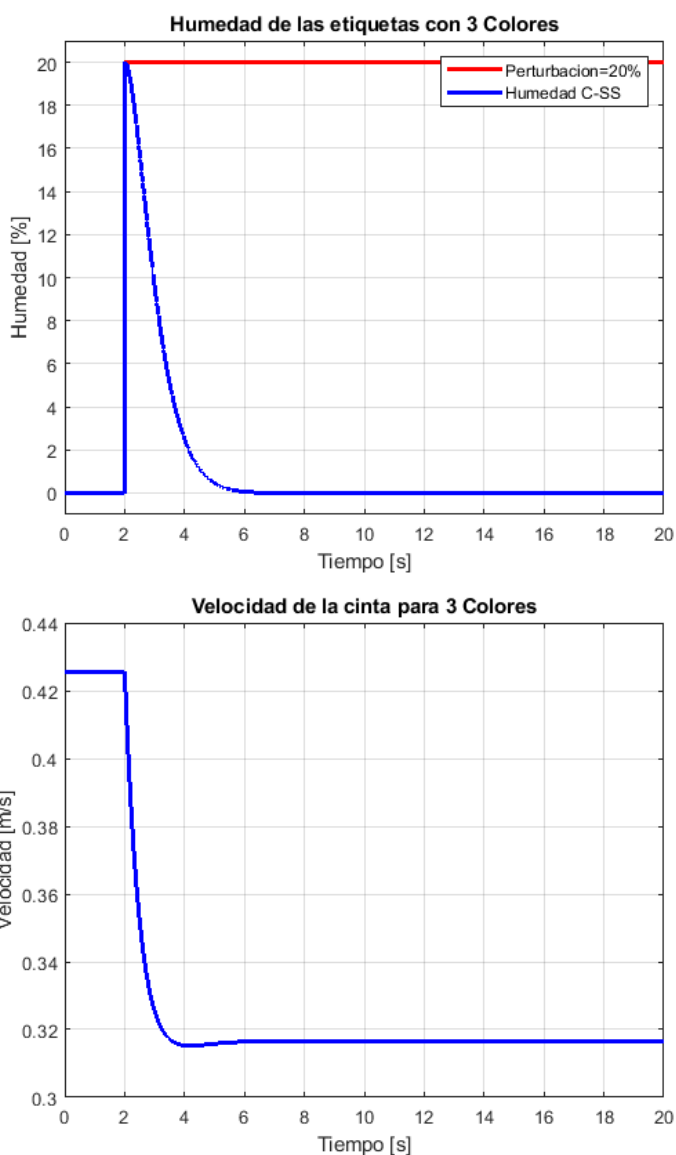


Figura 4.6: Respuesta de humedad y acción de control para 3 colores

Como se puede apreciar en la figura 4.6 una perturbación del 20 % en la salida, es completamente compensada reduciendo la velocidad de

0.4255[m/s] hasta 0.3189[m/s], llevando la humedad de las etiquetas de 3 colores nuevamente a 0%.

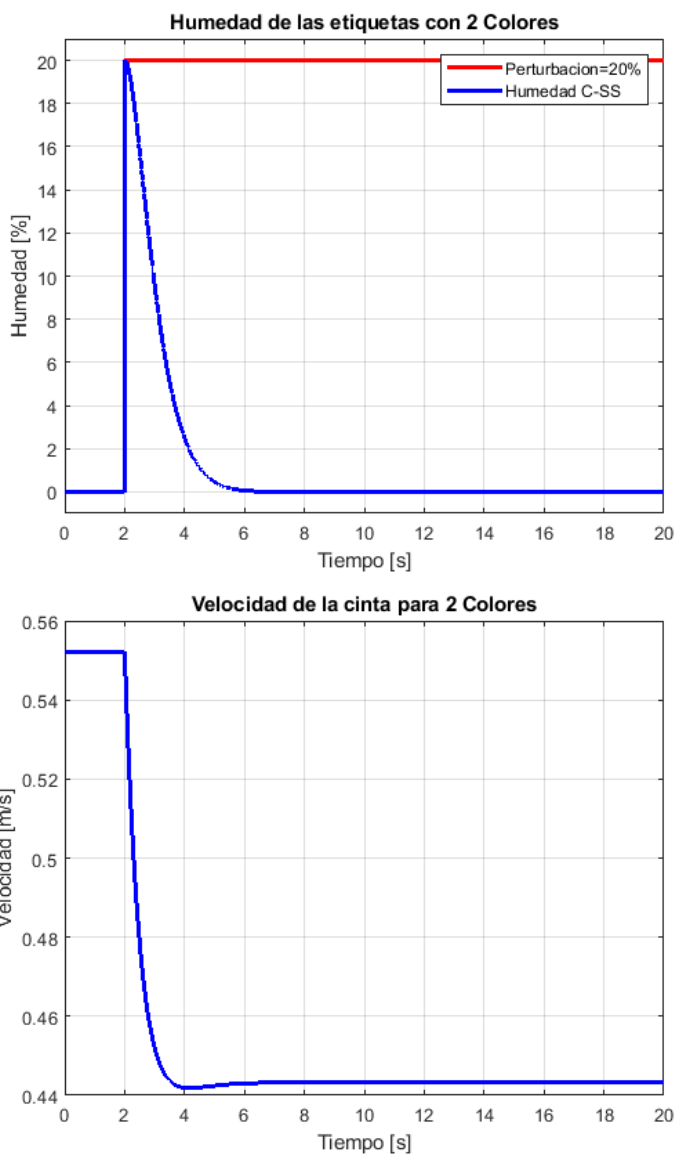


Figura 4.7: Respuesta de humedad y acción de control para 2 colores

Como se puede apreciar en la figura 4.7 una perturbación del 20 % en la salida, es completamente compensada reduciendo la velocidad de 0.5521[m/s] hasta 0.4415[m/s], llevando la humedad de las etiquetas de 2 colores nuevamente a 0%.

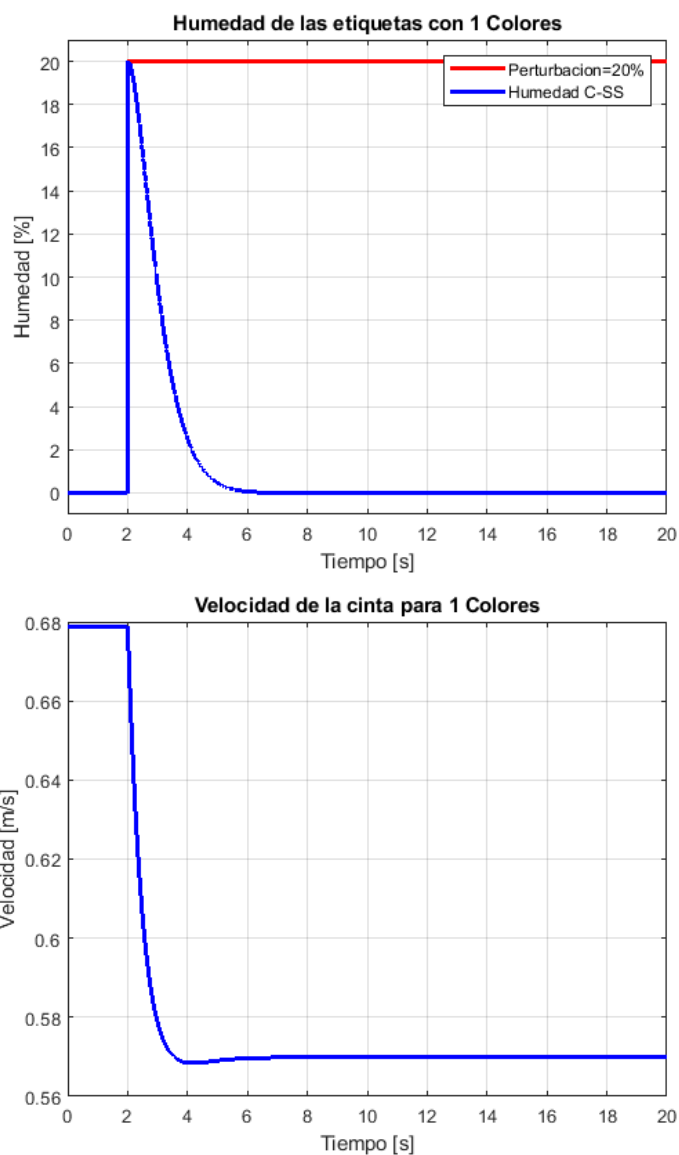


Figura 4.8: Respuesta de humedad y acción de control para 1 color

Como se puede apreciar en la figura 4.8 una perturbación del 20 % en la salida, es completamente compensada reduciendo la velocidad de $0.6787[m/s]$ hasta $0.5676[m/s]$, llevando la humedad de las etiquetas de 1 color nuevamente a 0 %.

4.3. Comparativa de los dos controladores

Finalmente, para poder determinar cuál de los dos controladores tiene el mejor desempeño hay que comparar tanto la respuesta de la planta ante una perturbación, así como la acción de control enviada a la planta.

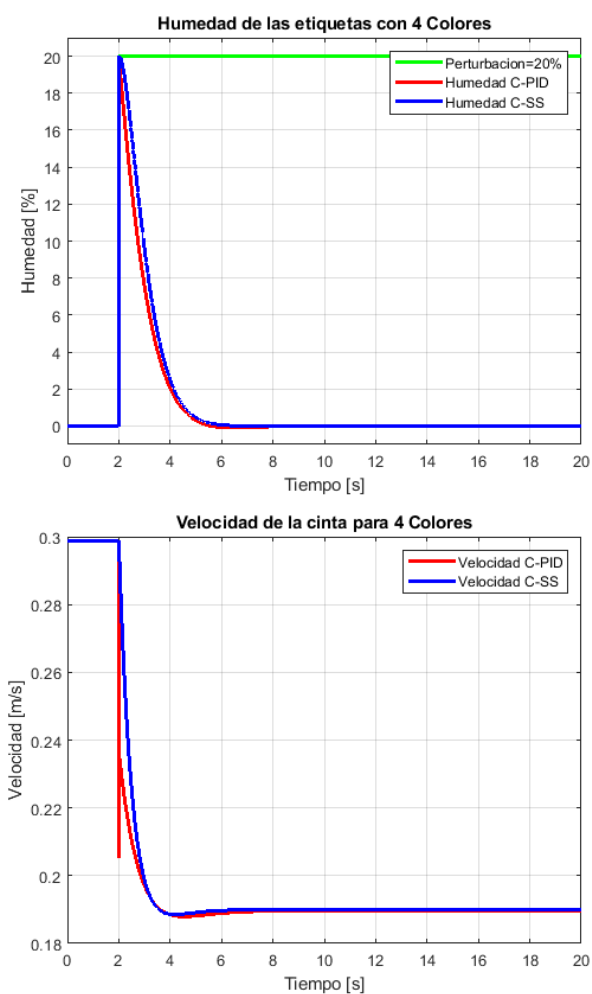



Figura 4.9: Comparativa de ambos controladores para una etiqueta de 4 colores

Conclusiones

CONCLUSIONES

- 1) Se ~~logro~~ modelar el subsistema de desplazamiento relacionándolo con el porcentaje de humedad en las etiquetas, consiguiendo una función de transferencia que logra representar la dinámica del secado respecto a la velocidad de la banda, manteniendo la fuente de calor constante.
- 2) En el presente trabajo se diseñó dos controladores discretos con los cuales se logró homogeneizar el tiempo de secado en 2.88 segundos desde el momento en que es aplicada la pintura, sin importar la cantidad de colores usados sobre la etiqueta, de esta forma se estima que los tiempos de producción de una etiqueta de 1 y 4 colores se reducirían a 25 y 55 minutos aproximadamente, para un rollo de 1000 metros.
- 3) Una vez simulado el comportamiento de los controladores se puede concluir que ambos cumplen los requerimientos del diseño teniendo una respuesta muy similar respecto a la eficiencia de mantener la referencia deseada, sin embargo el controlador de reubicación de polos por variables de estados es más amigable con la planta debido a que la acción de control es suave en

comparación a los picos que presenta el controlador PID, por lo tanto el control por reubicación de polos es el que tiene el mejor desempeño para la planta de secado de etiquetas.

- 4) Con la reducción estimada de los tiempos se conseguiría reducir los costos de producción, ya que la calidad de la etiqueta está estrechamente ligada al secado total de las misma, además que disminuiría los tiempos muertos por comprobación o recalibración por parte de los operarios 
- 5) Es importante tomar en consideración que el controlador al influir sobre la velocidad de desplazamiento de la cinta tiene un límite físico con una velocidad igual a cero, por lo cual para las etiquetas de varios colores una perturbación de más del 60 % no podría ser reducida a 0 % porque la banda se detendría por completo y por ende se quemaría la cinta de etiquetas.

Bibliografía

- [1] “MANUAL BÁSICO DE ARTES GRÁFICAS, Modulo Procesos de Artes Gráficas”, Available in: <http://www.fnmt.es/documents/10179/10589581/20170227-Manual+Artes+Graficas/6ecb61ad-c844-4f7b-9576-38d5e4edf862>
- [2] SHANE WEBER, “Lineatura del rodillo y volumen de celda, determinantes del espesor de la película de tinta”, Escuela Superior Politécnica Del Litoral – Octubre de 2011. Available in: <http://www.elempaque.com/temas/Lineatura-del-rodillo-y-volumen-de-celda,-determinantes-del-espesor-de-la-pelicula-de-tinta+5084971>
- [3] “Flexografía”, 2017. Available in: <https://www.flexografia.com/queeslaflexografia>.
- [4] MIKE LAWRENCE, “Oportunidades en flexografía en línea, Available in: <http://www.elempaque.com/temas/Oportunidades-en-flexografia-en-linea+5065342>
- [5] WILMER CARVAJAL, “Cómo se compone una máquina flexográfica de tambor central”, Available in: <http://www.elempaque.com/blogs/Como-se-compone-una-maquina-flexografica-de-tambor-central+120396>
- [6] GÓMEZ, JUAN CARLOS, “Identificación de sistemas”, 2006.

- [7] KUNUSCH, C., *“IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS DINÁMICOS”*, Universidad Nacional de la Plata, Cátedra de control, 2013.
- [8] VALLEJO, R., *Identificación paramétrica de sistemas dinámicos*. Revista Científica Ingeniería y Desarrollo, 2011, no 2, p. 10-22.
- [9] AUTYCOM, A. C., *Tipos de sensores industriales y características* — AUTYCOM. Available in: <https://www.autycom.com/tipos-de-sensores-industriales/>
- [10] ROBOTICA, *“Actuadores ¿Qué son? y tipos”*, Siemens , 2015. Available in: <http://roboticaaleixandre4a.blogspot.com/2012/06/7-actuadores-que-son-y-tipos.html>
- [11] OGATA, K., *“Ingeniería de control moderna”*, Madrid, España, Pearson Educación, 2003