

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**MODERNIZACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DEL
HEADBOX DE UNA MÁQUINA FOURDRINIER PARA
FABRICACIÓN DE PAPEL**

INFORME DE INGENIERIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE

INGENIERO ELECTRÓNICO

PRESENTADO POR

JULIAN RAZÓN ANGULO

PROMOCIÓN 1974-II

LIMA-PERU

2003

A mis padres Leoncio y Violeta,
A mi esposa Estrella y mis hijos
Noemí y Moisés, por su apoyo y
Estímulo para la culminación de
Este proyecto.

A Dios(Pr. 3:6)

Cuya definición es:

Yo Soy el que soy (Ex. 3:14)

De quien los cielos

cuentan su gloria y el firmamento
anuncia

la obra de sus manos (Sal. 19.1)

**MODERNIZACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DEL
HEADBOX DE UNA MÁQUINA FOURDRINIER PARA
FABRICACIÓN DE PAPEL**

SUMARIO

El presente informe de ingeniería trata de la modernización del sistema de control de presión y nivel del headbox de una máquina Fourdrinier para fabricar papeles y cartones.

Se ha hecho el modelamiento matemático completo del sistema de control, y se ha determinado el rango de valores del parámetro “ r ”, que representa la relación de velocidades de jet a tela para conseguir fabricar papel de calidad. Para determinar el rango de “ r ”, se ha empleado la curva de menor consistencia (0.41%) de la Figura 3.6, denominada The Effect of Headbox Flow and Jet Speed on Tensile Ratio with the Fourdrinier/Belbond Wet End Arrangement, del manual de la firma inglesa Beloit Corporation-Bolton Research Centre – Bolton – England.

Se ha obtenido como resultado un sistema de control estable respecto del original, mejorando la calidad del papel extensible clupak, lo que ha sido posible reemplazando el sistema de control neumático por otro electrónico basado en un control por PLC.

El sistema viene operando satisfactoriamente desde 03/02/2000 a la fecha con los siguientes beneficios: incremento del tiempo efectivo de producción de máquina, incremento de la producción e incremento de su capacidad en el control de calidad.

INDICE

PRÓLOGO	1	
CAPITULO I		
DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO		
DE UNA MODERNA FABRICA DE PAPEL	4	
1.1	Introducción	4
1.2	Área de planta pulpa	6
1.2.1	Sistema de tratamiento de bagazo	6
1.2.2	Sistema de digestión	6
1.2.3	Sistema de lavado y zarandeo	7
1.3	Área de máquina papelera	8
1.3.1	Planta preparación de fibra secundaria y pulpa kraft importada	8
1.3.2	Preparación de pasta stock para la producción de papeles en la máquina papelera Fourdrinier	10
1.3.3	Máquina Papelera Fourdrinier: formación del papel. Extremo húmedo de la maquina papelera Fourdrinier (Cabezal distribuidor, headbox, tela Fourdrinier). Sección prensas. Extremo seco (sección secado y sección calandria). Rebobinadota.	19 20 28 29 31

CAPITULO II

SISTEMA DE CONTROL NEUMÁTICO ORIGINAL Y SU

PROBLEMÁTICA	32
2.1 Introducción	32
2.2 Sistema de control neumático original del headbox (1968)	35
2.2.1 Control neumático original de nivel del headbox (1968)	36
2.2.2 Control neumático original (1968) de la presión total del headbox .	37
2.3 Problemática del sistema de control original del headbox (1968)	40
2.3.1 Ensayos para determinar las causas de inestabilidad del sistema de control original del headbox (1968) y primer cambio	42
2.3.2 Segundo intento de estabilización al sistema de control neumático original del headbox (1968) y segundo cambio.	45
Fundamento teórico (a,b) aplicado al segundo cambio del sistema de control original del headbox (1968).	48

CAPITULO III

MODERNIZACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DEL HEADBOX

EMPLEANDO TECNOLOGÍA MODERNA	57
3.1 Introducción	57
3.2 Criterios usados para elegir la variable de proceso que permita controlar el parámetro “ r ”	58
3.2.1 Mejorar la propiedad física de resistencia a la tensión en dirección maquina y dirección transversa en el papel extensible clupak	58
3.2.2 Determinar la variable del proceso con mayor amplitud de variación que nos permita controlar mejor el parámetro “ r ”	61

3.3	Sensibilidad de los transmisores de presión diferencial para el control de presión del headbox.	71
3.3.1	Sensibilidad del transmisor neumático de presión diferencial para el control de presión del headbox	75
3.3.2	Sensibilidad del transmisor electrónico de presión diferencial del control de presión del headbox usando un PLC	78
3.4	Diseño del sistema de control electrónico de presión total y nivel del headbox	82
3.4.1	Modelamiento matemático para el sistema de control electrónico de presión total del headbox	82
3.4.2	Modelamiento matemático para el sistema de control de nivel	92
3.4.3	Implementación del sistema de control automático de presión total del headbox que establece la relación del parámetro “ r_p ” de velocidades de jet a tela, usando un PLC	94
3.4.4	Implementación del sistema de control automático de nivel de la pulpa en suspensión en el headbox, usando PLC	103
3.4.5	Sistema de control SLC 500.	107

CAPITULO IV

COSTOS	119	
4.1	Introducción	119
4.2	Costos de la implementación del sistema de control	119
4.3	Costo de capacitación de los ingenieros en la programación y operación del PLC Allen Bradley SLC500: 5/03	119
4.4	Costos de la puesta en operación del sistema de control	120

4.5 Costo total del proyecto	121
CONCLUSIONES	122
ANEXO A: LISTADO DEL PROGRAMA DEL SISTEMA DE CONTROL DEL HEADBOX, EN LENGUAJE LADDER	
BIBLIOGRAFÍA	

PRÓLOGO

Desde su invención, por los chinos por el año 105 hasta fines del siglo XVII, el papel había sido hecho en forma manual, hoja por hoja.

El artesano sumergía un cedazo rectangular en la batea que contenía la suspensión uniforme de pulpa obtenida por agitación, retirándola dejaba drenar el agua a través de la malla, obteniendo una hoja de pulpa húmeda, que retiraba del cedazo rectangular oprimiéndolo con un trozo de paño o fieltro absorbente, al cual se adhería, poniendo las hojas sobre trozos de fieltro grande los pasaba por una prensa, quitando el exceso de agua por prensado. Finalmente, retirando las hojas de papel las secaba al aire libre.

Históricamente, el primer sistema mecánico ideado por el hombre para formar la hoja, fue inventado por el francés Nicolás Louis Robert en 1799, posteriormente desarrollado por L. Didot, B. Donkin y J. Gamble. Antes de tener éxito comercial. Actualmente este sistema se conoce como máquina fourdrinier de papel, nombre que recibió después de que los hermanos Fourdrinier, Henry y Saly, compraron los intereses de la patente de Didot y Gamble en 1804 y luego promovieron su posterior aplicación y desarrollo.

Desde entonces, muchas e importantes adiciones se han hecho a los conceptos originales, los cuales han dado como resultado aumentos significantes en el tamaño y velocidad de las máquinas Fourdrinier. Pasando de la maquinita de movimiento a manivela, ideado por el francés M. Louis Robert que producía una cinta de papel de

unos 60 cm. de ancho a una máquina Fourdrinier de producción continua con la cual se hizo tradicional fabricar papeles desde comienzos del siglo XIX hasta mediados de 1970. Las modernas máquinas de producción continua alcanzan velocidades de 500-1000 m/min. Tienen un ancho de 5-10 metros para fabricar papeles finos de alto gramaje, papel kraft y papel para revistas y velocidades 300-600 m/min con un ancho 4-8 metros para fabricar papeles de alto gramaje y cartones.

Estas máquinas logran una buena hoja de papel, que empieza obteniéndose en una caja de entrada (headbox) a partir de una suspensión en agua de pequeñísimas fibras celulósicas en condiciones óptimas, para cada tipo de papel fabricado. La caja de entrada (headbox) tiene un diseño especial de alta ingeniería Hidrodinámica para darle a la banda de papel fabricada propiedades físicas por la distribución y orientación de las fibras de celulosa contenidas en el fluido que se deposita sobre la tela desde el headbox.

El control del parámetro “ r ” o relación de velocidad jet (V_j) a velocidad de tela (V_w), permite lograr el objetivo de dar orientación adecuada a las fibras de celulosa, tanto en dirección máquina como en dirección transversa, actuando sobre la velocidad del chorro de pasta relativa a la velocidad de la tela, al asentar el chorro de pasta sobre la tela.

Para su elaboración, el presente informe de ingeniería se ha dividido en los siguientes capítulos:

En el Capítulo I, se hace la descripción del proceso de la elaboración de la fibra celulósica que usa el papel partiendo del bagazo de la caña de azúcar como materia prima.

En el Capítulo II, se hace un análisis de los problemas del sistema de control original del headbox, para determinar las causas de la inestabilidad del sistema.

En el Capítulo III, se hace el modelamiento y diseño de un nuevo sistema de control de lazo cerrado, superándose las causas de inestabilidad del sistema original, usando tecnología de punta.

En el Capítulo IV, se muestran los costos del proyecto.

Adicionalmente se presenta un anexo, conteniendo el listado del programa de control, en lenguaje ladder para el PLC empleado como controlador. También, presenta las conclusiones y bibliografía.

CAPITULO I

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO DE UNA MODERNA FABRICA DE PAPEL

1.1 Introducción

En este proyecto se considera una fábrica de pulpa y papel que tiene una maquina Fourdrinier como se ilustra en la figura 1.1. El proceso de fabricación es similar para todos los gramajes de papeles fabricados: papel corrugado nacional y de exportación, papel clupak para bolsas de cemento y azúcar, cartón liner y otros en su formulación intervienen fibras de pulpa de bagazo, fibras Kraft importado y/o papel reciclado previamente tratado.

La pulpa de bagazo es fabricada en el área de planta de pulpa a partir del bagazo de caña de azúcar. El proceso es diseñado para producir pulpa con características especiales llamada pulpa K_{30} y K_{23} . La pulpa Kraft es comprada de importación, y la pulpa de papel reciclado comprado en el mercado nacional, son procesados antes que éstos puedan alimentar a la máquina de papel, dichos procesos y lo que sigue se realiza en áreas definidas de la planta : Área planta de pulpa y Área de máquina papelera.

En el Área de planta Pulpa se fabrica pulpa a partir del bagazo de caña de azúcar siguiendo las etapas de tratamiento de bagazo, digestión, lavado y zarandeo, que es el proceso diseñado para producir pulpa con características especiales llamada pulpa K_{30} y K_{23} .

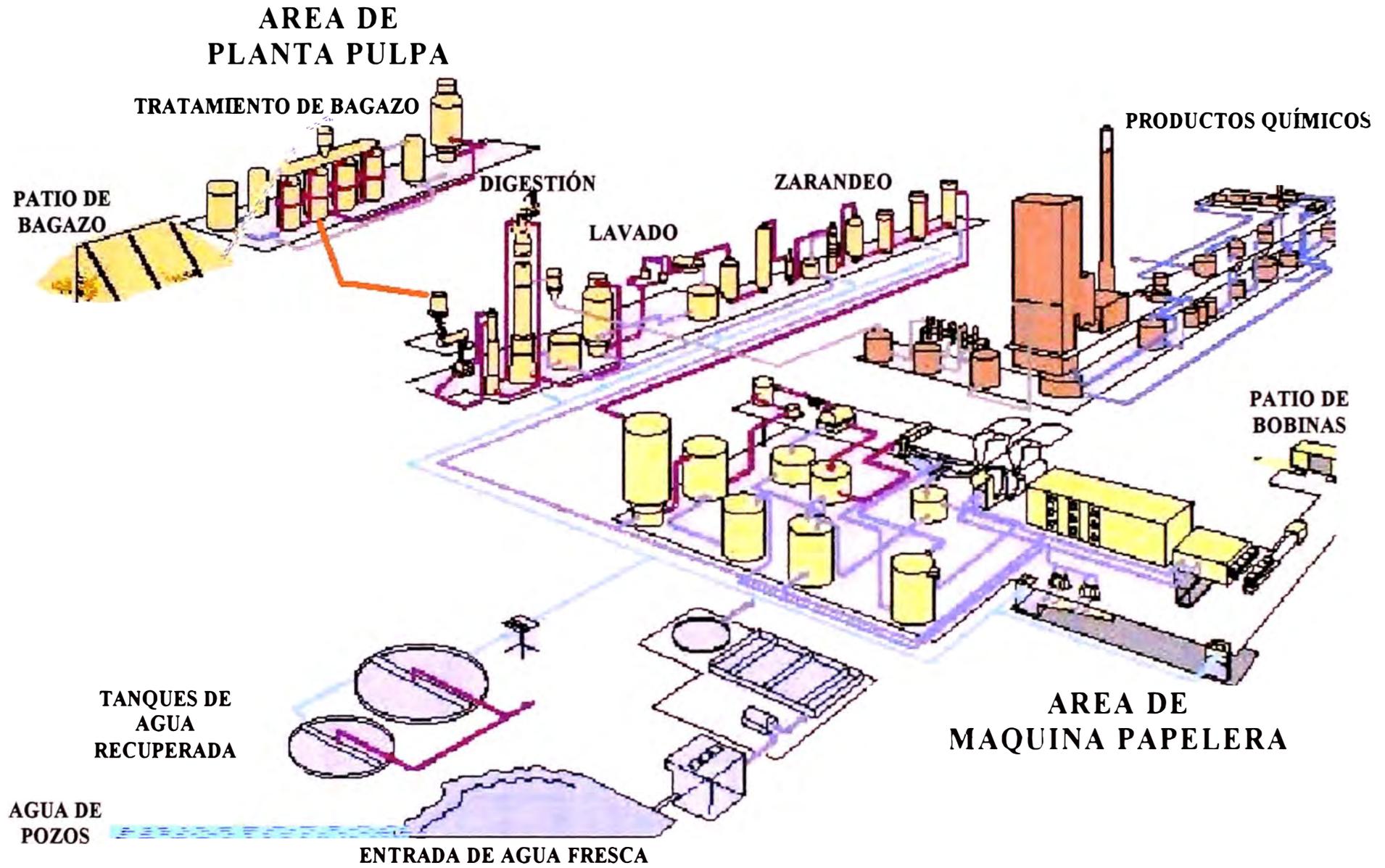


Figura 1.1. Diagrama General de una Planta Industrial de Pulpa y Papel

En el Área de máquina papelera se hace la preparación stock y se encuentra la máquina para producir papeles de gramaje variable.

Aquí se prepara la pulpa comprada en el mercado nacional o extranjero realizando el tratamiento de fibras, y se realiza la preparación de pulpa stock que entrará a la máquina papelera Fourdrinier.

A continuación se describe cada una de dichos procesos.

1.2 Área de planta pulpa

1.2.1 Sistema de tratamiento de bagazo

Esta planta utiliza el bagazo de la caña de azúcar que proviene de los ingenios azucareros que se transporta mediante camiones a la fábrica, donde se almacena en un patio de losa de concreto. De allí el bagazo es llevado a un alimentador rotativo principal y de éste al transportador de faja; luego al transportador de paletas y de allí mediante alimentadores rotativos a las tinas de lavado para eliminar materiales pesados como arena, fierros, etc. y solubles que acompañan al bagazo y luego pasa a los molinos desmeduladores que tratan mecánicamente al bagazo en húmedo, donde por acción de la fuerza centrífuga se separa la fibra útil del polvillo, el polvillo es enviado al desagüe, mientras la fibra continúa al sistema de digestión.

1.2.2 Sistema de digestión

El bagazo desmedulado (fibra), procedente del área de tratamiento de bagazo, se transporta al sistema de digestión por medio de una faja transportadora, pasa por el gusano impregnador donde el bagazo se impregna de licor, y de allí al gusano alimentador, que lo comprime e introduce a un digestor para el cocimiento continuo a presión de vapor, donde se añade soda cáustica y licor residual calentando bajo

presión de vapor y manteniendo así durante un tiempo, luego pasa a otro digestor de menor presión y así de menor temperatura.

En estas dos etapas de cocimiento por acción del vapor y la soda cáustica son disueltos la lignina y ceras de la fibra de bagazo y el número Kappa ha sido disminuido, a la salida de los digestores se cuenta con desfibradores para abrir los haces fibrosos obteniéndose una **pulpa semiquímica**, dejando libre las fibras de celulosa individuales que han sido separadas una de otra quedando en suspensión en el licor que finalmente pasa a un tanque de soplado donde está lista para ser lavado. La lignina residual le da color marrón a la pulpa de bagazo.

El tamaño y la forma de las fibras son un factor importante en determinar las propiedades físicas del papel, como se ilustra en la figura 1.2.

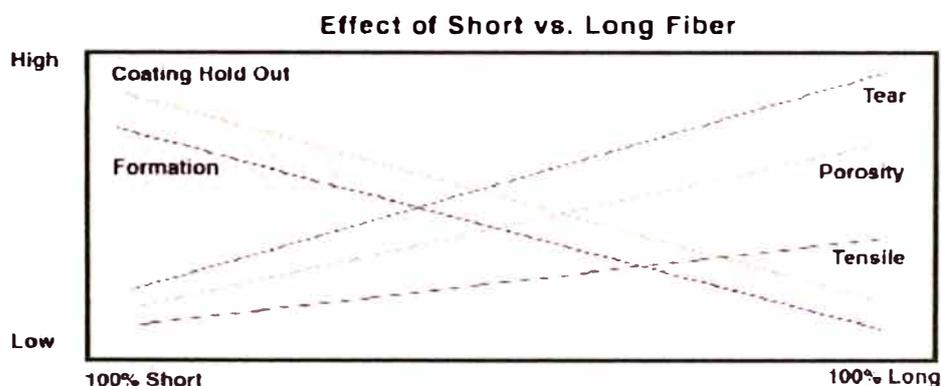


Figura 1.2. Efecto del tamaño de las fibras, cortas y largas, sobre las propiedades físicas del papel

Una hoja de papel fabricado principalmente con fibras largas es típicamente una hoja fuerte sin embargo no muy suave.

Una hoja hecha principalmente con fibras cortas es típicamente una hoja suave pero no muy fuerte.

1.2.3 Sistema de lavado y zarandeo

Después del proceso de cocimiento queda el licor negro de la

deslignificación, cenizas y fibras (palitos) que han resistido el cocimiento y la actividad química.

El licor negro de la digestión es separado de las fibras en la etapa de lavado por lo cual la pulpa del tanque de soplado diluido con licor negro reciclado, es bombeado al sistema de lavadoras, que consiste de tres tambores de mallas finas arregladas en serie, rotatorios, al vacío con pierna barométrica, donde el licor negro de la digestión es separado de las fibras, removiendo así la fibra de las impurezas.

La pulpa viene a ser limpia después de cada etapa de lavado y el licor, viajando en la dirección opuesta, viene a ser más y más concentrado.

Finalmente, la pulpa lavada es la K_{30} que es diluida con agua de máquina y enviada a la etapa de zarandeo en donde son eliminados las fibras (palitos) que han resistido el cocimiento y la actividad química de la digestión, la pulpa que se obtenga es la pulpa K_{23} y de allí la pulpa pasa a los tanques de alta densidad de donde será usado a la máquina papelera.

Para ciertos tipos de papel la pulpa lavada pasa a los tanques de alta densidad sin ir a la etapa de zarandeo.

La figura 1.3, muestra un flujograma de planta de pulpa.

1.3 Área de máquina papelera

1.3.1 Planta preparación de fibra secundaria y pulpa kraft importada

Preparación de fibra secundaria.

El papel usado es puesto sobre la faja transportadora hacia el pulpeador Black Clawson en donde se disgrega la fibra secundaria o desperdicio a baja consistencia y luego se bombea a una serie de limpiadores centrífugos empezando en un ciclón para

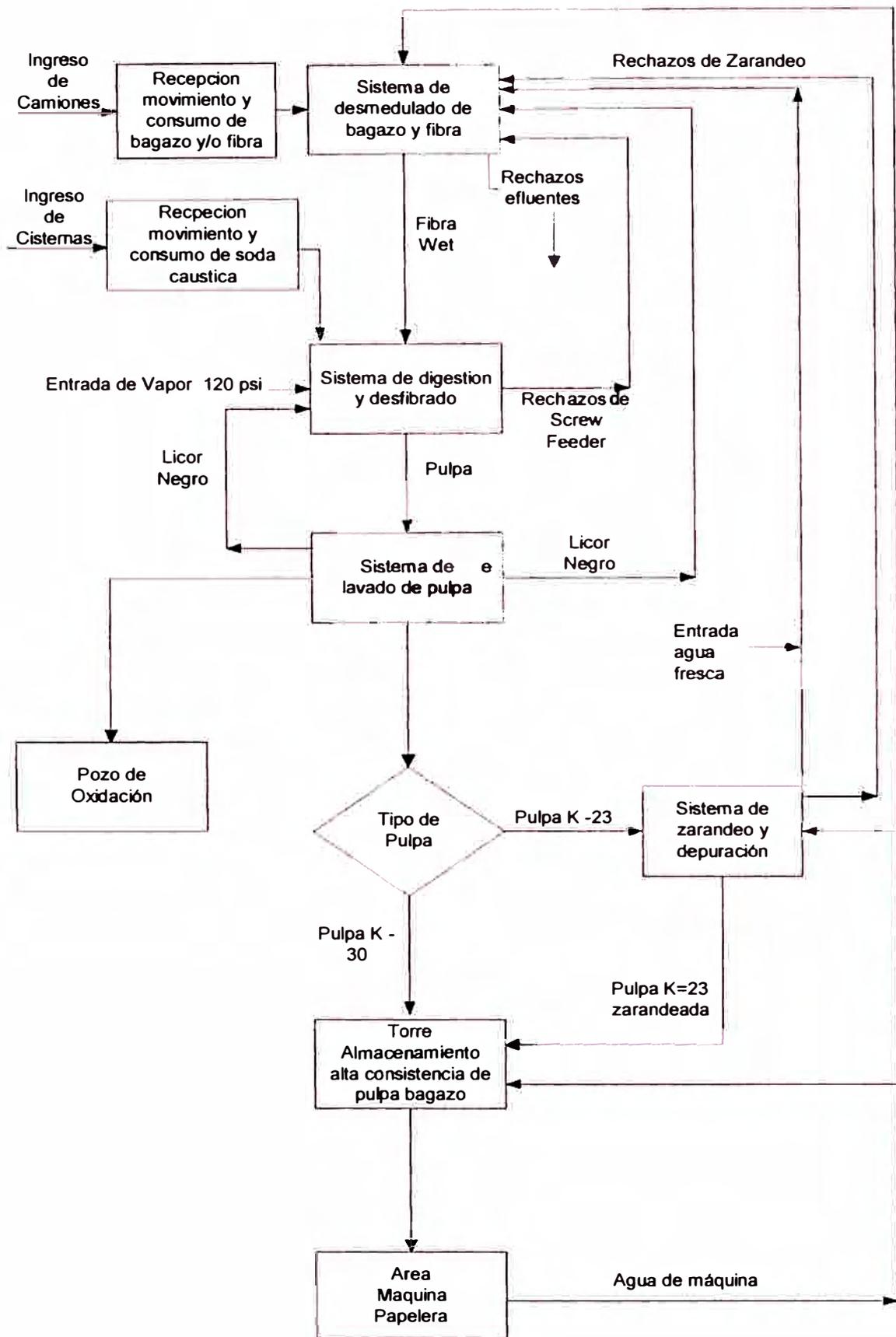


Figura 1.3. Flujograma de Planta de Pulpa

separar las partículas pesadas como arena y luego pasa a otros limpiadores de alta consistencia, zarandas presurizadas y tres espesadoras en paralelo. De donde la pulpa a mayor consistencia es almacenada en tanques de stock, para luego ser bombeado a la torre de almacenamiento de fibra secundaria de donde pasa a la máquina papelera.

Preparación de pulpa Kraft importada

El tratamiento de la fibra importada se hace en un pulpeador Grubbens de donde pasa a una torre de almacenamiento de pulpa kraft importado de donde será bombeada a la máquina papelera.

La figura 1.4 muestra el diagrama simplificado de la planta preparación de fibra secundaria y pulpa kraft importada.

La figura 1.5 muestra un diagrama de flujo del sistema de preparación de fibra secundaria y pulpa kraft importada.

1.3.2 Preparación de pasta stock para la producción de papeles en la máquina papelera Fourdrinier

Para obtener la pulpa stock exacta correspondiente a cada gramaje de papel, esta se prepara siguiendo tres etapas

La primera y segunda preparación de pasta stock y luego el flujo de pulpa stock para la producción de máquina papelera.

Con todo el equipo empleado al en esta área se logra suministrar un flujo y consistencia controlada de pasta, a la máquina de papel, con la calidad y formulación de pasta para cada tipo de papel.

La figura 1.11, muestra un diagrama de flujo de la preparación de pasta stock para producción de la máquina papelera.

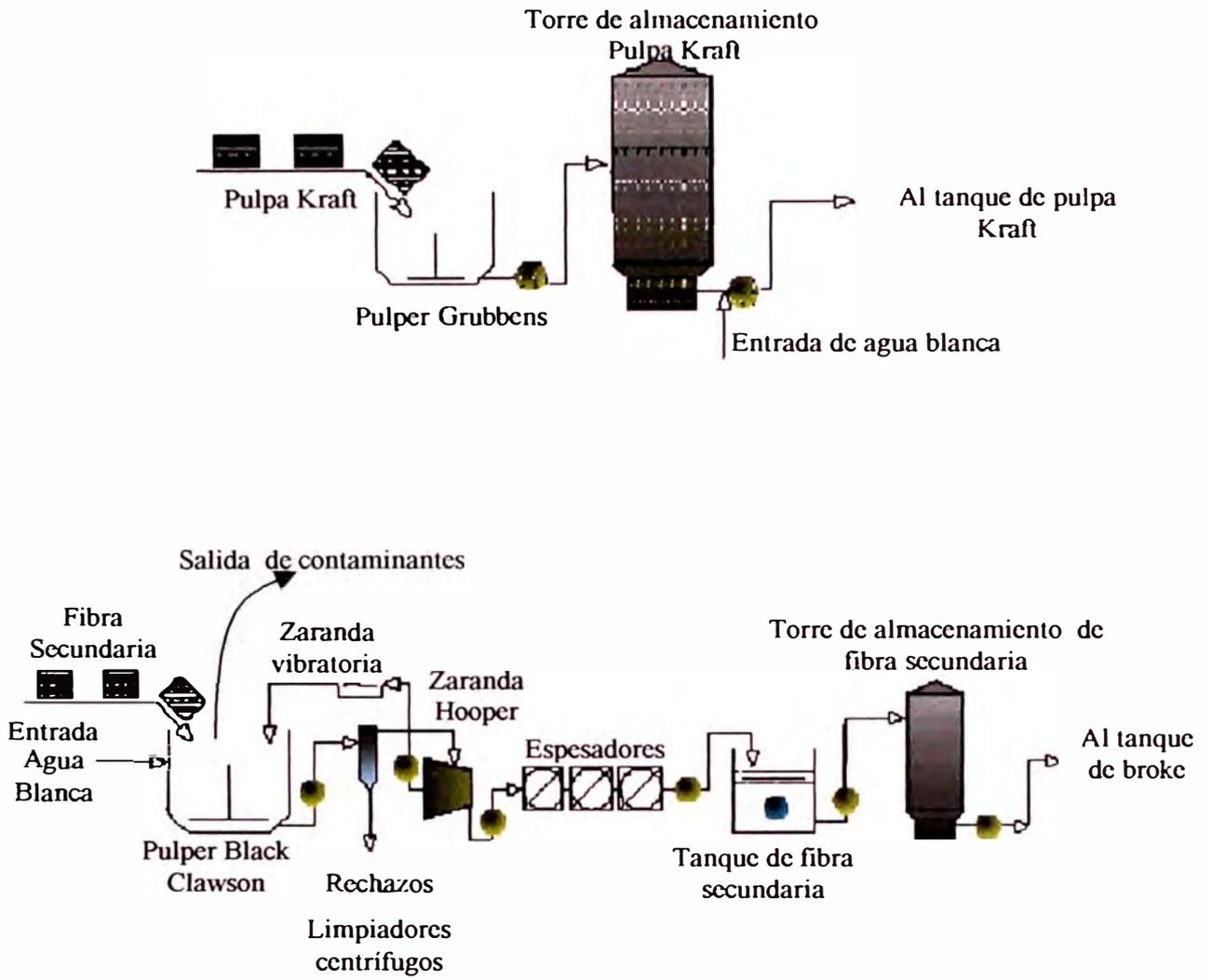


Fig. 1.4: Diagrama simplificado de la planta preparación de Fibra secundaria y Pulpa Kraft importada

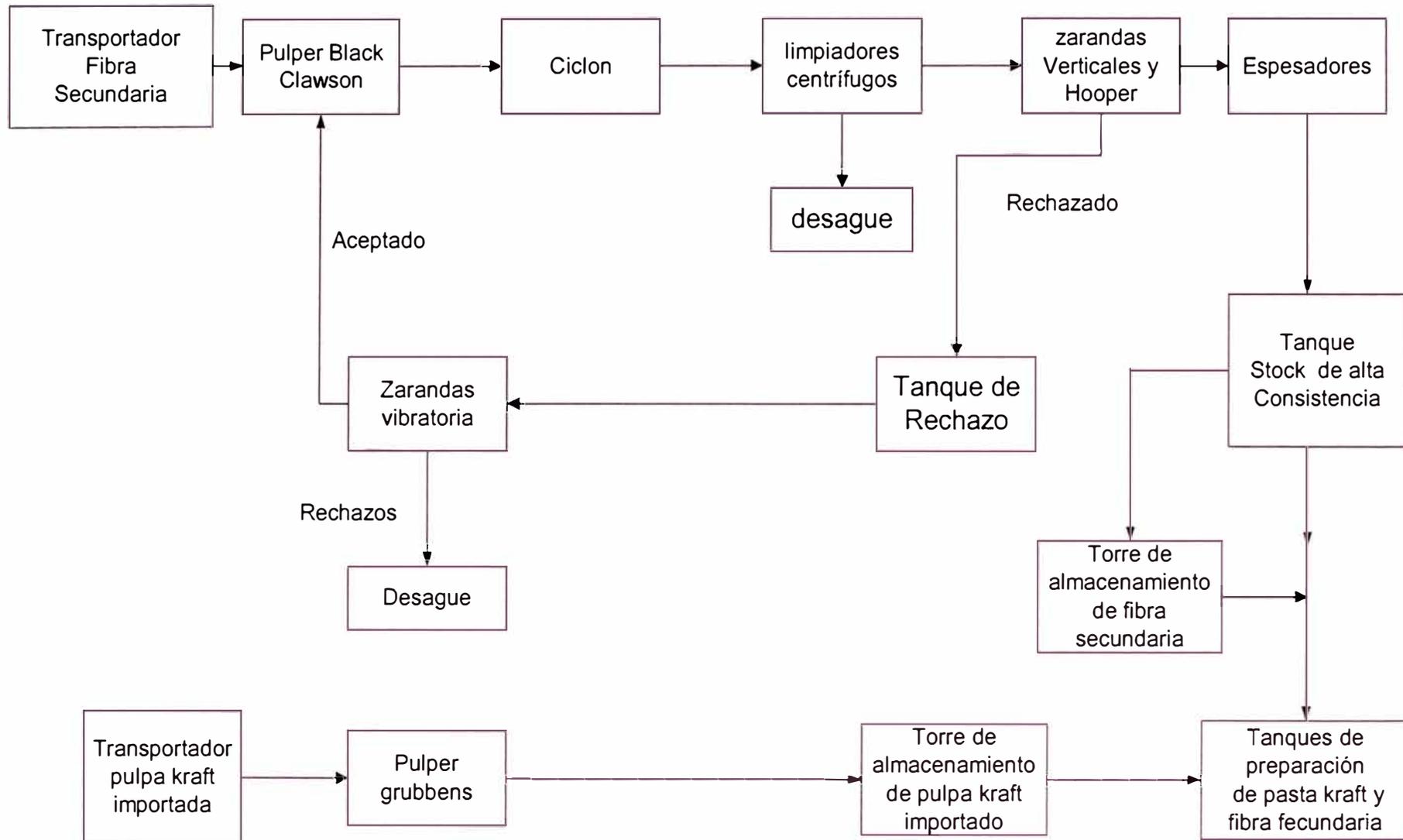


Figura 1.5. Diagrama de Flujo del Sistema de preparación de Fibra Secundaria y Pulpa Kraft Importada

Primera preparación de pasta stock

La preparación de pasta stock como se muestra en la figura 1.7 consiste en tener pulpa preparada, sea ya tomando pulpa de bagazo desde planta de pulpa o tomando pulpa importada kraft o pulpa de fibra recuperada desde la planta de preparación de fibra secundaria y pulpa importada. Después cada una es preparada en diferentes tanques de mezcla y llevada a los refinadores de discos para el tratamiento mecánico apropiado abriendo los haces fibrosos para desarrollar la calidad deseada del papel, antes de enviarlo al tanque de máquina para la mezcla final, antes del flujo requerido hacia la máquina papelera.

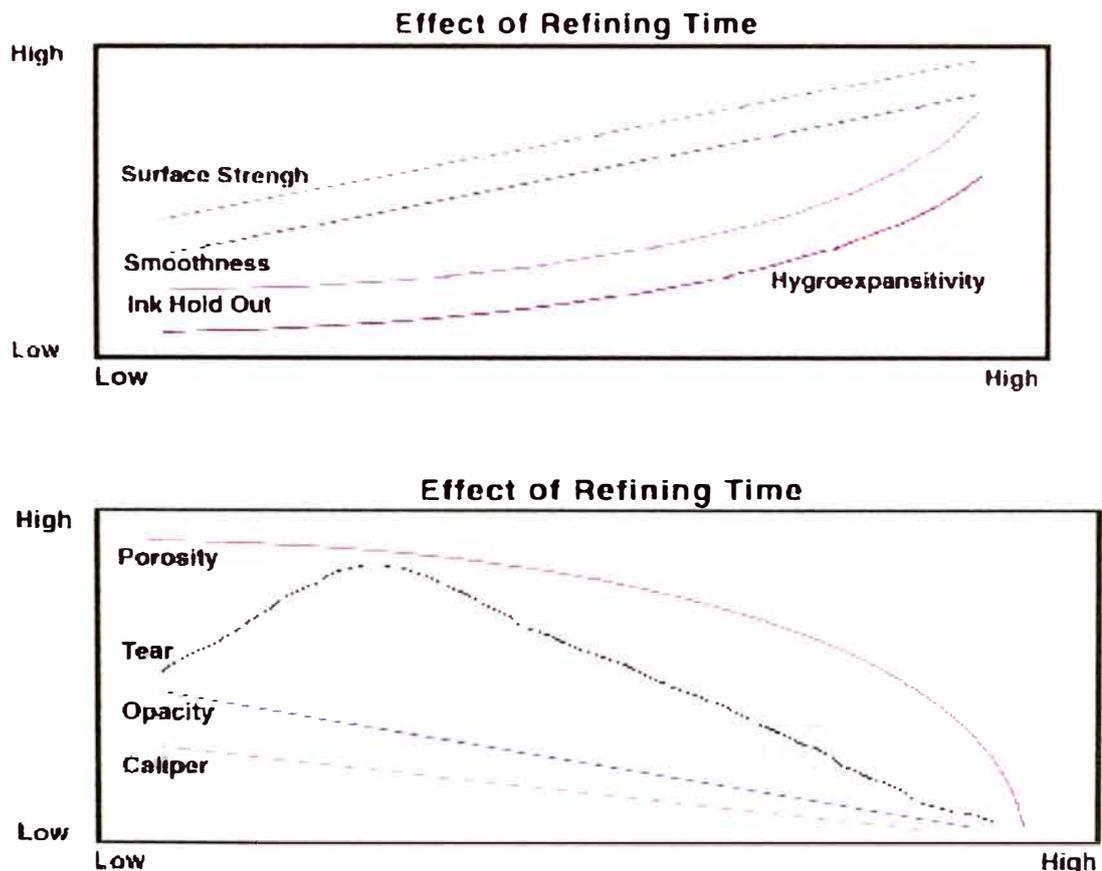


Figura 1.6. Efecto de la refinación sobre las propiedades físicas del papel

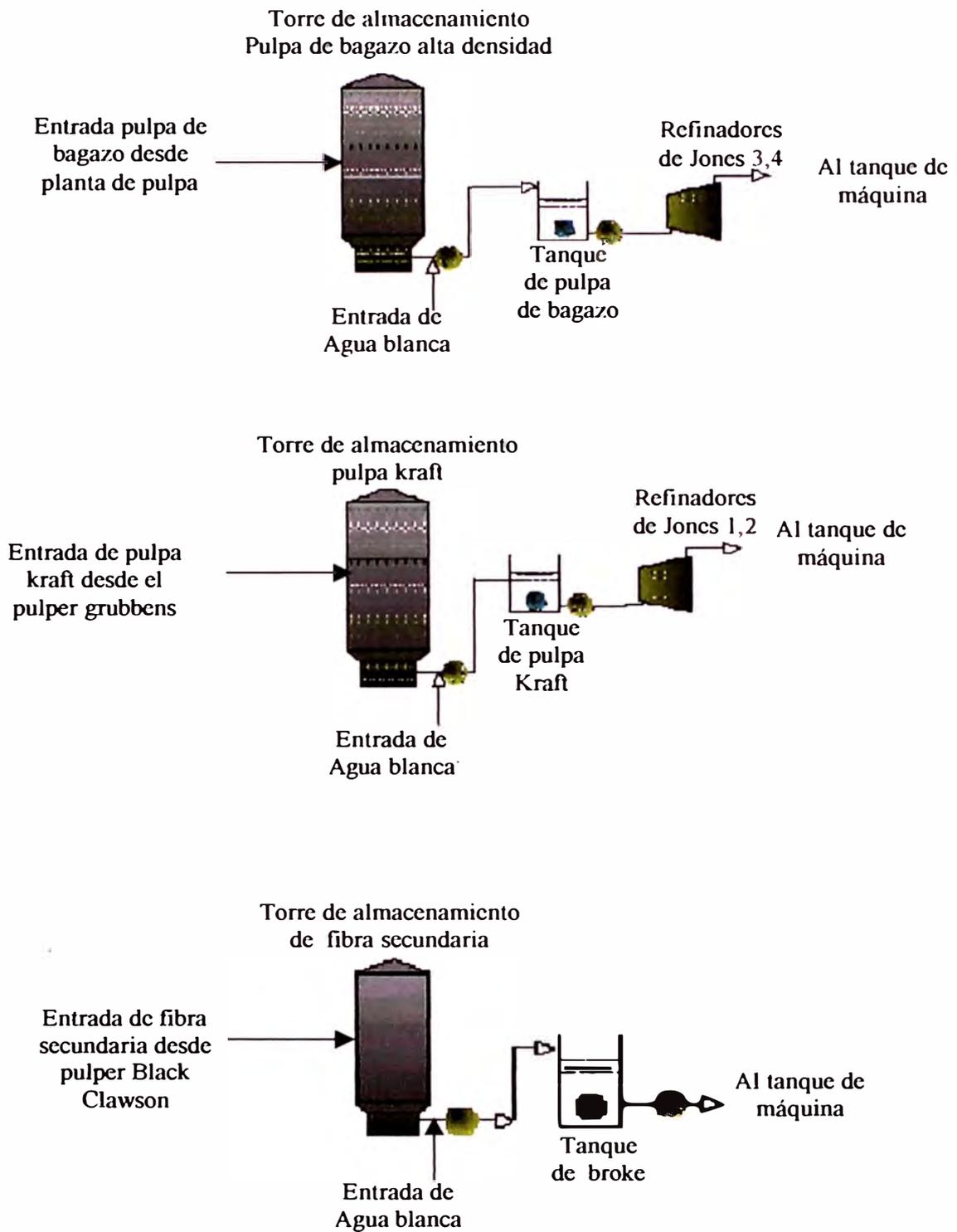


Figura N° 1.7. Primera preparación de pasta stock

El papel hecho de un stock bien refinado es fuerte, denso, y duro en textura, mientras que el papel hecho desde un stock no refinado es bajo en fuerza, blando, poroso y inadecuado para la mayoría de los usos.

Segunda preparación de pasta stock

Como se muestra en la figura 1.8 después que la pulpa ha pasado de las primeras etapas de preparación, ésta es bombeada al tanque de mezcla en el tanque de máquina. Esta es mezclada con pulpa de fibra recuperada y broke procedente de la máquina papelera. Además ésta es bombeada al tanque de máquina para la exacta determinación de la pulpa a 3-3.5% como mezcla final, en cantidades definidas por la formulación según el tipo de papel a producirse. La bomba del tanque de máquina lleva la pulpa a la primera etapa de la máquina papelera, la circulación corta o flujo de operación (maniobra).

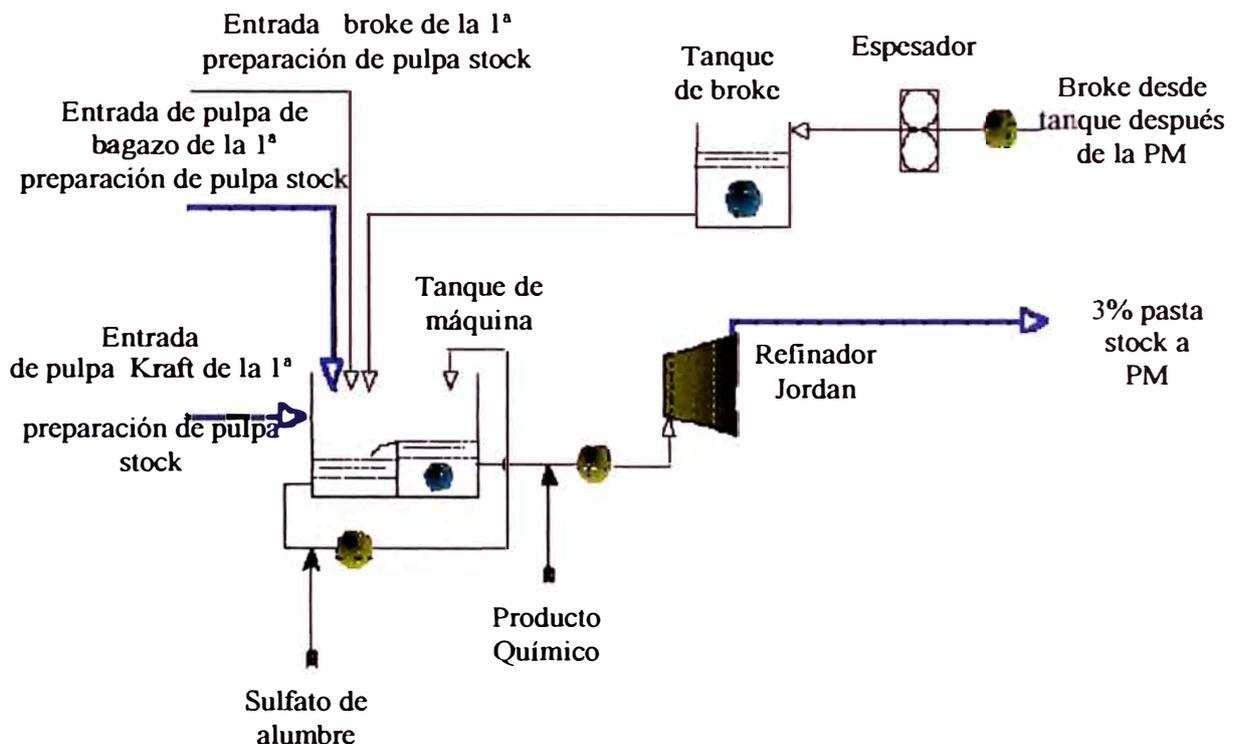
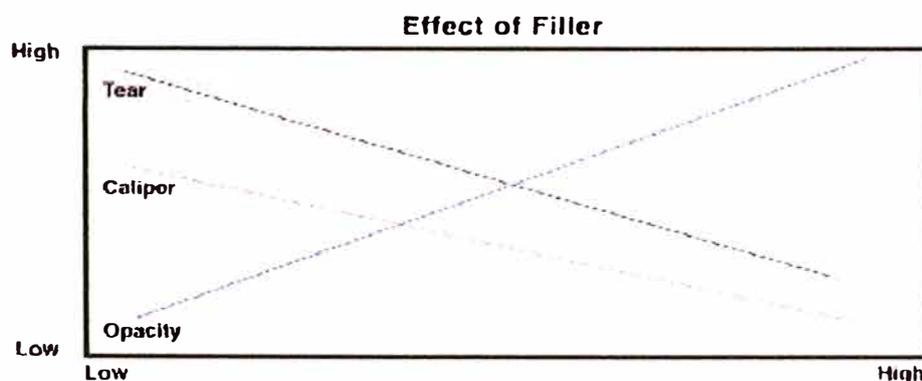


Figura 1.8. Segunda preparación de pasta stock

Flujo de pulpa stock para producción de la máquina papelera

Como se muestra en la figura 1.10, después de la preparación de pasta de stock esta ha de ser limpiada de contaminantes que podría haber entrado a la mezcla final.

Esto es echo en el flujo de operación del tanque de máquina bombeado hacia el pozo de tela donde ésta es diluida desde 3% a 0.7-1.2% con agua blanca. El agua blanca proviene de la tela. La mayor parte del flujo consiste de agua blanca. El stock diluido pasa por los limpiadores centrífugos para quitar las impurezas que contiene. La bomba del headbox (o bomba FAN) conduce el stock a través de una zaranda antes que ésta entre al headbox y descargue sobre la tela. Así el resultado de la mezcla de uno o más tipos de pulpa, y materiales no fibrosos tales como encolado, rellenos, colorantes y aditivos para papeles de características especiales es entonces llamado “stock”. El agua blanca es rápidamente drenada a través de la tela y conducida a través de la bandeja de tela al pozo de tela. El nivel de líquido en el pozo de tela tiene que estar a altura constante para asegurar constante la entrada de presión a la bomba FAN. El exceso de agua blanca se toma para toda la planta.



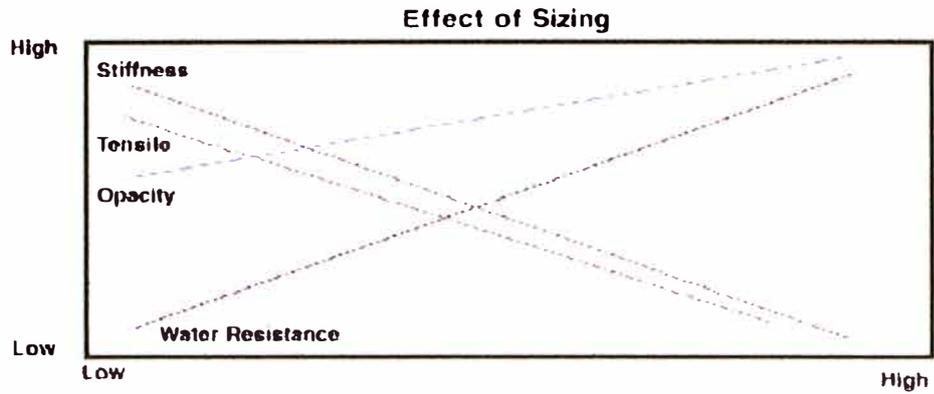


Figura 1.9. Efecto del material no fibroso como relleno y encolado sobre las propiedades físicas del papel.

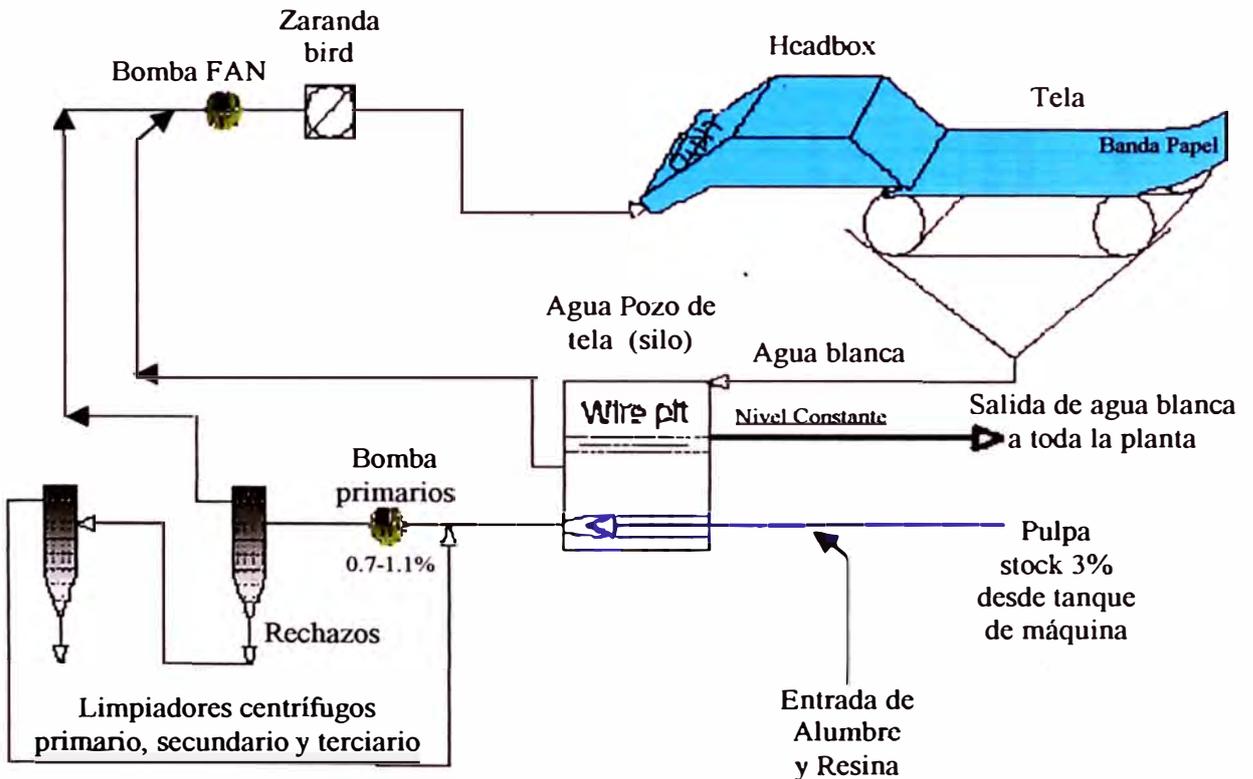


Figura 1.10. Flujo de pulpa stock para producción de la máquina papelera

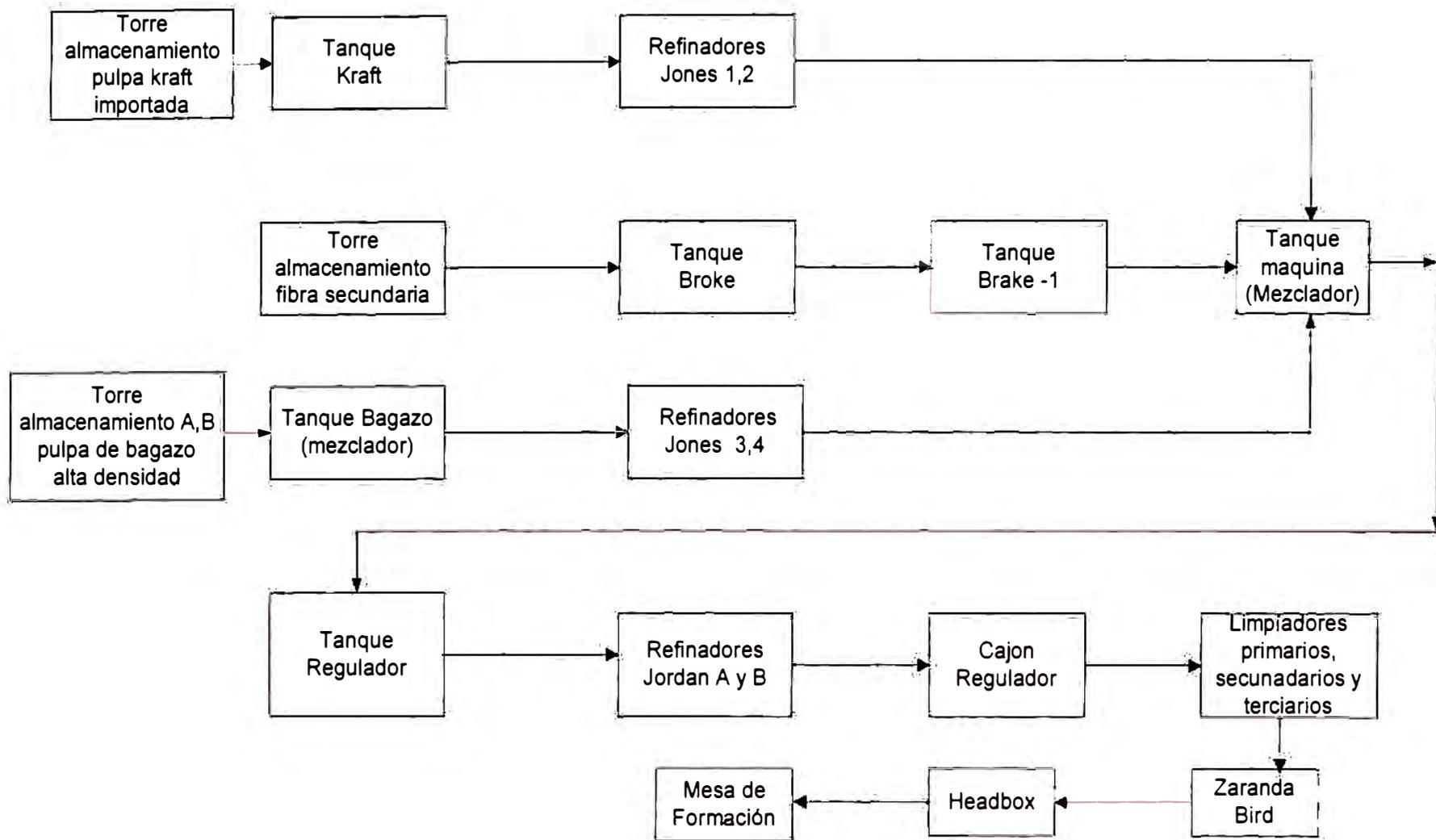


Fig.1.11. Diagrama de Flujo de la preparación de pasta stock para la producción de la máquina papelera

1.3.3 Máquina papelera Fourdrinier: formación del papel

La máquina para fabricar papel inventada por el Francés, Nicolás Louis Robert en 1798, desarrollado en Inglaterra por Brian Donkin y por los hermanos Henry y Sealy Fourdrinier, no estuvo en operación sino hasta 1804. La máquina Fourdrinier puede ser considerada en tres secciones: extremo húmedo, sección prensas, extremo seco (sección secado, y sección calandria), como se ilustra en la figura 1.12:

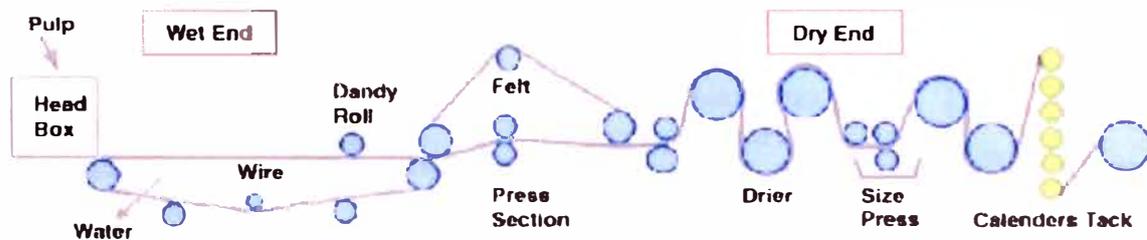


Figura 1.12 Esquema simplificado de la máquina Fourdrinier

La formación de papel stock empieza en el extremo húmedo de la máquina de papel con la pulpa diluida por sobre del 98% de agua y termina en la bobinadora con un 6.5% de humedad.

Extremo húmedo, donde el agua es removida de la banda de papel por baja presión o vacío a través de la tela, en el extremo de la tela el stock es aproximadamente 20%.

Sección prensa, donde el agua removida se logra presionando la hoja de papel obteniendo un stock pulpa seca de 35-50%.

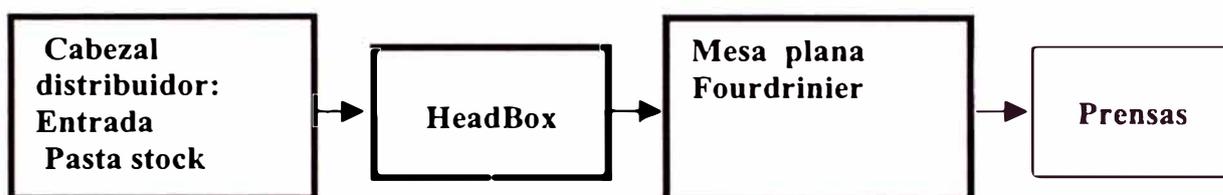
Extremo seco, donde la hoja es secada por evaporación hasta tener un contenido stock pulpa seca de 90-95%.

Extremo húmedo de la máquina papelera Fourdrinier

(Cabezal distribuidor, headbox, tela Fourdrinier).

En el extremo húmedo, la pulpa stock, con una consistencia o concentración de 0.2 a 1%, dependiendo del grado y peso del papel siendo fabricado, fluye desde un cabezal distribuidor al headbox y de éste a través de una regla hacia una tela Fourdrinier en movimiento a una velocidad constante de operación.

La figura 1.13- muestra un diagrama de bloques del extremo húmedo de la máquina Fourdrinier (formación de la hoja de papel).



.Figura 1.13. Diagrama de bloques del extremo húmedo de la maquina Fourdrinier (formación de la hoja de papel).

La figura 1.14 muestra el extremo húmedo de una máquina papelera moderna tipo Fourdrinier.

Cabezal distribuidor

Es un tubo cónico de sección transversal cuadrada para generar velocidades iguales de salida en un haz de tubos de salida igualmente espaciados a lo largo de toda su longitud y perpendicularmente a su eje que lleva la pulpa a la entrada del headbox a alta velocidad, hacia la cámara de turbulencia donde los flujos individuales son unificados e intensivamente mezclados y donde la alta velocidad del stock disminuye.

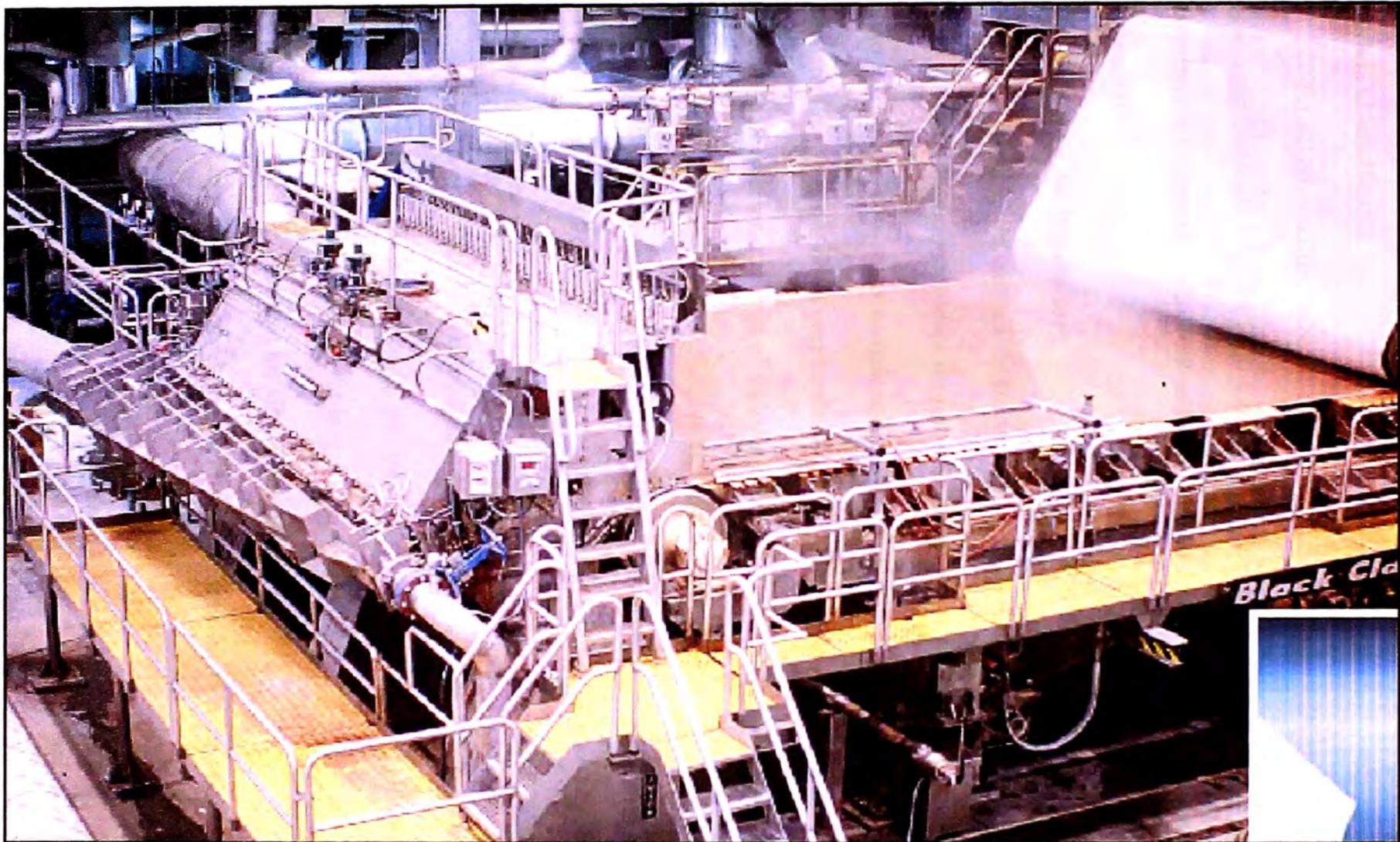


Figura 1.14. Extremo Húmedo de una máquina papelera moderna tipo Fourdrinier

El perfil de velocidad debe ser uniforme a la salida del cabezal distribuidor de entrada al headbox.

En el extremo del cabezal distribuidor se ubica una válvula automática para descargar hasta un 10% del flujo total a fin de conseguir presiones iguales en ambos extremos del cabezal con lo cual se tendría un perfil de velocidad uniforme entrando al headbox.

Headbox (Cajón Regulador)

La pasta en la cámara de turbulencia es sometido a un proceso de mezclado total y desde allí sigue a través de un rollo distribuidor (holey roll) de donde sale un flujo constante con microturbulencias para evitar la floculación de las fibras en suspensión y luego a nivel constante $385\text{mmH}_2\text{O}$ ($380\text{ mmH}_2\text{O}$) pasa a otro cilindro perforado al interior que guía el flujo en forma de una serie de chorros hacia la regla del headbox. Se debe dejar suficiente tiempo y distancia entre el cilindro y la regla para que estos chorros individuales se difundan en forma homogénea para evitar que el papel salga rayado.

Regla del headbox

Forma el orificio por el cual sale la pulpa stock hacia la tela Fourdrinier. La pared frontal del headbox puede ser movida eléctricamente o manualmente para ajustar la abertura deseada de la regla.

En la regla se efectúan las siguientes funciones:

1. Sirve como un orificio de medición para controlar la distribución de la pasta en todo lo ancho de la máquina.
2. Controla la velocidad de salida de la pasta hacia la tela, ajustando la abertura

promedio de toda la regla en combinación con el flujo total que entra a la caja.

3. La regla junto con el cilindro perforado se usan para controlar la estabilidad del flujo que pasa por ellas y el tamaño de los remolinos originados por la turbulencia del chorro.

El tamaño de los agujeros de los cilindros perforados cercanos a la regla determina la magnitud de la turbulencia en el chorro, y la forma del canal afecta el perfil de velocidad en el chorro.

4. La geometría de la regla tiene influencia en la orientación de las fibras en el chorro de la misma.

Rol del headbox

El headbox distribuye el suministro de pulpa stock procedente de la bomba sobre una tela en movimiento (sección formadora) tal que la salida del jet controla las siguientes variables:

- Velocidad en dirección maquina (MD) y en dirección transversa (CD).
- Consistencia (fibras , rellenos, aditivos químicos).
- Espesor de la hoja.
- Turbulencia.

Estas propiedades del flujo afecta en las propiedades del papel:

- Peso base.
- Orientación de la fibra.
- Variación residual y formación.
- Relación de tensiones dirección maquina a dirección transversal tensile ratio MD/CD.

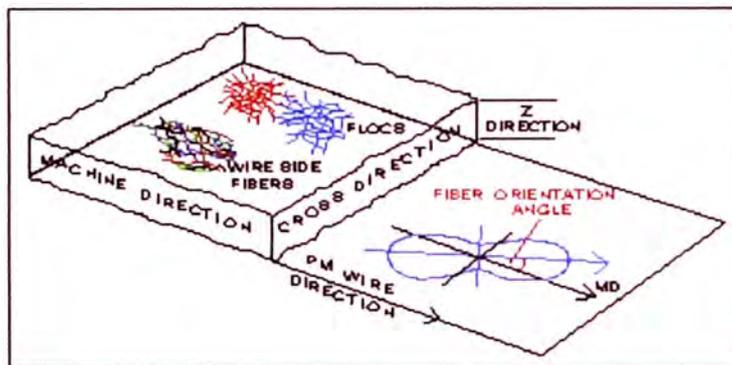
Tela Fourdrinier: drenado de agua y formación de la banda de papel

La pulpa stock diluida a una consistencia de 0.2-1.5% bombeada por la bomba FAN sale por los labios del headbox a velocidad “Vjet” haciendo impacto sobre la tela en movimiento encima de la caja formadora. La tela se mueve a velocidad “Vw” constante drenando más del 95% del agua de la pulpa stock, quedando sobre la tela las fibras de la pulpa en suspensión entrecruzadas, unas en dirección máquina (MD) y otras en dirección contraria (CD).

El drenado empieza en la caja formadora como drenado hidrostático y por inercia, luego continúa el drenado en los foils y wet suction boxes hasta un 2% de contenido sólido seco, después se aplica vacío bajo la tela, drenando el agua desde la banda de papel a un contenido seco de 10%. Al final de la tela se encuentra el rollo couch que tiene dos zonas de succión, por vacío regulable, encima de la cual el rollo lump breaker (rodillo presionador) presiona la tela para dar una banda de papel fuerte y densa de 22-24% consistencia con 76-78% de humedad al final de la tela listo para ingresar a las prensas.

La figura 1.15 muestra el drenaje de agua en una máquina papelera Fourdrinier y la figura 1.16 muestra la curva de drenaje del agua en Gpm/in a través de la tela, y el crecimiento en consistencia de la banda de papel, desde el punto de impacto del jet sobre la tela hasta el final de esta en el rollo couch.

Una de las no uniformidades creadas durante la formación de la banda de papel es la anisotropía del papel (MD y CD) significa que las propiedades físicas de el papel difiere de acuerdo a la dirección de medición , esto se debe a la orientación de la fibra que influencia muchas propiedades físicas del papel , incluyendo el comportamiento de la maquina papelera (P M) asi se puede llegar a un papel de formación cuadrada teniendo una baja razón MD a CD para la propiedad de resistencia (o otra) en consideración . Para papeles hecho en una máquina Fourdrinier, generalmente se considera un cuadrático valor bajo cerca de 2.



Las principales influencias sobre la orientación de la fibra se dan en el extremo húmedo de la máquina PM (ángulo de impacto del Jet , razón de velocidades Jet a tela o efflux ratio , longitud de fibra , consistencia en el headbox , rapidez de drenaje). Debido al flujo desde la regla del headbox , la fibra en suspensión se orienta principalmente en dirección del movimiento de tela de máquina , como se ve en este dibujo las fibras “wire side fibers”.

A causa de alguna influencia lateral (transversal) sobre las fibras, la dirección dominante (representado por la línea azul)forma el “ ángulo de orientación de la fibra” que influencia muchas propiedades Físicas del papel y el comportamiento de la máquina PM .

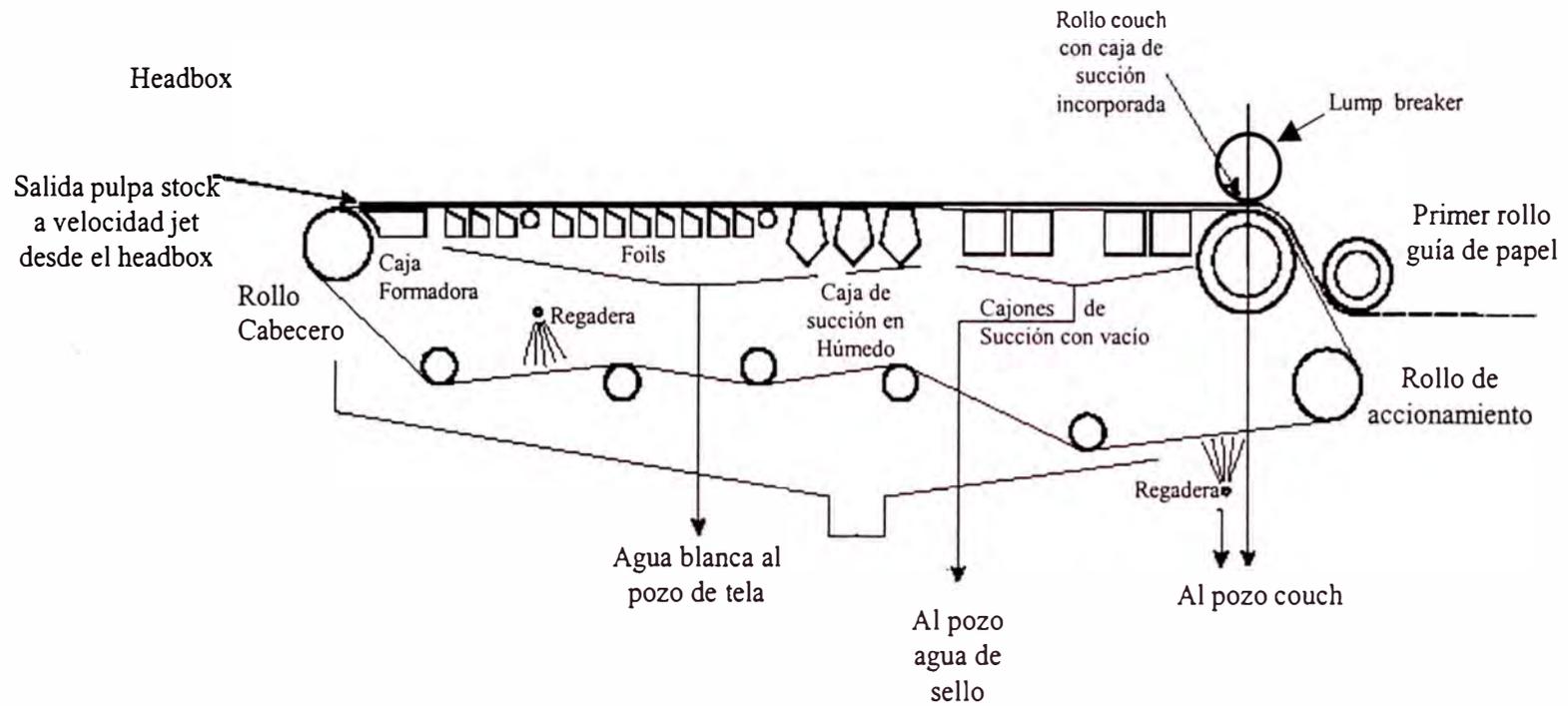


Figura 1.15 Drenaje de agua a través de la tela en una máquina papelera Fourdrinier

BELOIT		
DRAINAGE CURVE (Pr. Fourdr.)		
Description	Consistency (%)	(Stock) flow /gpm/in.
Primary Head box	0.30	64.00
Form Board + Hidrofoil	0.40	44.80
Hidrofoil # 1	0.47	40.30
Hidrofoil # 2	0.53	35.80
Hidrofoil # 3	0.60	31.30
Hidrofoil # 4	0.66	26.80
Hidrofoil # 5	0.74	22.40
Vacuum foil #1 (hidr)	0.81	20.20
Vacuum foil #1	0.94	17.20
Vacuum foil #2	1.30	12.20
Vacuum foil #3	4.80	3.20
Suction Box # 1	7.00	2.20
Suction Box # 2	10.00	1.60
Suction Box # 3	14.00	1.20
Suction Box # 4	18.00	0.90

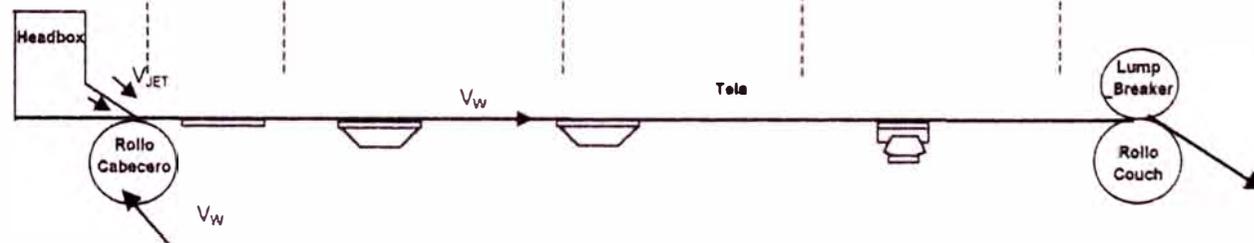
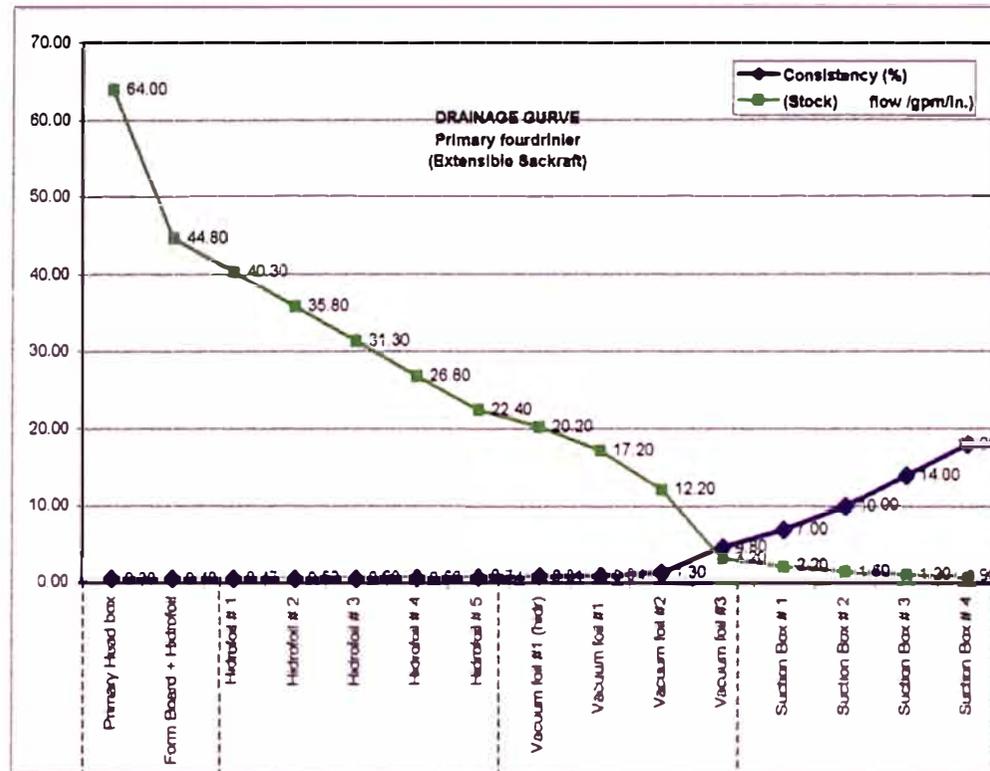


Fig. 1.16: Drenaje el agua en Gpm/in, de la pulpa en suspensión, a través de la tela y crecimiento en consistencia de la banda de papel. Desde el punto de impacto del jet sobre la tela hasta el final de esta en el rolo couch

Sección prensas

La hoja de papel sale del rollo couch hacia la sección prensas en donde la hoja de papel es transportado sobre el filtro hacia la zona de prensado entre dos rollos. Generalmente 3-4 prensas sucesivas son aplicadas. La presión fuerza al agua desde la hoja de papel hacia el filtro. Este proceso requiere que el filtro en la zona de prensado sea capaz de recibir agua de la hoja, lo cual a su vez requiere baja resistencia al flujo desde el filtro permitiéndole al filtro recibir agua mientras está siendo presurizado en la zona de presión. Así la hoja llega al final de la sección prensas con un contenido stock de 20-50%, ingresando a la sección secado.

La figura 1.17 muestra la sección prensa de una máquina papelera.

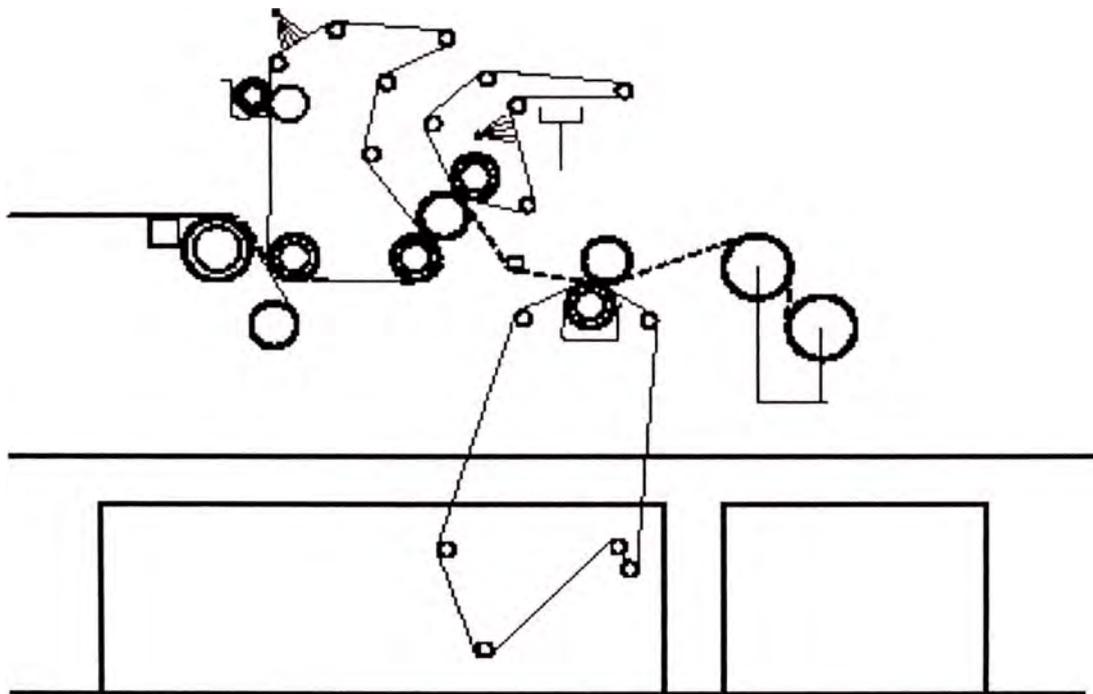


Figura 1.17 Sección prensas

Extremo seco (sección secado, y sección calandria)

Sección secado

En la figura 1.19 se muestra la sección secado.

La sección secado consiste de una serie de cilindros calentadores a vapor configurado en varios grupos, y siempre encerrado en una estructura tipo capota con ventilación incorporada.

La hoja de papel seca por evaporación cuando ésta pasa sobre la superficie de los cilindros secadores, fluye aire caliente hacia la hoja y entre los cilindros secadores remueven el vapor de agua.

La línea de secado es frecuentemente interrumpido por la inclusión de una size press (prensa encoladora) o de una unidad de banda de jebe sin fin (banda clupak).

Existe una unidad diseñada específicamente para la fabricación de papel extensible clupak la cual consta principalmente de una banda de jebe sin fin, así como de una barra presora y cilindro secador, los cuales darán la característica principal de estiramiento del papel en un 10% como mínimo, para incrementar el estirado del papel, usado en bolsas para envases de cemento y azúcar .

Sección calandria

Es la última sección y realiza la operación final del proceso de fabricación del papel, calandreado la banda de papel.

La operación de calandreado comprime el papel entre una serie de rollos de acero superpuestos con alta presión superficial entre ellos que ayudan a dar a la hoja de papel suavidad, lustre, calibre, y incremento de su densidad cuando pasa entre ellos (usado en la fabricación de cartón liner y otros).

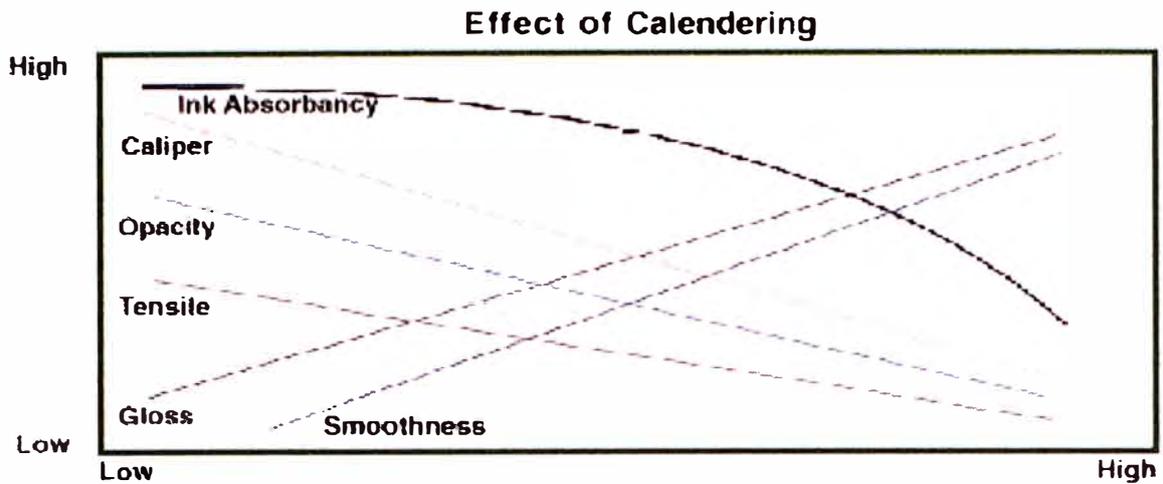


Figura 1.18. Efecto de la calandria sobre las propiedades físicas del papel

La figura 1.20. muestra el diagrama de bloques del extremo seco de la máquina Fourdrinier (sección secado, y sección calandria).

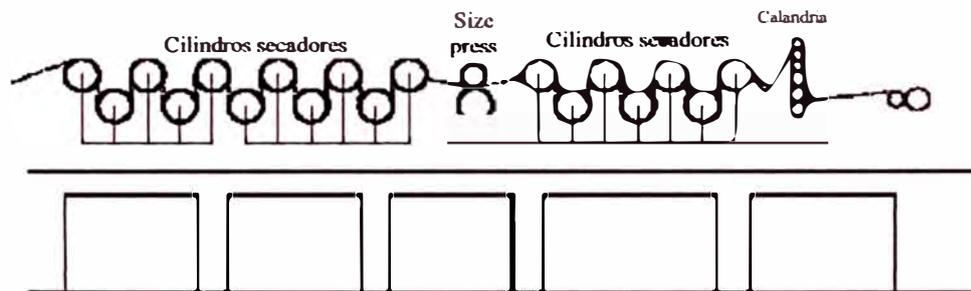


Figura 1.19. Sección secado de una máquina multicilindros 40-100 cilindros con diámetros de 1.5-1.8 metros.

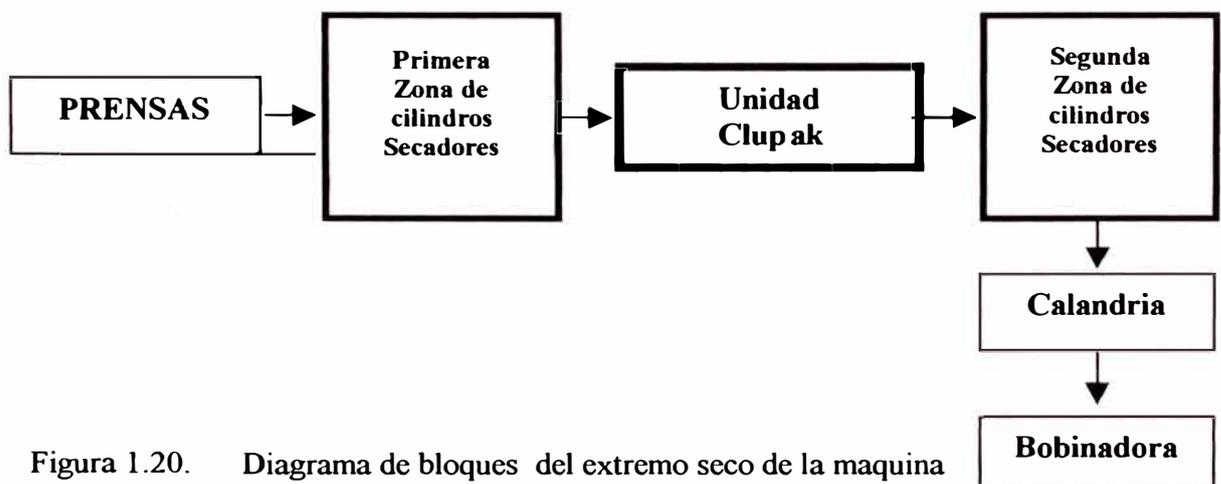


Figura 1.20. Diagrama de bloques del extremo seco de la máquina Fourdrinier (sección secado, y sección calandria)

Rebobinadora

La bobina principal (reel) procedente de la máquina papelera se cortan según las medidas de anchos y diámetros solicitados por los clientes, luego se pesa y se envían mediante un descensor de bobinas para su almacenamiento, en el patio de productos terminados para su posterior embarque a los usuarios.

CAPÍTULO II SISTEMA DE CONTROL NEUMÁTICO ORIGINAL Y SU PROBLEMÁTICA

2.1 Introducción

El headbox de la máquina Fourdrinier es de tipo cerrado tiene un sistema de control neumático para controlar el nivel y la presión total. El control de presión total, en la base del headbox, lo hace regulando la entrada o salida de aire al colchón del headbox para formar en esta presión o vacío y el controlador de nivel mantiene el nivel constante de pulpa a cualquier velocidad de la tela.

La consistencia de la pulpa en suspensión en el headbox puede variar entre 0.3 – 1.1 % para producir papeles de gramajes en el rango de 60 – 220 gr/m² y a velocidad de tela en el rango de 75 – 450m/min.

El headbox distribuye la pulpa en suspensión acuosa sobre la tela en movimiento con la salida del chorro de pasta (jet) que es determinante sobre el perfil de gramaje (peso base), formación, relación de tensión (MD/CD).

En los últimos años la competencia en el mercadeo de papeles y cartones ha exigido mejorar la calidad y bajar los costos de producción, por lo cual se ha tenido que mejorar el sistema de control neumático original (1968) del head box mostrado en la figura 2.1.

El sistema de control del headbox pasó por dos periodos de cambios:

En el primer periodo entre 1968 – 21/01/1999 el sistema de control se caracterizó por su inestabilidad en el control de nivel y presión del headbox ocasionando variaciones en la velocidad de salida del jet de pasta sobre la tela, lo

cual ocasionó muchas pérdidas de producción debido a la influencia del jet:

- Sobre la formación de la hoja.
- Propiedades físicas de la banda de papel.
- Así como por las continuas roturas del papel en la máquina en proceso de producción;

Y como consecuencia de las roturas también pérdidas de vapor a la atmósfera y variaciones en las variables de presión de vapor y temperatura en los cilindros secadores.

Entre 1968 – 1971 se hicieron pruebas y ajustes al sistema de control original para determinar las causas de su inestabilidad, según informe de esa época las pruebas concluyeron en 1971 haciendo el primer cambio al sistema de control original de 1968, como se muestra en la figura 2.2.

Primer cambio del sistema de control original (1968) del headbox

Se realizó en 1971 manteniendo todos los instrumentos originales de 1968 , dicho cambio consiste en lo siguiente:

El controlador que controlaba la presión total regulando el ingreso de aire pasó a regular el ingreso de pasta.

Y el controlador que controlaba el nivel constante a 385 mm H₂O (ó 380mm H₂O) regulando el ingreso de pasta pasó a regular el ingreso de aire.

Este primer cambio funcionó durante 28 años entre 1971 – 1999/01/21, alterando el principio de funcionamiento que correspondía al headbox de tipo cerrado – según Escher Wiss.

El segundo periodo del sistema de control neumático del headbox entre 21/01/1999 – 03/02/2000 se inicia el 21/01/1999 con la recomendación de la Voith

Sulzer del Brasil de restablecer el principio de funcionamiento para este headbox de tipo cerrado consiste en:

- Controlar la presión con ingreso de aire.
- Y controlar el nivel con ingreso de pasta.

Con lo cual también se volvía al mismo sistema de control original de 1968 con sus problemas de inestabilidad.

Segundo cambio del sistema de control original (1968) del headbox

Entre 25/01/1999 – 09/03/1999 se hicieron cambios en el sistema de control de headbox sobre la base del estudio desarrollado aquí.

Esta fue el segundo cambio al sistema de control original de 1968, como se muestra en la figura. 2.5. que llegó a funcionar entre 09/03/1999 – 03/02/2000 aproximadamente durante un año.

Se caracterizó por ser estable con el cual se logró ventajas apreciables sobre la formación de la hoja y características físicas del papel y con las siguientes ventajas derivadas:

- Disminuyó las roturas de papel al superarse las roturas de la hoja por variación del chorro de pasta a la salida del headbox sobre la tela.
- Se obtuvo una producción sostenida, con lo cual también
- Se consiguió mejor uniformidad en las variables de presión de vapor para el secado del papel.

Aunque quedó como problema lo siguiente:

- Imprecisión de los instrumentos neumáticos para dar valores confiables de las variables teóricas y de proceso con que se estaban trabajando.
- Los lazos simples de control de nivel y presión del headbox, similar al original

1968, no eran controles directos sobre la velocidad del jet de pulpa sobre la tela ni daban valores del parámetro “r”.

La versión moderna actualizada, según “Beloit Corporation”, para fabricar papeles de calidad pasaba por tener un control sobre la velocidad del chorro de pasta a la salida del headbox sobre la tela. A través del control de parámetro “r” definido como:

$$r = \frac{V_{JET}}{V_{TELS}}$$

Para esto era necesario crear un nuevo control del headbox: El control del parámetro “r” cuya teoría desarrollada sobre la base de la figura 3.1. – curva de menor consistencia 0.41% y bajo la cual se implementó un nuevo sistema de control electrónico del headbox en la máquina de papel, el cual es desarrollado en este trabajo.

2.2 Sistema de control neumático original del headbox (1968).

El sistema de control original del headbox de la máquina Escher Wiss tipo Fourdrinier montado en 1968 fue diseñada para trabajar con el headbox con las siguientes características:

Caja de entrada (headbox) provisto de rollos perforados de tipo presurizado con colchón de aire a presión o vacío a nivel constante a 385 mm H₂O (ó 380mm H₂O) a cualquier velocidad de máquina del rango de diseño 75-450 m/min. Para fabricar papeles de peso base en el rango de 60-220 gr/m² estando el valor de la consistencia de la pulpa en suspensión en el rango entre 0.3-1.1%, de acuerdo al gramaje del papel a fabricarse.

El diseño de este sistema de control neumático original del headbox se

muestra en la figura 2.1 el cual tiene 2 controles de lazo simple cada uno los que son:

Control neumático original (1968) del nivel del headbox controlado al valor constante de 385 mm H₂O (ó 380 mm H₂O) a cualquier velocidad de máquina.

Control neumático original (1968) de presión total del headbox dependiente de la velocidad según la ecuación:

$$P = \frac{V^2}{70.632}$$

2.2.1 Control neumático original de nivel del headbox (1968).

El headbox de tipo cerrado trabaja sobre el principio de un nivel de stock constante dentro todo el rango de velocidades de tela (75 – 450) m/min.

Por lo cual el nivel de stock se mantiene constante por medio del control de nivel de lazo simple que regula la entrada de pasta al headbox para mantener el Stock de pulpa en suspensión acuosa al valor constante de 385 mm H₂O (ó 380 mm H₂O) y a cualquier velocidad de máquina dentro del rango de operación (75-450)m/min

La pulpa de suministro al headbox se hace desde la bomba warren fan pump de doble entrada de 18,000 gpm a través de una válvula de accionamiento eléctrico ubicada en la tubería de flujo de entrada, operado manualmente para regular el flujo de ingreso de pulpa al headbox hasta alcanzar el nivel de operación.

Asimismo una válvula neumática de recirculación controlada desde una estación manual se usa para variar el nivel tal que la válvula neumática del control automático de nivel esté controlando al 50% de abertura.

El nivel del headbox es sensado por el transmisor de presión diferencial que tiene su cámara sensora de baja presión conectado al colchón de aire del headbox, y la otra cámara sensora de alta presión lo tiene conectado, mediante una membrana

bridada, a la altura del labio inferior del headbox.

Así el transmisor de nivel sensa las variaciones de nivel stock de pulpa, independiente de la presión en la cámara de aire, y envía una señal neumática proporcional a este nivel, al controlador el cual compara con el valor teórico del nivel (set point) y corrige el error hasta que éste sea cero.

El control de nivel consta de:

Un transmisor de presión diferencial calibrado de 0 – 500 mm H₂O ↔ salida 3 – 15 psi.

Un controlador PI neumático.

Una válvula neumática como elemento de control final.

2.2.2 Control neumático original (1968) de la presión total del headbox

En este headbox de tipo cerrado se controla la presión total en su base regulando la entrada o salida de aire al espacio libre (colchón de aire) sobre el nivel constante de pasta.

La presión total (P_{JP}) debe mantenerse estable para asegurar un flujo de salida uniforme a velocidad constante (V_{JET}) del chorro de pasta (Jet) sobre la tela relacionados según la ecuación:

$$V_{JET} = \sqrt{70.632 P_{JP}}$$

P_{JP} = presión total de proceso en mm H₂ O

V_{JET} = velocidad Jet, en m/min.

Descripción de funcionamiento del control neumático original (1968) de presión total del headbox .

En la figura 2.1 se muestra la presión total real que es sensada en la parte inferior del headbox como sigue

El transmisor de presión diferenciado Pdt20-1 sensa la diferencia de presiones P_{dJP} entre las dos cámaras sensoras alta y baja .

A la cámara sensora de baja se transmite una presión de referencia P_0 que es fijada manualmente.

A la cámara sensora de alta se transmite la presión total real del proceso P_{JP} a través de una membrana sensora del transmisor en contacto con el Stock de pulpa en la parte inferior del headbox.

Control de presión diferencial

La diferencia de presión del proceso P_{dJP} sensada con el transmisor de presión diferencial es enviada al controlador como señal neumática P_{d1} proporcional.

El controlador neumático de presión diferencial PdRC-20 compara esta señal neumática con el valor teórico P_{dJT} que fija el operador y el error existente se corrige variando su salida sobre las válvulas que regulan la entrada de aire para tener un nuevo valor de la señal de presión diferencial de proceso P_{dJP} haciendo que el error sea cero, así corregirá la variación del proceso Δp_j presente alrededor del valor teórico hasta que esta variación sea cero, es decir el control de presión diferencial sea estable.

Presión de referencia P_0

La presión de referencia P_0 se fijaba manualmente desde un selector HC-4 que accionaba un grupo de solenoides para seleccionar uno de los cuatro tubos de acero

de diferentes tamaños sumergidos en un contenedor de agua (tubos burbujeados) tal que el tubo seleccionado proporcionaba la presión de burbujeo que venía hacer la presión de referencia P_0 en un valor cercano a la presión de proceso P_{JP} deseada, correspondiente a la velocidad conocida de operación de tela.

Presión total real del proceso P_{JP}

La presión total se medía o sensaba en la cámara de alta del transmisor de presión diferencial. La presión se calculaba según la siguiente relación:

$$P_{JP} = \frac{V_{JET}^2}{70.632}$$

determinado por la velocidad conocida de operación de tela, asumiendo el mismo valor de la velocidad Jet, tal que éste era el valor de la presión a la cual debía que llegar la presión total instantánea del proceso P_{JP} .

La presión total instantánea del proceso P_{JP} correspondiente al labio inferior del headbox se obtenía de una forma indirecta y con mucho error:

- De la lectura tomada sobre una escala graduada según la ecuación:

$$V = \sqrt{70.632P}$$

Y que empezaba en 385 mmH₂O (ó 380mm H₂O) correspondiente al nivel constante del stock de pasta en el headbox.

- En la que el tubo visor lleno de un liquido especial indicaba indirectamente el valor de la presión total de proceso.
- Ya que el tubo visor por estar conectado al colchón de aire del headbox indicaba la presión o vacío de este colchón y no la presión total del proceso en el labio inferior, donde P es la suma de 385 mmH₂O y la presión del colchón de aire.

Así la presión total de proceso correspondiente a la velocidad conocida de tela

se obtenía con mucho error indirectamente de la lectura sobre una escala graduada conectada al colchón de aire del headbox y después de varios ajustes sucesivos sobre el control de presión diferencial. La figura 2.1 muestra el control neumático semiautomático de presión total del headbox (1968) el cual consistía en:

- Un transmisor de presión diferencial calibrado
[0 – 1100] mm de H₂O \diamond salida [3 – 15] psi.
- Un controlador PI neumático.
- Dos válvulas neumáticas de 3 vías como elementos de control final.
- La entrada de aire es tomada desde un compresor Nash.

2.3 Problemática del sistema de control original del headbox (1968)

El sistema de control neumático original 1968, se caracterizaba por la inestabilidad de las variables de control, en los controles neumáticos de nivel y presión headbox.

La inestabilidad ocasionaba variaciones de velocidad del Jet de pulpa, en suspensión acuosa saliendo del labio del headbox, sobre la tela con graves consecuencias para la producción:

- Pérdidas de producción por roturas.
- Y pérdidas por mala calidad (broke por variación de peso y por variación de humedad).

Esta inestabilidad que se mantuvo durante 31 años (1968 – 1999): pasó por un período de pruebas y ajustes entre 1968 – 1971; según informe de esa época.

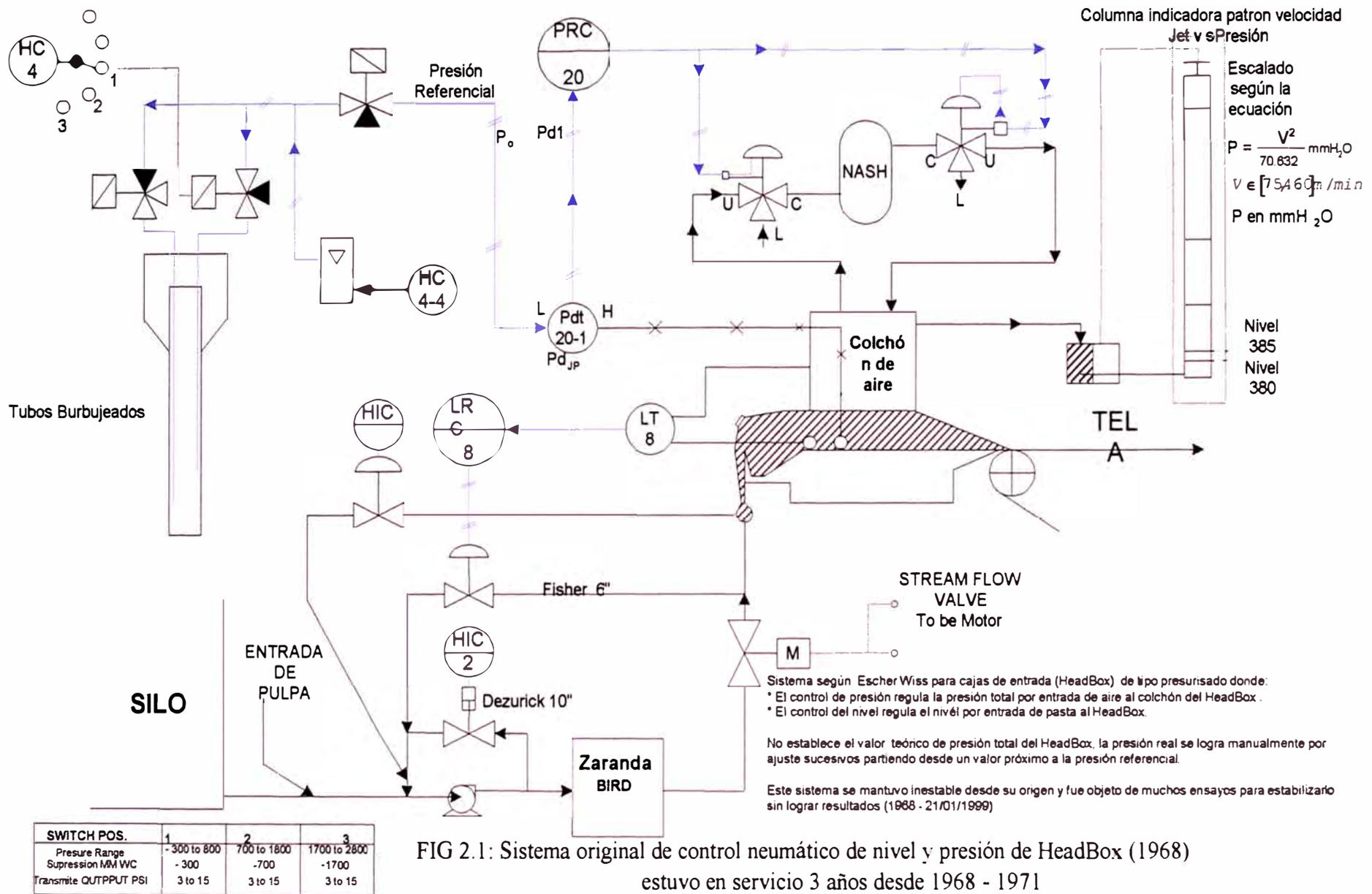


FIG 2.1: Sistema original de control neumático de nivel y presión de HeadBox (1968) estuvo en servicio 3 años desde 1968 - 1971

2.3.1 Ensayos para determinar las causas de inestabilidad del sistema de control original del headbox (1968) y primer cambio.

Este reporte es para recopilar algunos intentos que se hicieron para eliminar las variaciones en el nivel del headbox, experimentos desde el arranque en 1968.

No se incluyen los numerosos chequeos y ensayos realizados para determinar si las variaciones se debieron al mal funcionamiento de las piezas o equipos específicos, tales como bombas, válvulas, controladores, etc.

Se realizaron dos ensayos:

- Procedimiento para tratar de determinar las causas de inestabilidad del sistema original.
- Intento para controlar las variaciones que causaban inestabilidad.

Procedimiento para tratar de determinar las causas de inestabilidad del sistema original

- a) La entrada de aire al headbox, se determinó que soplaba siempre directamente hacia los diafragmas sensores de presión. Esto ocasionaba variaciones sobre la salida del control de presión, esto se consiguió soldando un baffle entre el pórtico de entrada y el diafragma permitiendo al aire alejarse del diafragma.
- b) Se pensó que los disturbios se debían a la presencia de aire en el sistema. El aire purgado fue calibrado para todas las bombas y los puntos altos del sistema. Esto arrojó como resultado un incremento muy pequeño.
- c) Ocasionalmente, las zarandas rotativas pudieron ser la causa de las pulsaciones. Tomando en cuenta esta suposición, el sistema fue ensayado con la zaranda bypassada. Con esta operación tampoco se logró un incremento apreciable.
- d) Con una visión de este proceso y para asegurarse posteriormente que la velocidad

del aire de entrada hacia el headbox no estaba afectando a los diafragmas del instrumento, estos fueron reubicados en el lado opuesto del headbox, tampoco se notó la diferencia.

- e) También se pensó que el arrastre de aire en los centricleaners sea una posible causa. Se hicieron tentativas para hacer operar a los cleaners con una salida presurizada y los niveles del tanque de rechazos fueron incrementados para asegurarse que la salida de rechazos, estuvieran por debajo de las superficies. Se obtuvieron algunos incrementos por lo menos en grandes e inexplicables desviaciones desde el nivel de control.
- f) Para evitar algunos disturbios inducidos por el flotador de la válvula en el separador de la bomba “Nash”, se instaló una pierna barométrica para descargar el agua. De los resultados, esto aparentemente no fue la causa de los disturbios.

Intento para controlar las variaciones que causaban inestabilidad

- a) La carrera de la válvula fue alterada desde su total posición de 3 –15 á cero. Y/o de 3 – 9 y 9 – 15 en etapas pequeñas, no se vio incrementos adicionales y las válvulas fueron retornadas a su total posición.
- b) Tratar de obtener mayor control y acción de la válvula manual HCV-2, que fue conectada para trabajar en conjunto con la LCV-8, tampoco en esto hubo algún incremento.
- c) El transmisor de presión fue reubicado para medir el cabezal total y/o la presión del colchón más el nivel de cabezal. No hubo resultados de incrementos.
- d) El headbox ha sido diseñado de tal forma que la superficie del líquido cruce el área seccional y cambie con el nivel y además en diferente cantidad de líquido,

se requiere aumentar el nivel un centímetro que bajarlo un centímetro, esto permite un control no balanceado, cerca al tope de la ventana del headbox, el rango de cambio del área seccional se reduce. El nivel de control fue probado en este punto y mejoró ligeramente, siendo esto satisfactorio para los propósitos de fabricación.

- e) En los controles neumáticos de nivel y presión del headbox se intercambiaron la orientación de las variables de control de salida. Así, la variable de salida del control de presión que actuaba las válvulas para presión de aire al headbox pasó a actuar las válvulas de entrada de pasta al headbox, y la salida del control de nivel que actuaba las válvulas de entrada de pasta al headbox pasó a actuar sobre las válvulas de presión de aire al headbox, quedando:
- El control de presión regula la entrada de pasta al headbox.
 - El control de nivel regula el colchón de aire o vacío que es suministrado por el compresor.
 - El nivel de stock es constante dentro de todo el rango de velocidad de la máquina, como se muestra en la figura 2.2.

Resumen:

De todos los ensayos solamente el último (2.e) ha sido realmente hecho con alguna diferencia significativa. El control de nivel es mejor a expensas de un ligero deterioro en el control total del cabezal.

Pero como esto concierne a la operación, la diferencia principal es que el control de presión y no el nivel, que ahora tiene un rango limitado de operación, debe darse el rango de trabajo, por medio de la regulación del flujo de la válvula.

El control de presión es un tanto menor que antes, pero algunas modificaciones futuras pueden incrementarlo. Una ventaja adicional es que por ahora es imposible soltar el nivel y además el sello ó alternativamente el flujo del headbox puede aflojar al soplador Nash.

Primer cambio al sistema de control original (1968) del head box (18/08/1971 – 21/01/1999).

Este cambio descrito en el ensayo (2.e), como se muestra en la Fig. 2.2. , que conserva todos los instrumentos originales 1969, fue un intento más para estabilizar el sistema de control original 1968 del headbox, según la Voith - Sulzer – Brasil, en ese primer cambio, se alteró la condición de operación que consistía en controlar el nivel , regulando la entrada de pasta y controlar la presión regulando la entrada de aire a este headbox Echer Wiss de tipo cerrado.

2.3.2 Segundo intento de estabilización al sistema de control neumático original del headbox (1968) y segundo cambio .

El 21 de enero de 1999 la Voith–Sulzer–Brasil; recomienda reponer el principio de funcionamiento del sistema de control original 1968 del headbox como sigue :

El control de presión total debe regular la entrada o salida de aire al headbox creando presión o vacío en el espacio libre sobre el nivel de pasta para regular la presión total de proceso en la base del headbox

El control de nivel debe regular la entrada de pasta al headbox para mantener un nivel de stock constante, a cualquier velocidad de máquina que habían sido cambiados en 1971 con la primera modificación hecha al sistema de control original 1968.

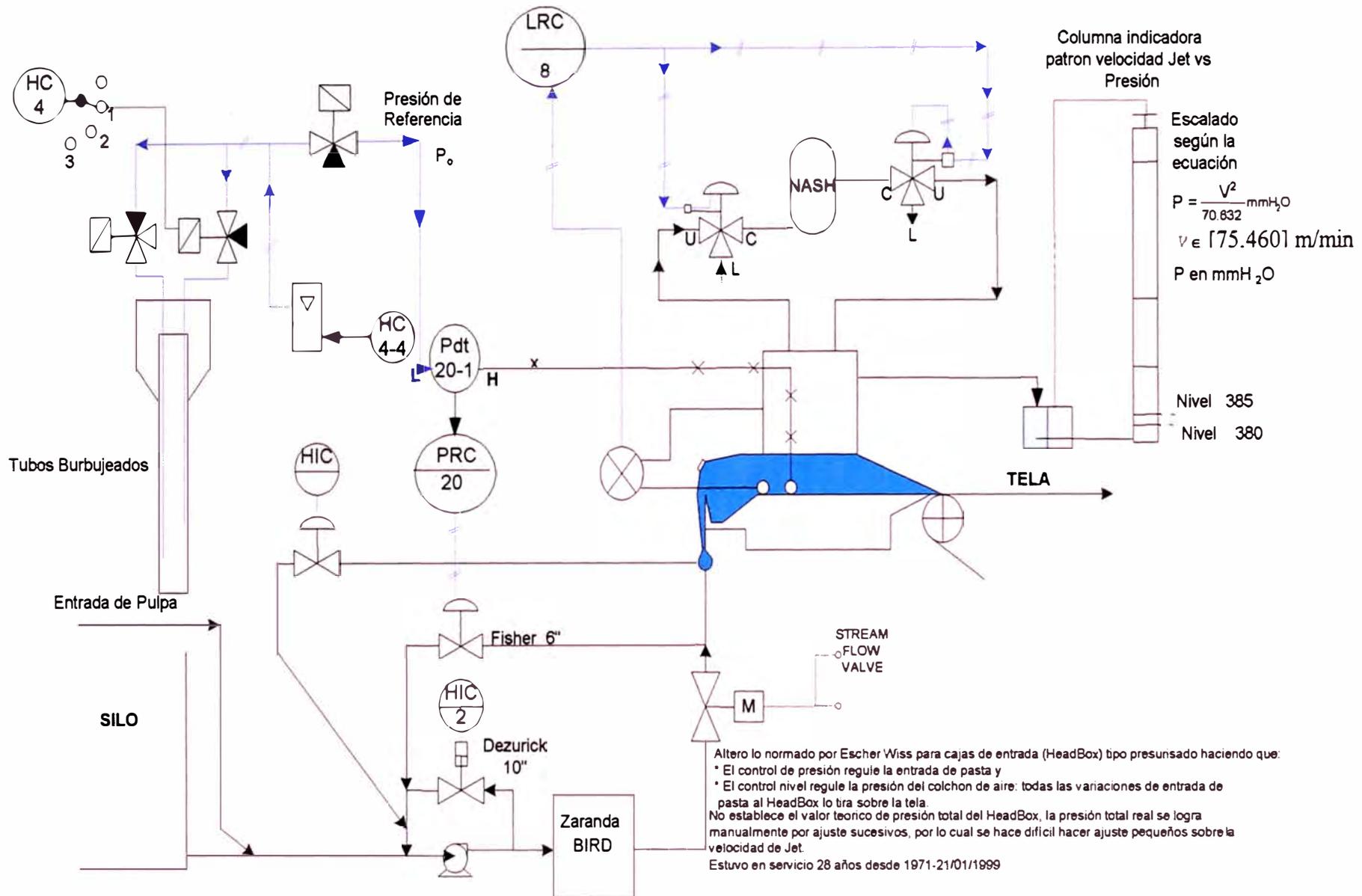


Figura 2.2 Diagrama Simplificado de la Primera modificación del Sistema de Control Original (1968) del headbox

Con este procedimiento se debía que dejar de lado la modificación de 1971 que durante 28 años (1971-1999) venía operando, así también se volvía al sistema de control original 1968 con sus respectivos problemas de inestabilidad.

Entre enero y febrero 1999 analicé el problema de inestabilidad del sistema original (1968) encontrando dos causas (a, b) que habían hecho inestable al sistema de control del headbox durante 31 años (1968-1999):

- a) El control neumático de presión diferencial trabajaba en un rango muy alto (1100mmH₂O), para instrumentos neumáticos poco sensibles con lo cual no podía controlar pequeñas variaciones de presión del proceso como 5mm H₂O.

Por otro lado la presión de referencia dado por burbujas, introducía variaciones no deseadas en el control de presión diferencial y por lo tanto también variaciones en la presión total, correspondiente a la velocidad conocida de tela, presión que se alcanzaba por variaciones sucesivas del valor teórico del control de presión diferencial .

- b) En el lazo de control de nivel la única válvula de 6" Ø para regular las pequeñas variaciones de nivel, era insuficiente para corregir con rapidez las variaciones de pasta dentro del headbox, causadas por variaciones en el control de presión.

El 09 de marzo de 1999; quedó funcionando los nuevos lazos de control neumáticos de nivel y de presión del headbox, tomando como base al control original Escher Wiss y conservando el principio de funcionamiento aplicado a cajas de entrada presurizada por presión del colchón de aire conforme a lo recomendado por la Voith- Sulzer – Brasil.

Fundamento teórico (a,b) aplicando al segundo cambio del sistema de control original del headbox (1968).

a) Deducción del modelo matemático del control de presión total 1968 del headbox.

Con el control automático de presión diferencial del proceso Pd_{jp} establece la siguiente relación del proceso.

$$Pd_{jp} = Pd_{ji} \pm \Delta P_{j\max} \quad (2.1)$$

donde Pd_{jp} = variable del proceso controlado por el control de presión diferencial

Pd_{ji} = valor teórico de la presión diferencial, en el controlador neumático.

$\Delta P_{j\max}$ = variación máxima aceptable del proceso según la figura 3.1

Con el control automático de la presión total de proceso P_{jp} se establece la siguiente relación de proceso, dado por la ecuación (3.47)

$$P_{jp} = P_{JT} \pm \Delta P_{JMAX} \quad (2.2)$$

$$\text{donde } P_{ji} = \frac{r_i^2 V_w^2}{70.632}$$

$$\Delta P_{j\max} = \frac{\Delta r_{\max} (\Delta r_{\max} + 2r_i) V_w^2}{70.632}$$

Sumando y restando la misma cantidad Pd_{ji} al segundo miembro de la ecuación (2.2) y agrupando se obtiene:

$$P_{jp} = (P_{JT} - Pd_{JT}) + (Pd_{JT} \pm \Delta P_{JMAX})$$

de donde

$$P_{JP} - (P_{JT} - Pd_{JT}) = (Pd_{JT} \pm \Delta P_{JMAX}) \quad (2.3)$$

El segundo miembro de esta ecuación se puede escribir como la ecuación 2.1

$$Pd_{jp} = Pd_{jt} \pm \Delta P_{J_{\max}}$$

Esta relación se establece a través del control de presión diferencial y el primer miembro se puede describir como:

$$Pd_{jp} = P_{jp} - (P_{JT} - Pd_{JT}) \quad (2.4)$$

Es la relación establecida en el proceso a través del transmisor de presión diferencial

Pd_{jp} = presión diferencial del proceso sensada por el transmisor de presión diferencial con span de calibración $Pd = 500mmH_2O$

P_{jp} = presión total real del proceso sensada en la cámara de alta presión del transmisor a través de una membrana sensora en contacto con el proceso a la altura del labio inferior del head box

$(P_{JT} - Pd_{jt})$ = presión de referencia sensada en la cámara de baja del transmisor fijada manualmente al valor “ P_0 ”, así tenemos

$$P_{JT} - Pd_{JT} = P_0 \quad (2.5)$$

La presión de referencia P_0 es igual a la presión total teórica (P_{JT}) del control de presión total del proceso menos la presión diferencial teórica (Pd_{JT}) del control de presión diferencial del proceso.

La ecuación (2.4) y la ecuación (2.1) extraídas de la ecuación (2.2) pueden expresar el control de presión total; tomando un valor teórico fijo de la presión diferencial tomado del rango $Pd_{JT} \in (0,500)mmH_2O$.

La ecuación (2.4) se cumple a través del transmisor de presión diferencial y la ecuación 2.1 corresponde al proceso controlado por el control de presión diferencial como se indica en la figura 2.3, donde la señal de salida del transmisor de presión diferencial el cual es proporcional a Pd_{JP} va al controlador. Para el control de la presión total P_{JP} del proceso se hará fijando una presión de referencia teórica ($P_{JT} - Pd_{JT}$) y un valor teórico Pd_{JT} en el control de presión diferencial, quedando como sigue:

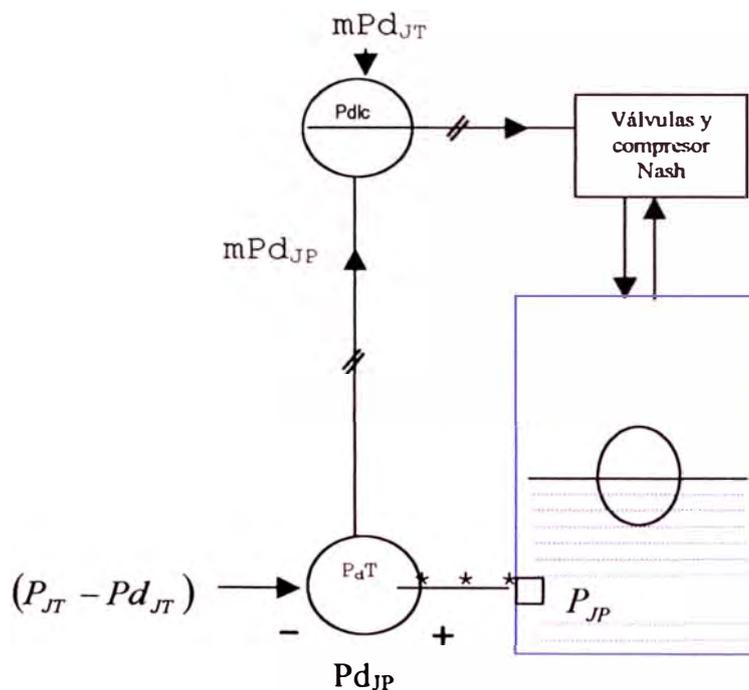


Figura 2.3 Modelo Físico deducido aplicado al sistema de control original (1968) del headbox.

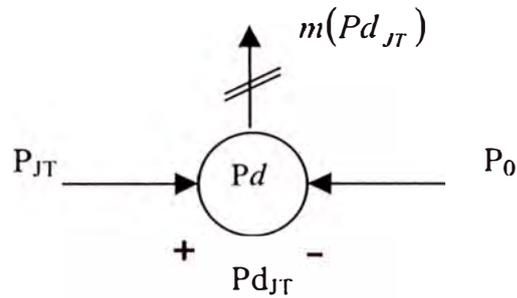
b) Deducción del modelo matemático del control de presión total de proceso aplicado al segundo cambio del sistema del control neumático original del headbox (1968).

La ecuación (2.1) y (2.4) establecen el control de presión total de proceso P_{JP} de

la figura 2.3 y la ecuación (2.5)

$$P_{JT} - Pd_{JT} = P_0$$

Se establece a través de un transmisor de presión diferencial, así



Donde la señal de salida neumática $m(Pd_{JT})$ es proporcional al valor teórico del control de presión diferencial Pd_{JT} del proceso, por lo que esta salida neumática fué llevada como valor teórico del controlador de presión diferencial para controlar las variaciones máximas permitidas $\Delta P_{j\max}$ del proceso sobre la base de la figura 3.1 curva de menor consistencia 0.41%. quedando así un nuevo control de presión total del headbox como se muestra en la figura 2.4. Es una variación de la figura 2.3 en que estuvo apoyado el sistema de control 1968-1999 del headbox .

La figura 2.4 es el modelo físico del segundo cambio hecho al sistema de control neumático original (1968).

En este control automático de la presión total de proceso P_{JP} , el operador debe fijar el valor de la presión total teórica P_{JT} y una presión de referencia $P_0 = P_{JT} - Pd_{JT}$ con los cuales el circuito genera el set point remoto del controlador de presión diferencial.

donde:

m = constante de proporcionalidad igual para ambos transmisores de presión diferencial, es decir que ambos transmisores deben tener el mismo span de calibración (Pd) y ser del mismo rango de fabricación.

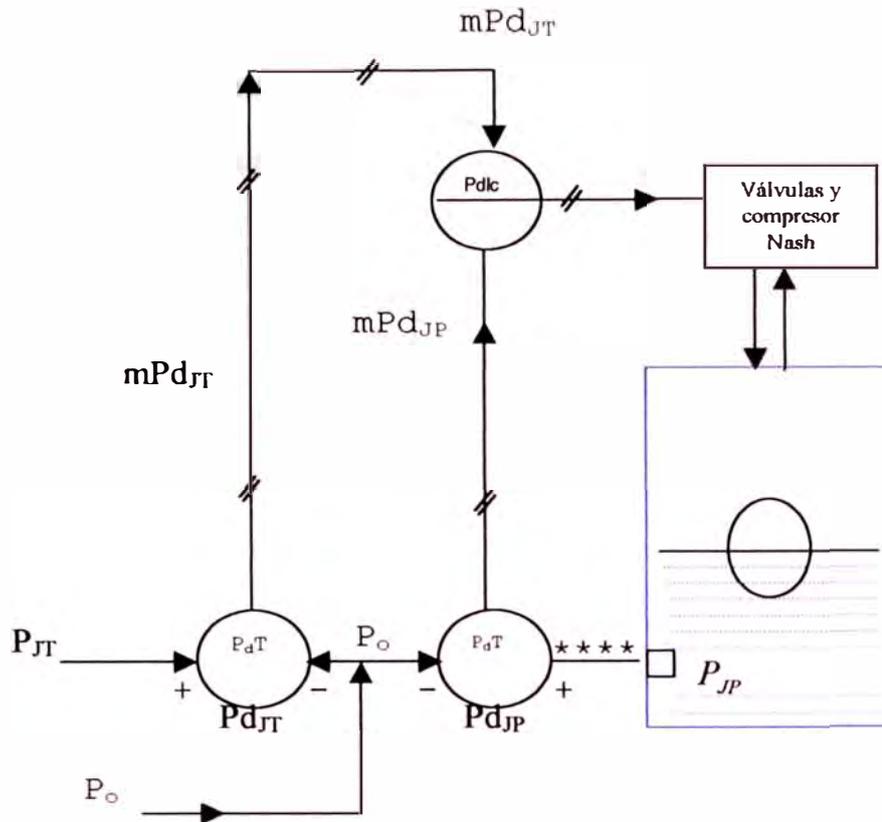


Figura 2.4 Modelo Físico del segundo cambio al sistema de control neumático original (1968) del headbox

La presión teórica total P_{JT} del proceso P_{JP} debía ser fijada con precisión para cada velocidad conocida de tela asumiendo que tenía el mismo valor del jet de pasta saliendo del headbox según la ecuación:

$$P_{jt} = \frac{V_{JET}^2}{70.632}$$

Ecuación deducida para cada velocidad conocida de tela dentro del rango de operación $V_w \in (75,450), m/min$.

La presión diferencial teórica podía estar entre el 20% y el 80% de $Pd = 500mmH_2O$

Así $Pd_{JT} \in [100,400]mmH_2O$ para fines prácticos, donde:

$$P_0 = P_{JT} - Pd_{JT}$$

La presión de referencia P_0 no necesitaba ser fijada con precisión, si no bastaba asignarle un valor que llevara al valor teórico de presión diferencial Pd_{JT} a tomar un valor dentro del rango $Pd_{JT} \in [100,400]mmH_2O$ en el control de presión diferencial.

Condiciones que deben cumplirse para que el control neumático de presión original 1968 sea mas estable.

En la sección 3.3.1 del capítulo 3 se explica en detalle estas condiciones.

Por la poca exactitud de los instrumentos neumáticos se dedujo que el span “Pd” de calibración del transmisor neumático de presión diferencial debe ser:

$$Pd = 500mmH_2O$$

En el control de presión diferencial para controlar las variaciones del proceso sobre la base de la figura 3.1 –curva de menor consistencia. 0.41%.

Implementación del sistema de control neumático para la segunda modificación al sistema de control original (1968).

En base al modelo matemático para el control automático de presión total que se muestra en la figura 2.4 se implementó el control de presión total que se muestra en la figura 2.5.

En la figura 2.5, los controles neumáticos de nivel y presión de headbox cumplen con las normas establecidas por Escher Wiss para cajas de entrada (headbox) de tipo presurizado, es decir el control de presión regula la entrada de aire y el control de nivel regula la entrada de pasta al headbox.

Set Point (consigna) del control neumático de presión diferencial

Relación entre la entrada de presión diferencial y la salida neumática en los transmisores PT20-2, PT20-1

$$Pd_2 = m(P_{JT} - P_0) \quad (2.6)$$

$$Pd_1 = m(P_{JP} - P_0) \quad (2.7)$$

donde:

m = constante de proporcionalidad

Pd_2 = set point remoto del controlador de presión diferencial

Pd_1 = variación de la señal de proceso, sensado en la cámara de alta del transmisor de presión diferencial PdT20-1

P_{JT} = valor teórico de presión total

P_{JP} = valor real de presión total de proceso en la base del head box.

P_0 = presión referencial, se fija su valor tal que los transmisores de presión diferencial PdT20-1, PdT20-2 trabajen siempre dentro de su rango de calibración. Se reemplaza el conjunto de tubos burbujeados y el selector eléctrico por un regulador neumático de variación continua que diera el valor de la referencia de la ecuación (2.5)

En condiciones estables el controlador PIC - 20 hará que la señal del valor teórico remoto (Pd_2) del controlador sea igual a la señal de entrada de proceso (Pd_1).

$$\text{Es decir: } Pd_2 = Pd_1 \quad (2.8)$$

Reemplazando en esta ecuación los segundos miembros de las ecuaciones anteriores y simplificando se obtiene:

$$m(P_{JT} - P_0) = m(P_{JP} - P_0) \quad (2.9)$$

$$P_{JT} = P_{JP} \quad (2.10)$$

Así en condiciones estables la presión teórica o set point de presión del proceso (P_{JT}), fijado manualmente por el operador con HIC 20-1, será igual a la presión real de proceso dentro del head box (P_{JP})

La figura 2.5 muestra el control neumático correspondiente a la segunda modificación, modificado desde 21/01/1999 hasta 09/03/1999. Este control se puso en funcionamiento en 09/03/1999 hasta el 03/02/2000, aproximadamente un año de funcionamiento, lográndose lo siguiente:

- Estabilizar el sistema de control de nivel y presión del headbox.
- Establecer la automatización de control de presión, pudiéndose fijar la presión teórica de trabajo (set point de presión), después de 31 años.
- Que el lazo de control de presión regule variaciones de presión de 5 mm H₂O.

Para lo cual se hizo lo siguiente:

- Usar nuevos instrumentos neumáticos.
- Trabajar en un rango de 500 mm H₂O menor que el original 1100 mm H₂O.
- Simplificar la generación de la presión referencial, por un solo regulador, eliminando el conjunto original que consistía en tubos burbujeadores, solenoides, swich selector eléctrico.

Con los dos últimos pasos anteriores se llegó a estabilizar al sistema de control de nivel y presión del headbox de la máquina, después de 31 años.

- Por la facilidad como se ajustaba la presión total se hizo posible variar la velocidad Jet (V_J) de pasta sobre la tela a velocidad (V_W), dentro de alguna relación “r” aproximada, con lo cual se mejoró las propiedades físicas del papel.

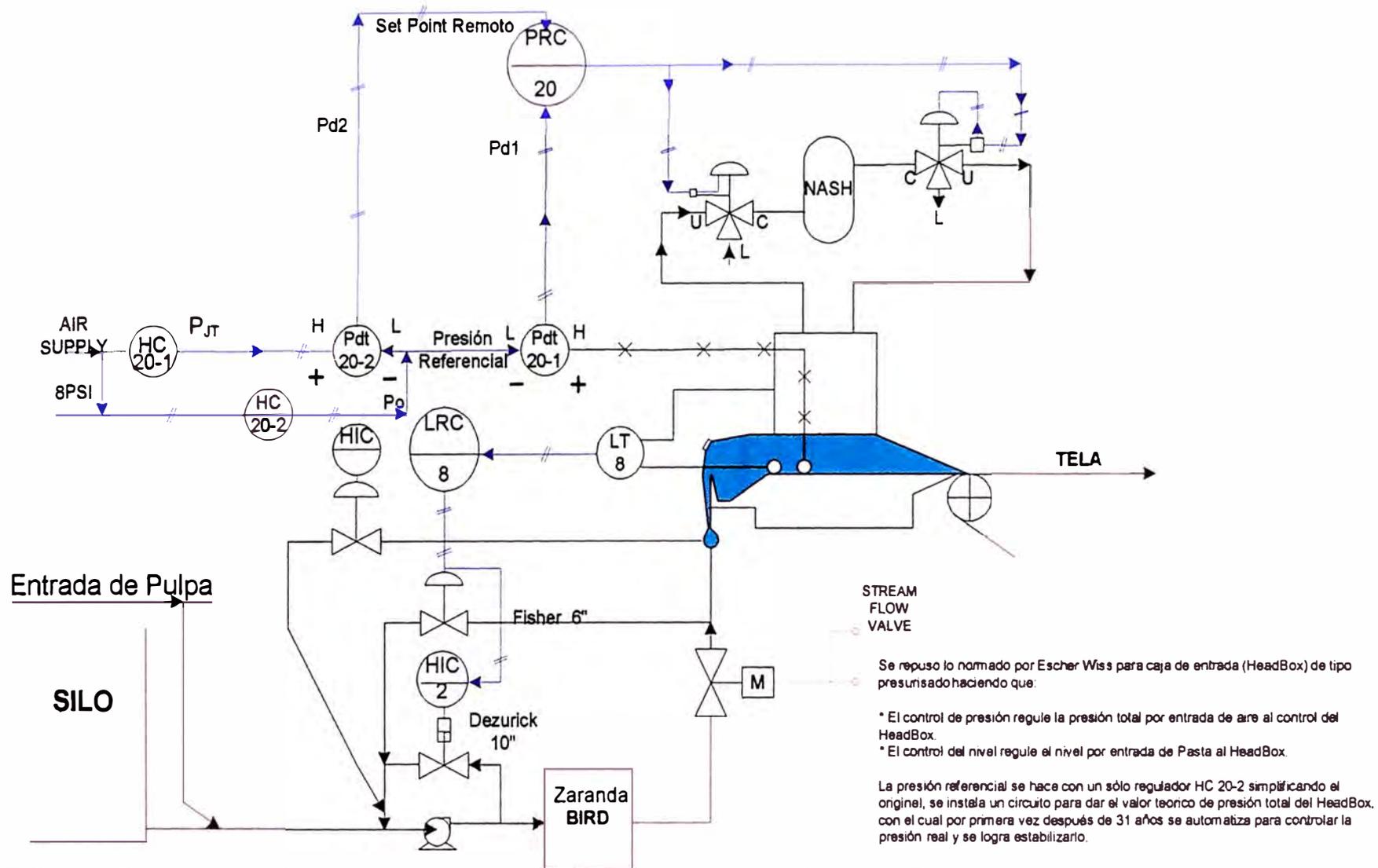


FIG.2.5 : Segunda modificación del sistema de control original del HeadBox (21/01/1999 - 09/03/1999, 09/03/1999-04/02/2000)

CAPÍTULO III

MODERNIZACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DEL HEADBOX EMPLEANDO TECNOLOGÍA MODERNA

3.1 Introducción

El parámetro “ r_p ” o relación de **velocidades** Jet a tela, es uno de los parámetros más importantes en la producción de papeles y cartones de calidad, como se deduce de las curvas del manual de Beloit Corporation que se muestran en el anexo donde se ve que esta relación de velocidades Jet a tela tiene una fuerte influencia sobre las propiedades físicas y formación del papel fabricado.

La modernización del sistema de control del headbox consiste en cambiar un obsoleto sistema de control neumático y semiautomático, que había sido objeto de muchas pruebas e intenciones de cambio desde 1968, por un moderno sistema de control electrónico y automático que permita controlar el parámetro “ r ”, que es la versión moderna para un mejor control sobre la calidad del papel fabricado.

El departamento de producción me solicitó desarrollar un control que permita controlar el parámetro “ r ” para conseguir la formación cuadrada del papel.

Como un paso previo al control electrónico y en base al estudio desarrollado aquí, se empezó modificando el antiguo sistema de control neumático desde 21/01/1999 al 09/03/1999, que venía operando desde 1971. Logrando la primera mejora efectiva con el nuevo control neumático similar al original, con el que trabajó la máquina desde 09/03/1999 al 03/02/2000.

Después del cual se pasó a un moderno sistema de control electrónico con PLC para controlar el parámetro “r” con el cual viene trabajando la máquina desde 03/02/2000 hasta la fecha.

Desde 09/03/1999 al 13/07/1999 desarrollé el modelamiento matemático para controlar el parámetro “r”, y en 13/07/1999 propuse esta teoría a la empresa que tenía necesidad de contar con un mejor control sobre las características físicas del papel, así que la empresa aprobó la implementación del sistema de control electrónico del headbox basado en esta teoría y usando instrumentación electrónica actual entre ellos el PLC.

El moderno sistema de control electrónico del Headbox se puso en funcionamiento en 03/02/2000.

3.2 Criterios usados para elegir la variable de proceso que permita controlar el parámetro “r”

3.2.1 Mejorar la propiedad física de resistencia a la tensión en dirección máquina y dirección transversa en el papel extensible clupak.

El papel extensible clupak es usado para elaborar bolsas de cemento, azúcar y otros. Esto se logrará llevando la relación obtenida en las pruebas físicas de resistencia a la tensión en dirección máquina (MD) a dirección transversa (CD) de valores promedio cerca de 1.5 a valores alrededor de 1.15.

Con el antiguo sistema de control del headbox semiautomático y neumático y sus diversos cambios desde 1968 hasta 09/03/1999 se había conseguido fijar el valor

Tensile ratio $\frac{(MD)}{(CD)} = 1.5$ como valor promedio tradicional el que a la vez se había

tomado como valor del índice de tensiones, en la norma de fabricación de papel extensible clupak.

El departamento de producción deseaba mejorar las propiedades físicas del papel clupak entre ellas la tensión hacia su forma cuadrática (Tensile ratio $\frac{MD}{CD} \rightarrow 1$) para acercarse a realicé un control basado en la figura 3.1 tomado del manual de Beloit Corporation, Bolton Research Centre; por lo que el nuevo sistema de control electrónico del headbox esperado debía controlar el parámetro “r” del proceso en valores dados por:

$$r \in [0.990, 0.995] \quad (3.1)$$

y tener como set point del parámetro r el valor central de este rango:

$$r_T = 0.9925 \quad (3.2)$$

El control debe corregir pequeñas variaciones del parámetro “r” y mantenerlo dentro del rango:

$$\Delta r \in \left[0, \frac{0.005}{2} \right] \quad (3.3)$$

siendo cero “0” la mínima variación de “r” de su valor teórico central “ r_T ” y $\frac{0.005}{2}$

la máxima variación aceptable de r de su valor teórico central “ r_T ”:

$$\Delta r_{\max} = \left(\frac{0.005}{2} \right) \quad (3.4)$$

expresado como porcentaje del valor teórico central $r_T = 0.9925$ es:

$$\frac{\Delta r_{\max}}{r_T} \times 100 = 0.25189 \Rightarrow \Delta r_{\max} = (0.25189\%) r_T \quad (3.5)$$

El error porcentual máximo permitido del parámetro r es 0.25189 por ciento de su valor teórico central, necesario para mantener la relación de tensiones dirección máquina a dirección transversa menor o igual a 1.15, es decir:

$$\textit{tensile ratio} \frac{(MD)}{(CD)} \leq 1.15 \quad (3.6)$$

La relación “tensile ratio $\frac{MD}{CD}$ ” vs parámetro “ r ” se muestra en la figura 3.1 (Fig. 6 – Pág. 21 del Manual de Beloit Corporation). Las curvas tienen forma de “V” y la “V” más pronunciada es la que corresponde a la de menor consistencia 0.41%. Esta es la investigación más reciente sobre las propiedades físicas del papel dependientes del parámetro “ r ”, realizado por Beloit Corporation. Balton Research Center.

Otra información más antigua que se encuentra en la página 535 del Informe del Congreso sobre pulpa y papel. “The world Pulp and Paper Week”, “New available techniques and current trends”, part I- April 7-10,1987” Stockholm International Fairs, arranged by the Swedish Association of pulp and paper engineers (SPCI and Ad Forum).

Se indica que dicha variación aceptable del parámetro r es el 1% de su set point.

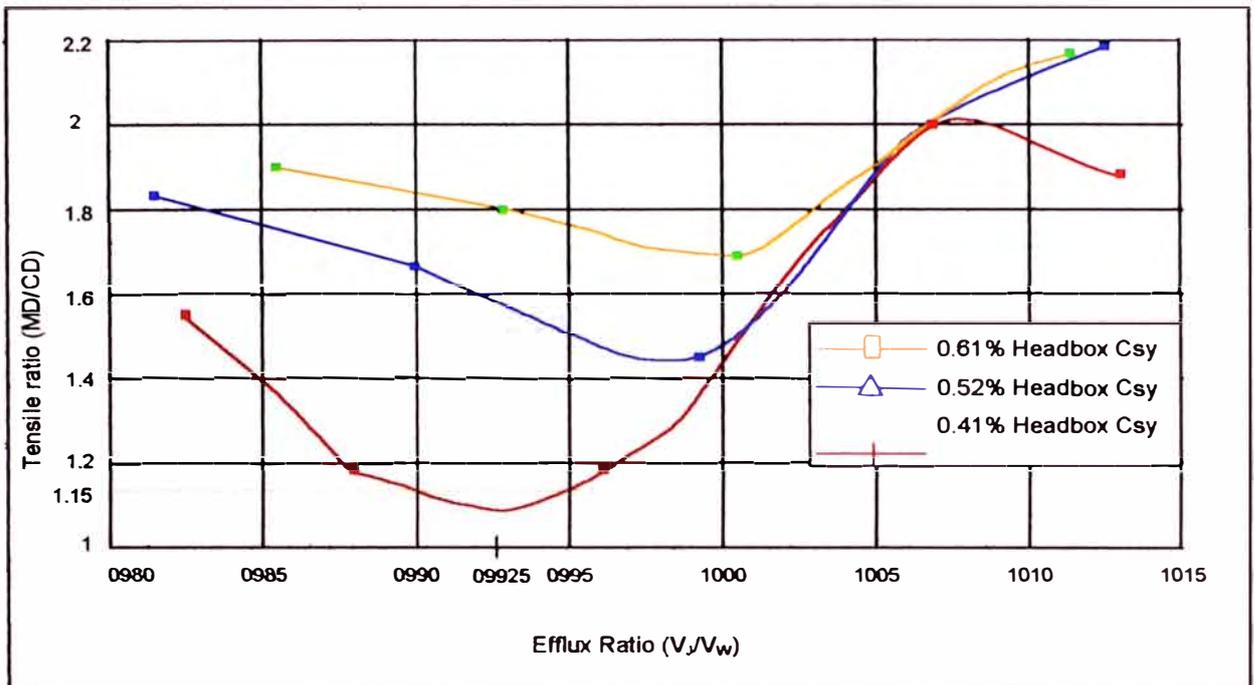


Figura 3.1: The Effect of Headbox Flow and Jet Speed on Tensile Ratio With the Fourdrinier/BelBond Wet End Arrangement.

3.2.2 Determinar la variable del proceso con mayor amplitud de variación que nos permita controlar mejor el parámetro “r”.

En la elección de la variable de control del proceso, para determinar el control del parámetro “r”, se ha tomado en cuenta la variable de proceso que tenga la mayor amplitud de variación, la cual se determina como sigue de las dos ecuaciones básicas que se ve en detalle en la sección 3.4.1. la cual relacionan la velocidad del Jet (V_J) y la presión total (P_J) dado por :

$$V_J = \sqrt{70.632 P_J} \quad (3.7)$$

y el parámetro “r” o relación de velocidades Jet a velocidad de tela está dado

por:

$$r = \frac{V_J}{V_w} \quad (3.8)$$

Se puede escribir la presión P_J y velocidad V_J en función de “r” y V_w como sigue:

$$V_J = r V_w \quad (3.9)$$

$$P_J = \frac{r^2 V_w^2}{70.632} \quad (3.10)$$

y también se puede escribir los cambios de presión ΔP_J y los cambios de velocidad de jet ΔV_J en función de los cambios del parámetro Δr a cualquier velocidad de operación constante de tela que esté dentro del rango de diseño mediante:

$$V_w \in [75, 450] \text{ m/min} \quad (3.11)$$

El parámetro “r” puede tomar valores dentro del rango:

$$r \in [r_o \dots r_c \dots r_f] \quad (3.12)$$

siendo:

r_o : el menor valor de r

r_c : es el valor central en el control se toma como set point

r_f : es el mayor valor de r

En el control, las variaciones Δr alrededor del valor central, estará dado como sigue:

$$\Delta r = r - r_c \quad (3.13)$$

Al rango del parámetro “r” según la ecuación (3.12) corresponde el siguiente rango de velocidad del Jet.

$$V_J \in [V_{J0} \dots V_{Jc} \dots V_{Jf}] \quad (3.14)$$

Según la ecuación (3.9)

$$V_{J0} = r_o V_w$$

$$V_{JC} = r_C V_W \quad (3.15)$$

$$V_J = r V_W$$

$$V_{JF} = r_F V_W$$

Y el control del parámetro “r” ante las variaciones de Δr alrededor del valor central r_C corresponde a las respectivas variaciones ΔV_J de velocidad del jet alrededor del valor central V_{JC} y está dado por:

$$\Delta V_J = V - V_{JC}$$

y de la ecuación (3.15) tenemos:

$$\begin{aligned} \Delta V_J &= r V_W - r_C V_W \\ \Delta V_J &= (r - r_C) V_W \\ \Delta V_J &= \Delta r V_W \end{aligned} \quad (3.16)$$

También al rango del parámetro “r” según la ecuación (3.12) corresponde el siguiente rango de presión total.

$$P_J \in [P_{J0} \cdots P_{JC} \cdots P_J \cdots P_{JF}] \quad (3.17)$$

Que según la ecuación (3.10) tenemos:

$$\begin{aligned} P_{J0} &= \frac{r_0^2 V_W^2}{70.632} \\ P_{JC} &= \frac{r_C^2 V_W^2}{70.632} \\ P_J &= \frac{r^2 V_W^2}{70.632} \\ P_{JF} &= \frac{r_F^2 V_W^2}{70.632} \end{aligned} \quad (3.18)$$

En el control del parámetro “r” ante las variaciones de Δr alrededor del valor central r_C corresponderá las variaciones de presión total ΔP_J alrededor del valor central P_{JC} que está dado por:

$$\Delta P_J = P_J - P_{JC} \quad (3.19)$$

de la ecuación (3.19) y de la ecuación (3.18) se obtiene:

$$\Delta P_J = \frac{(r^2 - r_C^2) V_w^2}{70.632} \quad (3.20)$$

de la ecuación (3.13) $r = \Delta r + r_C$

Reemplazando en la ecuación (3.20) y simplificando se obtiene:

$$\Delta P_J = \frac{[(\Delta r)^2 + 2\Delta r \cdot r_C] V_w^2}{70.632}$$

O también:

$$\Delta P_J = \frac{\Delta r (\Delta r + 2r_C) V_w^2}{70.632} \quad (3.21)$$

La ecuación (3.21) expresa la variación de la presión total ΔP_J como una función de la variación del parámetro Δr .

Expresando los cambios $\Delta P_J, \Delta V_J$ y Δr , dados por las ecuaciones (3.21), (3.16) y (3.13) respectivamente, como porcentajes de sus valores centrales P_c, V_{jc}, r_C , dados por sus ecuaciones (3.18), (3.15) y r_C definido en la ecuación (3.12) respectivamente. En función del porcentaje de variación del parámetro “r” y para una velocidad constante de operación de tela V_w se obtiene:

Dividiendo ambos miembros de la ecuación (3.13) entre el valor central r_c como sigue:

$$\frac{\Delta r}{r_c} = \frac{r - r_c}{r_c}$$

De donde:
$$\frac{\Delta r}{r_c} 100 = \frac{r - r_c}{r_c} 100 \quad (3.22)$$

La ecuación (3.22) expresa la variación porcentual del parámetro “r”, respecto a su valor central r_c .

Dividiendo miembro a miembro la ecuación (3.16) y ecuación (3.15) y simplificando se consigue:

$$\frac{\Delta V_j}{V_{jc}} = \frac{\Delta r}{r_c}$$

donde:
$$\frac{\Delta V_j}{V_{jc}} 100 = \frac{\Delta r}{r_c} 100 \quad (3.23)$$

La ecuación (3.23) expresa que la variación porcentual de velocidad del jet ΔV_j , respecto a su valor central V_{jc} , es igual a la variación porcentual del parámetro Δr , respecto de su valor central r_c .

Dividiendo miembro a miembro la ecuación (3.21) y la ecuación (3.18) y simplificando obtenemos:

$$\frac{\Delta P_j}{P_{jc}} = \frac{\Delta r(\Delta r + 2r_c)}{r_c^2}$$

donde :
$$\left(\frac{\Delta P_j}{P_{jc}} 100 \right) = \frac{\Delta r}{r_c} 100 \left[\frac{\Delta r}{r_c} + 2 \right] \quad (3.24)$$

La ecuación (3.24) expresa que la variación porcentual de la presión total ΔP_J , respecto de su valor central P_c es igual a $\left[\frac{\Delta r}{r_c} + 2 \right]$ veces la variación porcentual del parámetro Δr respecto de su valor central r_c .

Así la variación porcentual de la presión total es mayor que el doble de la variación porcentual del parámetro “r”.

Ahora comparando las ecuaciones (3.24) y (3.23) obtenemos:

$$\left(\frac{\Delta P_J}{P_{JC}} 100 \right) = \left(\frac{\Delta V_J}{V_{JC}} 100 \right) \left[\frac{\Delta r}{r_c} + 2 \right] \quad (3.25)$$

Así en el control del parámetro “r” las variaciones porcentuales de la presión total respecto de su valor central P_c es $\left[\frac{\Delta r}{r_c} + 2 \right]$ veces mayor que las variaciones porcentuales de la velocidad del jet respecto del valor central V_c .

De las ecuaciones (3.24), (3.25) se obtiene, que para toda variación Δr en el control del parámetro “r”, se obtendrá que la variable de mayor variación porcentual respecto de su valor central es la presión total y que esta variación porcentual es independiente de la velocidad de la tela.

Comparando las ecuaciones (3.21) y (3.16)

$$\Delta P_J = \frac{\Delta r (\Delta r + 2 r_c) V_w^2}{70.632}$$

$$\Delta V_J = \Delta r \cdot V_w$$

Se obtiene

$$\frac{\Delta P_J}{\Delta V_J} = \left(\frac{\Delta r + 2 r_c}{70.632} \right) V_w \quad (3.26)$$

Donde la velocidad constante de operación de tela V_w puede tomar valores dados por $V_w \in [75,450] \text{ m/min}$.

Según las ecuaciones (3.25) y (3.26) y ante toda variación de Δr , en el control del parámetro “r”, se determina que la variable de mayor amplitud de variación es la presión total.

Por lo que la presión total (P_j) es la variable de proceso elegida para controlar el parámetro “r”, por obtener una mayor amplitud de variación del proceso sobre las otras dos variables, velocidad del Jet V_j y parámetro “r” alrededor del valor teórico (set point) de operación.

Para ilustrar esta teoría consideramos el sistema de control electrónico del headbox basado en la figura 3.1, curva en forma de “V” mas pronunciada y de menor consistencia 0.41% para fabricar papel con:

$$\text{Tensile ratio} \frac{(MD)}{(CD)} \leq 1.15$$

Donde “r” debe tomar valores según:

$$r \in [0.990, 0.995]$$

Y el valor central r_c es el valor teórico del control dado por:

$$r_c = r_r = \frac{0.990 + 0.995}{2} = 0.9925$$

Y las variaciones del parámetro “r” alrededor de su valor teórico está dado por:

$$\Delta r \in \left[0, \frac{0.005}{2} \right]$$

Donde para la variación máxima aceptable del parámetro alrededor de su valor teórico está dado por:

$$\Delta r_{\max} = \frac{0.995 - 0.990}{2} = 0.0025$$

Tenemos las siguientes relaciones de presión y velocidad del jet:

- La variación porcentual máxima Δr_{\max} con relación al valor teórico r_T dado por:

$$\frac{\Delta r_{\max}}{r_T} 100$$

- Las correspondientes variaciones máximas aceptables de presión total ($\Delta P_{J_{\max}}$), la velocidad del jet ($\Delta V_{J_{\max}}$) en función de Δr_{\max} y r_T lo obtenemos de las ecuaciones (3.21), (3.16) y (3.26).

$$\Delta P_{J_{\max}} = \frac{\Delta r_{\max} (\Delta r_{\max} + 2r_T) V_w^2}{70.632} \quad (3.27)$$

$$\Delta V_{J_{\max}} = \Delta r_{\max} V_w \quad (3.28)$$

$$\frac{\Delta P_{J_{\max}}}{\Delta V_{J_{\max}}} = \left(\frac{\Delta r_{\max} + 2r_T}{70.632} \right) V_w \quad (3.29)$$

para todo $V_w \in [75, 450]$ m/min

- Las relaciones entre las variaciones porcentuales máximas aceptables de las variables presión total y velocidad del jet y la variación porcentual máxima aceptable del parámetro r , en función de Δr_{\max} y r_T lo obtenemos en las ecuaciones (3.24), (3.23), (3.25) y son independientes de la velocidad de tela V_w como sigue:

$$\left(\frac{\Delta P_{J \max}}{P_{JT}} 100 \right) = \left(\frac{\Delta r_{\max}}{r_t} 100 \right) \left[\frac{\Delta r_{\max}}{r_t} + 2 \right] \quad (3.30)$$

También

$$\frac{\left(\frac{\Delta P_{J \max}}{P_{JT}} 100 \right)}{\left(\frac{\Delta r_{\max}}{r_t} 100 \right)} = \left(\frac{\Delta r_{\max}}{r_t} + 2 \right)$$

$$\left(\frac{\Delta V_{J \max}}{V_{JT}} 100 \right) = \left(\frac{\Delta r_{\max}}{r_t} 100 \right) \quad (3.31)$$

$$\frac{\left(\frac{\Delta P_{J \max}}{P_{JT}} 100 \right)}{\left(\frac{\Delta V_{J \max}}{V_{JT}} 100 \right)} = \left[\frac{\Delta r_{\max}}{r_t} + 2 \right] \quad (3.32)$$

De las ecuaciones (3.15), (3.18)

$$V_{JT} = r_t V_w \quad (3.33)$$

$$P_{JT} = \frac{r_t^2 V_w^2}{70.632} \quad (3.34)$$

donde V_w es la velocidad de operación constante de la tela dado por:

$$V_w \in [75, 450] \text{ m/min}$$

Ahora reemplazando en estas expresiones los valores r_c y Δr_{\max} , tomados de la figura 3.1 - la curva de menor consistencia 0.41% dado por :

$$r_t = 0.9925$$

$$\Delta r_{\max} = 0.0025$$

y considerando la velocidad de operación máxima de tela, como:

$$V_w = 450 \text{ m/min}$$

Tenemos la variación porcentual máxima de Δr_{\max} con relación a su valor teórico r_t como:

$$\frac{\Delta r_{\max}}{r_t} 100 = \left(\frac{0.0025}{0.9925} \right) 100 = 0.25189$$

Las variaciones aceptables de presión total y velocidad del jet lo obtenemos de las ecuaciones (3.27), (3.28) y (3.29)

De la ecuación (3.27) $\Delta P_{J_{\max}} = 14.2452 \text{ mm H}_2\text{O}$

De la ecuación (3.28) $\Delta V_{\max} = 1.125 \text{ m/min}$

De la ecuación (3.29) $\frac{\Delta P_{J_{\max}}}{\Delta V_{J_{\max}}} = 12.66246177 \frac{\text{mm H}_2\text{O}}{\text{m/min}}$

La relación entre las variaciones porcentuales de presión y velocidad del jet y parámetro "r" se dan según las ecuaciones (3.30) (3.31, (3.32)

De la ecuación (3.30) se obtiene $\frac{\Delta P_{J_{\max}}}{P_{J_{\max}}} 100 = 0.504412819$

que expresa la variación máxima aceptable de la presión total y es igual a 0.5044 % del valor teórico de la presión total y es independiente de la velocidad de la tela.

También
$$\frac{\left(\frac{\Delta P_{J_{\max}}}{P_{J_{\max}}} 100 \right)}{\left(\frac{\Delta r_{\max}}{r_t} 100 \right)} = \left[\frac{\Delta r_{\max}}{r_t} + 2 \right] = 2.002518892$$

Expresa que la variación porcentual de la presión total es 2.002518892 veces mayor que la variación porcentual del parámetro "r".

De la ecuación (3.31)
$$\left(\frac{\Delta V_{J_{\max}}}{V_{J_{\max}}} 100 \right) = \left(\frac{\Delta r_{\max}}{r_t} 100 \right) = 0.251889168$$

Expresa que la variación porcentual de la velocidad del jet es igual a la variación porcentual del parámetro “r”.

$$\text{De la ecuación (3.32)} \quad \left(\frac{\frac{\Delta P_{J \max}}{P_{JT}} 100}{\frac{\Delta V_{J \max}}{V_{JT}} 100} \right) = \left[\frac{\Delta r_{\max}}{r_t} + 2 \right] = 2.002518892$$

Expresa que la variación porcentual máxima aceptable de la presión total es $\left[\frac{\Delta r_{\max}}{r_t} + 2 \right]$ veces mayor que la variación porcentual máxima aceptable de la velocidad del jet.

Siendo los valores teóricos de presión total y velocidad del jet como sigue:

$$V_{JT} = r_t V_w \Rightarrow V_{JT} = 446.625 \text{ m/min}$$

$$P_{JT} = \frac{r_t^2 V_w^2}{70.632} \Rightarrow P_{JT} = 2824.129157 \text{ mm H}_2\text{O}$$

De estos resultados se aprecia nuevamente que la magnitud de las variaciones de presión total y la variación porcentual de la presión son mayores que para las otras variables velocidad del jet y parámetro “r”.

Por lo que la presión total (P_J) es la variable de proceso elegida para controlar el parámetro “r”.

3.3 Sensibilidad de los transmisores de presión diferencial para el control de presión del headbox

La sensibilidad de los transmisores se establece de la condición que debe cumplir el rango de calibración del transmisor de presión diferencial en el control de presión, para el sistema de control del headbox basado en la figura 3.1 – curva de menor consistencia 0.41%.

La máxima variación permitida $\Delta P_{J_{\max}}$ de la presión total del proceso P_{JP} alrededor del valor teórico P_{JT} está dado por la ecuación (3.27) calculado para cada velocidad de tela V_w como :

$$\Delta P_{J_{\max}} = \frac{\Delta r_{\max} (\Delta r_{\max} + 2r_T) V_w^2}{70.632}$$

Así en la figura 3.1 – Curva de menor consistencia 0.41% el valor real de presión de proceso P_{JP} estará comprendido ente los valores extremos $(P_{JT} - \Delta P_{J_{\max}})$ y $(P_{JT} + \Delta P_{J_{\max}})$ variando alrededor del valor teórico de presión P_{JT} .

$$P_{JT} - \Delta P_{J_{\max}} \leq P_{JP} \leq P_{JT} + \Delta P_{J_{\max}}$$

Expresado este resultado en la forma

$$P_{JP} = P_{JT} \pm \Delta P_{J_{\max}} \quad (3.35)$$

Así en el control de presión total, para el control del parámetro “r”, el valor real de la presión de proceso P_{JP} será igual a la presión teórica P_{JT} más o menos la desviación máxima aceptable calculada según ecuación (3.27) para cada velocidad de tela V_w .

Llevando las ecuaciones (3.27), (3.34) a la ecuación (3.35) obtenemos:

$$P_{JP} = \frac{r_i^2 V_w^2}{70.632} \pm \frac{\Delta r_{\max} (\Delta r_{\max} + 2r_T) V_w^2}{70.632} \quad (3.36)$$

El transmisor de presión diferencial elegido para sensar las variaciones de presión del proceso ΔP_j dado por la ecuación (3.21) o desviaciones del valor real de la presión P_{JP} del valor teórico P_{JT} , puede tomar valores desde 0 hasta el máximo

valor permitido $\Delta P_{J \max}$ según la figura 3.1 curva de menor consistencia a 0.41% para cada velocidad de tela V_w .

$$\text{Así} \quad \Delta P_J \in [0, \Delta P_{J \max}] \quad (3.37)$$

Para el diseño se tomará la máxima variación permitida de presión.

El transmisor de presión diferencial debe ser capaz de sensar la variación $\Delta P_{J \max}$ y enviar las variaciones de señal “e” al controlador para que éste haga la corrección hacia menores variaciones de amplitud alrededor del valor teórico de presión P_{Jt} .

Expresando la ecuación (3.27) como un porcentaje del span de calibración del transmisor (P_d) tenemos:

$$\frac{\Delta P_{J \max}}{P_d} 100 = \left(\frac{\Delta r_{\max} (\Delta r_{\max} + 2 r_T) V_w^2}{70.632 P_d} \right) 100 \quad (3.38)$$

La ecuación (3.38) da la variación porcentual de la máxima variación permitida con relación al span de calibración, a la vez es del mismo valor que la correspondiente variación porcentual de la señal de salida del transmisor al controlador dado por:

$$\frac{e_{\max}}{E} 100 \quad (3.39)$$

Donde: “e” es la variación de señal de salida del transmisor y “E” es la salida del transmisor correspondiente a su span de calibración

$$e_{\max} = K \Delta P_{J \max}$$

$$E = K P_d$$

K = constante de proporcionalidad

Así:

$$\frac{e_{\max}}{E} 100 = \frac{\Delta P_{J_{\max}}}{P_d} 100 = \left(\frac{\Delta r_{\max} (\Delta r_{\max} + 2r_i) V_w^2}{70.632 P_d} \right) 100 \quad (3.40)$$

Un control basado en la figura 3.1 – Curva de menor consistencia 0.41%

$$\text{con } \Delta r_{\max} = 0.0025$$

$$r_i = 0.9925$$

Y para la velocidad de operación de la tela dentro del rango de diseño

$$V_w \in [75, 450] \text{ m/min}$$

obtenemos de la ecuación (3.27)

$$\Delta P_{J_{\max}} \in [0.39570193, 14.2452695] \text{ mm H}_2\text{O} \quad (3.41)$$

La ecuación (3.41) da el rango de valores que puede tomar la variación máxima permitida de la presión del proceso, correspondiente al rango de velocidad de la tela, y de la ecuación (3.40) obtenemos:

$$\begin{aligned} \frac{e_{\max}}{E} 100 &= \frac{\Delta P_{J_{\max}}}{P_d} 100 = \left(\frac{\Delta r_{\max} (\Delta r_{\max} + 2r_i) V_w^2}{70.632 P_d} \right) 100 \\ &\in \left[\frac{0.39570193}{P_d}, \frac{14.2452695}{P_d} \right] 100 \end{aligned} \quad (3.42)$$

Según esta ecuación (3.42), el rango de la variación porcentual de la señal de salida del transmisor al controlador es igual en valor a la variación porcentual de la variación máxima permitida de variación de presión del proceso con relación al span del transmisor.

En operación normal se han encontrado las siguientes observaciones:

A bajas velocidades de tela son mínimas las variaciones de nivel y presión en el headbox que sea debido a la presencia de turbulencia de la pulpa en suspensión y por la presencia de aire en la pasta, que tiende a presurizar el colchón de aire, que el transmisor censaría y el control tendería a corregir estas variaciones aleatorias. Por estas observaciones se elige el rango de calibración del transmisor P_d cumpliendo lo siguiente:

Con el P_d , el transmisor debe sensar sin dificultad la máxima variación permitida del proceso dado por $\Delta P_{J_{\max}}$ calculado a la mayor velocidad de tela de 450 m/min y en base a la figura 3.1 –Curva de consistencia 0.41%.

La variación de señal de salida del transmisor al controlador correspondiente a las variaciones de presión del proceso debe ser lo suficientemente apreciable para que el controlador haga la corrección alrededor de su valor teórico P_{JT}

La mayor de las variaciones porcentuales de la señal de salida del transmisor al controlador es igual a la mayor de las variaciones porcentuales de la variación máxima permitida de variación de presión del proceso $\Delta P_{J_{\max}}$, con respecto al span del transmisor dado por la ecuación (3.42)

$$\frac{e_{\max}}{E} 100 = \frac{\Delta P_{J_{\max}}}{P_d} 100 = \left(\frac{14.2452695}{P_d} \right) 100 \quad (3.43)$$

3.3.1 Sensibilidad del transmisor neumático de presión diferencial para el control de presión del headbox.

Basado en la figura 3.1 y curva de menor consistencia 0.41%

Esta se establece de la condición que debe cumplir el rango de calibración del transmisor neumático de presión diferencial en el control neumático de presión del headbox, como sigue:

Se observó que a mayores velocidades de tela los controladores neumáticos usados en el headbox corrigen mejor si la amplitud pico a pico de las variaciones porcentuales de la señal neumática del transmisor, correspondientes a las variaciones del proceso alrededor de la presión teórica de control P_{JT} , es mayor o igual al 5%.

Así según la ecuación (3.39) que define la mitad de tal variación pico a pico.

$$\frac{e_{\max}}{E} 100 \geq \frac{5}{2} \quad (3.44)$$

Esta condición se establece debido a la poca exactitud de los instrumentos neumáticos para controlar pequeñas variaciones de presión en el headbox, según la ecuación (3.40):

$$\frac{e_{\max}}{E} 100 = \frac{\Delta P_{j_{\max}}}{P_d} 100 = \left(\frac{\Delta r_{\max} (\Delta r_{\max} + 2r_i) V_w^2}{70.632 P_d} \right) 100 \geq \frac{5}{2} \quad (3.45)$$

Eligiendo la mayor variación porcentual de la señal de salida del transmisor al controlador tenemos según la ecuación (3.41).

$$\left(\frac{14.2452695}{P_d} \right) 100 \geq \frac{5}{2} \quad (3.46)$$

Se calcula de la ecuación (3.45) trabajando a máxima velocidad de tela, máxima presión total y máxima velocidad del jet de pasta.

$$P_{JT_{\max}} = 2824.129157 \quad V_{\text{jet}_{\max}} = 446.625 \text{ m/min}$$

Con

$$V_w = 450 \text{ m/min}$$

$$\Delta r_{\max} = 0.0025$$

$$r_i = 0.9925$$

Obteniendo en la ecuación (3.46) y simplificando obtenemos:

$$569.81 \text{ mm H}_2\text{O} \geq P_d$$

Eligiendo el valor

$$P_d = 500 \text{ mm H}_2\text{O}$$

Como el valor del span de calibración del transmisor neumático de presión diferencial para tener un control sobre las variaciones de presión para el control del parámetro “r” basado en la figura 3.1 curva de menor consistencia 0.41% para fabricar papeles con Tensile ratio $\frac{(MD)}{CD} \leq 1.15$

Habiéndose obtenido el span de calibración del transmisor neumático de presión diferencial como:

$$P_d = 500 \text{ mm H}_2\text{O}$$

Entonces de la ecuación (3.44)

$$\frac{e_{\max}}{E} 100 = \frac{\Delta P_{J \max}}{P_d} 100 = \left(\frac{14.2452695}{500} \right) 100 = 2.8490539$$

Con lo cual se cumple la ecuación (3.46): $2.8490539 > \frac{5}{2}$

Que es la condición para que los controladores neumáticos del headbox controlen las variaciones de presión del proceso por debajo de la variación máxima permitida para cada velocidad de tela y para controlar el parámetro “r” basado en la figura 3.1 y en la curva de menor consistencia 0.41%

Así el controlador de presión diferencial controlará eficazmente las desviaciones ΔP_j (dadas por las ecuaciones (3.18), (3.21)) del valor real de la presión de proceso P_{JP} respecto del valor teórico P_{JT} de modo que el valor real de la presión P_{JP} estará comprendido entre los valores extremos:

$$(P_{JT} - \Delta P_{J\max}) \text{ y } (P_{JT} + \Delta P_{J\max})$$

$$P_{JT} - \Delta P_{J\max} \leq P_{JP} \leq P_{JT} + \Delta P_{J\max}$$

Expresando el resultado en la forma de la ecuación (3.35) ó (3.36)

$$P_{JP} = P_{JT} \pm \Delta P_{J\max}$$

$$P_{JP} = \frac{r_t^2 V_w^2}{70.632} \pm \frac{\Delta r_{\max} (\Delta r_{\max} + 2r_t) V_w^2}{70.632} \quad (3.47)$$

Siendo así que el valor real de presión total del proceso P_{JP} será igual a la presión teórica P_{JT} mas o menos la desviación máxima aceptable para cada velocidad de tela, $\Delta P_{J\max}$ desviación que será detectada por el transmisor neumático de presión diferencial cuyo span de calibración sea 500 mm H_2O .

Así un control neumático de presión total P_{JP} del proceso se elaborará dando indirectamente la presión teórica P_{JT} y sumando a éste las variaciones $\Delta P_{J\max}$ controladas por medio de un control de presión diferencial que recibe señal del transmisor de presión diferencial cuyo span es 500 mm H_2O .

3.3.2 Sensibilidad del transmisor electrónico de presión diferencial del control de presión del headbox usando un PLC

Esta se establece de la condición que debe cumplir el rango de calibración del transmisor electrónico de presión diferencial del control por PLC de la presión del headbox, para controlar las variaciones de presión total.

El controlador electrónico del PLC es de alta resolución y debe corregir las variaciones de entrada de corriente enviada por el transmisor electrónico de presión total.

Según las especificaciones del transmisor electrónico usado IDP10-Foxboro:

El transmisor electrónico puede sensar la variable de proceso $2\Delta P$ mayor o igual a $2(0.07\%$ de su span de calibración.)

$$\text{Es decir :} \quad 2\Delta P \geq \frac{2(0.07)}{100} P_d$$

donde:

P_d = span de calibración del transmisor electrónico

Así esta expresión define la variación $2\Delta P$ de proceso que el transmisor electrónico puede detectar y ser corregido en el PLC.

También puede escribirse como:

$$\frac{\Delta P}{P_d} 100 \geq 0.07 \quad (3.48)$$

La ecuación (3.48) da la variación porcentual de la variación ΔP de presión del proceso en el control con relación al span de calibración P_d del transmisor expresado en la forma de la ecuación (3.40) tenemos:

$$\frac{e_{\max}}{E} 100 = \frac{\Delta P_{\max}}{P_d} 100 = \left(\frac{\Delta r_{\max} (\Delta r_{\max} + 2r_i) V_w^2}{70.632 P_d} \right) 100 \geq 0.07 \quad (3.49)$$

De la ecuación (3.34) la presión total aplicada al headbox es:

$$P_J = \frac{r^2 V_w^2}{70.632}$$

Calculando con la máxima capacidad de diseño $V_w = 450$ m/min y $r = 1$

tenemos la presión máxima aplicada al headbox como:

$$P_{J_{\max}} = 2867 \text{ mm H}_2\text{O}$$

Que se elige como el span de calibración P_d del transmisor así:

$$P_d = P_{J_{\max}} = 2867 \text{ mmH}_2\text{O}$$

Para tener un control basado en la figura 3.1 - Curva de consistencia 0.41% , se lleva a la ecuación (3.49).

$$\Delta r_{\max} = 0.0025$$

$$r_r = 0.9925$$

$$P_d = 2867 \text{ mmH}_2\text{O}$$

$$\frac{e_{\max}}{E} 100 = \frac{\Delta P_{\max}}{2867} 100 = \frac{0.0025(0.0025 + (2)0.9925)V_w^2}{(70.632)2867} 100 \geq 0.07 \quad (3.50)$$

De donde para $V_w \in [169, 450] \text{ m/min}$

Llevando estos valores a la ecuación (3.27) se obtiene:

$$\Delta P_{\max} \in [2.00918, 14.2452695] \text{ mmH}_2\text{O}$$

de la ecuación (3.50) con $E = 16 \text{ mA}$

Se obtiene $e_{\max} \in [0.011212, 0.079499236] \text{ mA}$

Es decir el transmisor electrónico sensorá variaciones de proceso según la figura 3.1 – Curva de menor consistencia 0.41% .

Así para velocidad es de tela $V_w \geq 169 \text{ m/min}$

el transmisor electrónico sensorá las variaciones de presión del proceso mayores o iguales a $2.00918 \text{ mmH}_2\text{O}$

De la ecuación (3.27) $\Delta P_{J_{\max}} \geq 2.00918 \text{ mmH}_2\text{O}$

Y para un transmisor electrónico con salida de 4-20 mA

Obtenemos $E = 16 \text{ mA}$

Y de la ecuación (3.40) se obtiene $e_{\max} \geq 0.0112 \text{ mA}$

Para velocidades menores a 169 m/min las variaciones de nivel y presión en el headbox son mínimas por la poca turbulencia, así el transmisor podrá sensar variaciones de 2.00918 mm H₂O que se corregirá por medio del controlador

$$\text{Así: } P_d = 2867 \text{ mm H}_2\text{O} \quad (3.51)$$

Es el span de calibración del transmisor electrónico cuya exactitud es $\pm 0.07\%$ de su span.

Con lo cual se obtendrá un control electrónico de presión total para controlar la presión en todo el rango de operación

$$P_{JP} \in [0, 2867] \text{ mm H}_2\text{O}$$

Correspondiente al rango de velocidad de tela $V_w \in [0, 450]$ m/min en base a la figura # 3.1 - curva de menor consistencia 0.41% que nos garantizaría las mismas propiedades físicas del papel logrados para $r_i = 0.9925$ y $\Delta r = 0.0025$ en este caso, normalmente el parámetro $r \in [0.990, 0.995]$ será seleccionado por el operador en cada producción como uno de los parámetros principales para lograr resultados en las propiedades físicas del papel extensible clupak con:

$$\text{Tensile ratio } \frac{(MD)}{CD} \leq 1.15.$$

Con el control electrónico con PLC se controla el valor real de la presión total del proceso P_{JP} que debe ser igual a la presión teórica P_{JT} más o menos la variación máxima aceptable de presión para cada velocidad de tela.

De las ecuaciones (3.35) y (3.36)

$$P_{JP} = P_{JT} \pm \Delta P_{J \max}$$

$$P_{JP} = \frac{r_i^2 V_{JP}^2}{70.632} \pm \frac{\Delta r_{\max} (\Delta r_{\max} + 2r_i) V_{JP}^2}{70.632} \quad (3.52)$$

Con este circuito de presión con PLC se abandona el modelo de circuito de presión diferencial que fue usado con instrumentos de control neumático desde 1968 al 2000/02/03.

3.4 Diseño del sistema de control electrónico de presión total y nivel del headbox

3.4.1 Modelamiento matemático para el sistema de control electrónico de presión total del headbox

El modelo matemático desarrollado para obtener el control de la relación “r” de velocidad Jet a tela, así como la velocidad de Jet está basado en lo siguiente:

- a) La velocidad del Jet (V_J), es la velocidad media de salida (V_J) de un stock Jet calculada por la ecuación.

$$V_J = C_v \sqrt{2gh} \quad (3.53)$$

Donde:

C_v = es el coeficiente de descarga a velocidad y $C_v \approx 1$

h = es la altura de stock Jet, medida cerca de la regla salida del headbox.

V_J = es la velocidad media, se mide en la vena contraria del chorro de salida del headbox sobre la tela.

Para expresar las variables velocidad Jet (m/min) y presión ($mm H_2O$) en unidades de ingeniería usadas en el headbox se usa la ecuación:

$$V_J = C_v \sqrt{2gh}$$

Haciendo:

$$C_v = 1 ; \quad g = 9.81 \frac{m}{seg^2} = 9.81(60)(60) \frac{m}{min^2}$$

$$h = P_{mm} H_2O = \frac{P}{1000} m$$

Llevando estos valores a la ecuación anterior se obtiene:

$$V_J = 1 \sqrt{2(9.81)60(60) \frac{P}{1000}} \text{ m/min.} = \sqrt{70.632 P} \text{ m/min.}$$

$$\text{Así:} \quad V_J = \sqrt{70.632 P} \text{ será la ecuación a usarse} \quad (3.54)$$

Donde P esta dado en mm H₂O y V_J en m/min, que son las unidades de ingeniería en la ecuación (3.54)

b) La razón de velocidades Jet a tela es la relación entre la velocidad de descarga stock fuera del headbox y la velocidad de la tela calculado por la

$$\text{ecuación:} \quad r = \frac{V_{Jet}}{V_{Wire}} \quad (3.55)$$

c) El método desarrollado para controlar la presión total (P_J) así como para obtener la razón deseada de velocidades Jet a tela (r) y la velocidad Jet V_J es por realimentación de la presión sensada en el headbox.

Presión teórica (P_{JT}) del control de presión total, que establece la relación "r_p" de velocidades jet a tela en el headbox

De la ecuación que establece la relación entre la presión teórica (P_{JT}) y la velocidad teórica de Jet (V_{JT}) en el headbox.

$$\text{Dado por:} \quad V_{JT} = \sqrt{70.632 P_{JT}} \quad (3.56)$$

V_{JT} = velocidad teórica del Jet expresada en m/min.

P_{JT} = presión teórica en el headbox expresado en mm H₂O

Y de la ecuación que define la relación teórica “ r_T ” entre la velocidad teórica del Jet (V_{JT}) a la velocidad real de la tela (V_w).

Dado por:
$$r_T = V_{JT} / V_w \quad (3.57)$$

De la ecuación (3.57)
$$V_{JT}^2 = r_T^2 V_w^2 \quad (3.58)$$

De la ecuación (3.56)
$$P_{JT} = \frac{V_{JT}^2}{70.632} \quad (3.59)$$

La ecuación (3.59) indica que el valor teórico de la presión total es proporcional al cuadrado de la velocidad teórica de jet. De la ecuación (3.58) y (3.59) se obtiene:

$$P_{JT} = r_T^2 \left(\frac{V_w^2}{70.632} \right) \quad (3.60)$$

La ecuación (3.60) indica el valor teórico instantáneo de la presión total (P_{JT}) como el cuadrado (V_w^2) de la velocidad real instantánea de la tela multiplicado por el cuadrado del parámetro (r_T^2) dividido entre 70.632.

Donde el parámetro teórico r_T está dado como la relación de velocidad teórica del Jet a la velocidad real de la tela y es un valor constante asignado por el operador en cada ejecución de la máquina.

Donde V_w es la velocidad real instantánea de la tela medida por el tacogenerador a la cual se estiman las variaciones de señal por efecto de acoplamiento del tacogenerador al eje del motor que mueve la tela y por resbalamiento entre la superficie del rollo de accionamiento, que abrasa fuertemente la tela para ser movida.

Como " P_{JT} " es el set point del control de presión total éste deberá ser constante para cada velocidad de tela V_w .

Pero como V_w obtenido por el tacogenerador presenta variaciones de señal de carácter aleatorio, es decir unas veces por exceso y otras por defecto en el resultado de la velocidad de medida se tomará como velocidad de tela el valor promedio (\bar{V}_w) de nueve muestras de la velocidad instantánea (V_w) dado por el tacogenerador, el cual será el valor que más se aproxima al valor real de la velocidad de tela al promediar todos los resultados, los errores por exceso tendrán a compensarse con los errores por defecto y el valor que más se aproxime al valor real de la velocidad de tela será el valor medio, por esta razón se toma el promedio de 9 muestras de la velocidad instantánea de tela obtenido por el tacogenerador como el valor fiable al verdadero valor de velocidad de tela.

$$\text{Así} \quad \bar{V}_w = \frac{\sum_1^9 V_w}{9} \quad (3.61)$$

De donde la ecuación (3.60) queda:

$$P_{JT} = \frac{r_T^2 \bar{V}_w^2}{70.632} \quad (3.62)$$

Es el valor de la presión total que se toma como set point.

Las ecuaciones (3.61) y (3.62) se representan en la figura 3.2.

La ecuación (3.61) se evalúa hasta obtener la velocidad promedio (\bar{V}_w) de nueve muestras de la velocidad real instantánea (V_w) de tela desde el tacogenerador. A continuación se evalúa la ecuación (3.62) para obtener la presión teórica (P_{JT}) en el headbox como una función de la velocidad promedio mediante la figura 3.2.

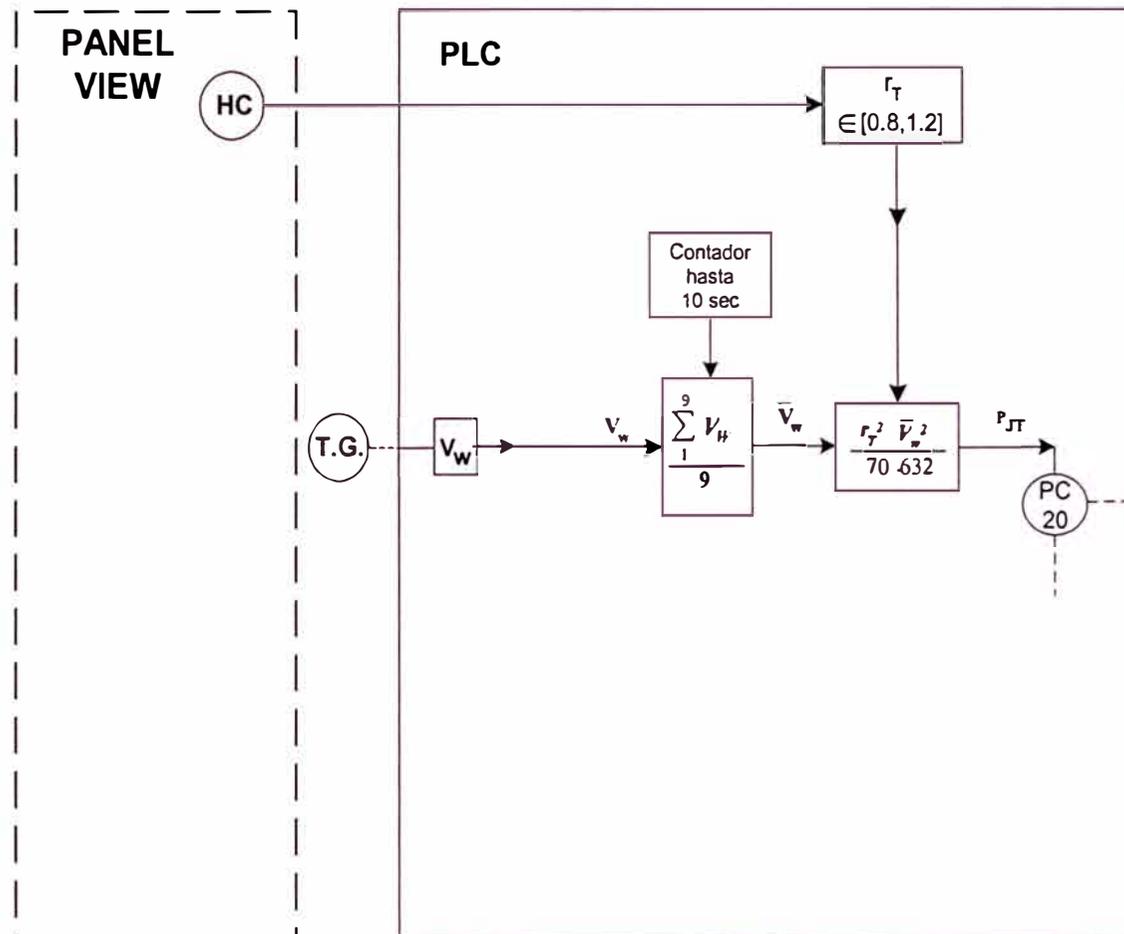


Figura 3.2. Circuito que expresa la presión teórica (P_{JT}) en el control de presión total del Headbox

Señal de proceso(P_{JP}) en el lazo de realimentación de presión total real, que establece la relación “ r_p ” de velocidad jet a tela en el headbox.

De la ecuación (3.54) que establece la relación entre la presión real (P_{JP}) y la velocidad real de Jet (V_{JP}) en el headbox dado por:

$$V_{JP} = \sqrt{70.632 P_{JP}} \quad (3.63)$$

Donde :

V_{JP} = es la velocidad real de Jet en el headbox en m/min.

P_{JP} = es la presión real en el headbox en mm H₂O.

Y la ecuación que define la relación real (r_p) de la velocidad real de Jet (V_{JP}) a velocidad real de tela (\bar{V}_w) dado por:

$$r_p = \frac{V_{JP}}{\bar{V}_w} \quad (3.64)$$

De la ecuación (3.63) se obtiene:

$$P_{JP} = \frac{V_{JP}^2}{70.632} \quad (3.65)$$

Según esta ecuación, el valor real de la presión total (P_{JP}) es proporcional al cuadrado de la velocidad real de Jet de salida de headbox y llevando la ecuación (3.64) a la ecuación (3.65) se obtiene:

$$P_{JP} = r_p^2 \frac{\bar{V}_w^2}{70.632} \quad (3.66)$$

Como en toda ejecución de máquina la velocidad promedio real de la tela (V_w) llega a ser constante, se verá que el valor real de la presión sensada (P_{JP}) por el transmisor electrónico de presión en el headbox es proporcional al cuadrado del valor real instantáneo del parámetro “ r_p ”.

Desviación Δr_{PT} del parámetro real r_p de su valor teórico r_T

De la ecuación (3.13), tenemos $\Delta r_{PT} = r_p - r_T$

Es la desviación del parámetro r_p del valor teórico y de la figura 3.1 curva de menor consistencia 0.41%, el parámetro real de proceso r_p está comprendido entre los valores extremos.

$(r_T - \Delta r_{PT})$ y $(r_T + \Delta r_{PT})$ variando alrededor del parámetro r_T .

Así

$$(r_T - \Delta r_{PT}) \leq r_p \leq (r_T + \Delta r_{PT})$$

Expresando este resultado en la forma:

$$r_p = r_T \pm \Delta r_{PT} \quad (3.67)$$

$$\forall \Delta r_{PT} \in [0, \Delta r_{\max}]$$

y de la ecuación (3.22) se obtiene:

$$\frac{\Delta r_{PT}}{r_T} 100 = \left(\frac{r_p - r_T}{r_T} \right) 100 \quad (3.68)$$

Es la desviación porcentual del parámetro r_p respecto de su valor teórico r_T

Con los valores de las ecuaciones (3.3) y (3.2) encontrados de la figura 3.1 – curva de menor consistencia 0.41%.

entonces: $\Delta r_{PT} \in [0, 0.0025]$

$$Y \quad \frac{\Delta r_{PT}}{r_T} 100 \in [0, 0.25189]$$

Llevando a la ecuación (3.68) se obtiene:

$$\left(\frac{r_p - r_T}{r_T} \right) 100 = \left(\frac{\Delta r_{PT}}{r_T} \right) 100 \in [0, 0.25189] \quad (3.69)$$

La ecuación (3.69) indica que tan próximo está el parámetro real r_p del valor teórico r_T puesto por el operador.

También establece los límites de la variación porcentual y la desviación instantánea del parámetro r_p alrededor de r_T , respecto del valor teórico, dado en el control de presión en base a la figura 3.1 – curva de menor consistencia 0.41%.

Con lo cual se garantizará la orientación de las fibras en dirección máquina y en dirección transversa mejorando así las propiedades físicas del papel.

Graficando las ecuaciones (3.63) (3.64) en la fig. 3.3 desde la presión total real (P_{JP}), en el lazo de realimentación del control de presión total.

La ecuación (3.63) se grafica hasta obtener la velocidad real del Jet (V_{JP}) a continuación se representa la ecuación (3.64) para obtener la relación real "R_p" de las velocidades Jet real (V_{JP}) a tela (\bar{V}_w) y luego se representa la ecuación (3.68) para obtener el porcentaje de la desviación de r_p de su valor teórico r_T que se visualiza en el panel view.

De las figuras 3.2 y 3.3 obtenemos la figura 3.4 que indica el control electrónico usando PLC de la presión total en el headbox, estableciendo la relación "R_p" de velocidades Jet a tela.

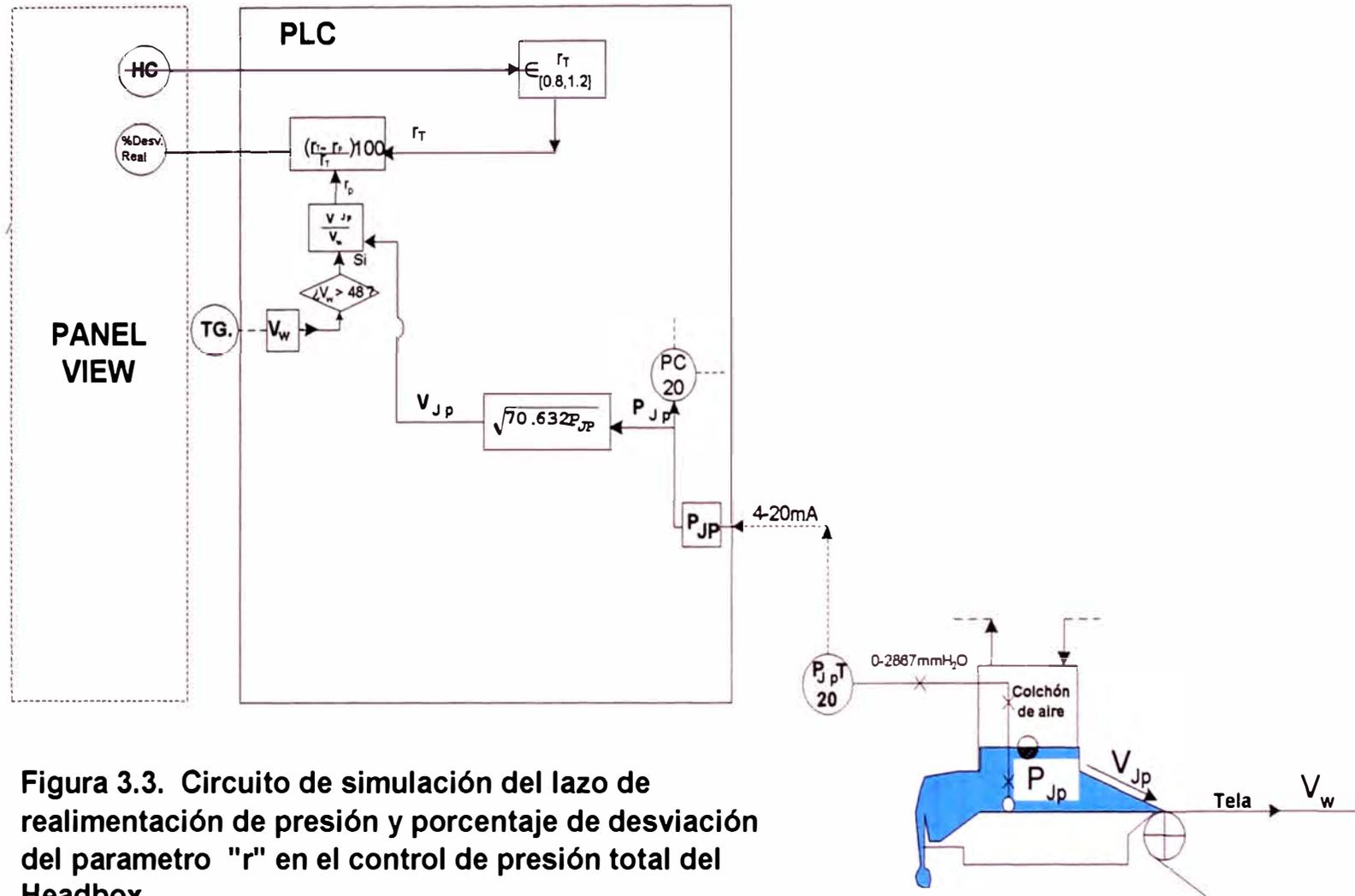


Figura 3.3. Circuito de simulación del lazo de realimentación de presión y porcentaje de desviación del parámetro "r" en el control de presión total del Headbox

En la figura 3.4 se observa el control de la presión total real instantánea para controlar un valor del rango $P_{jp} \in [0, 2867 \text{ mmH}_2\text{O}]$ correspondiente al rango de velocidades del Jet stock $V_{jp} \in [0, 450 \text{ m/min}]$, manteniendo el control de nivel constante 385mm H₂O (ó 380mm H₂O) a cualquier velocidad.

3.4.2 Modelamiento matemático para el sistema de control de nivel

La señal de proceso (L_p) en el lazo de realimentación de nivel en el headbox, se muestra en la figura 3.5.

El transmisor de presión diferencial entrega el valor de la corriente, proporcional a la diferencia de presiones entre sus dos cámaras que están unidas al headbox (en el colchón de aire y a la altura del labio inferior).

Presión en el centro de la membrana sensora (P_{sp}), como la suma de la presión del líquido ($\rho g L_p$) más la presión del colchón de aire (P_a)

$$P_{sp} = \rho g L_p + P_a \quad (3.70)$$

Presión en el colchón de aire (P_a)

$$P_d = P_{sp} - P_a \quad (3.71)$$

De donde $P_d = (\rho g L_p + P_a) - P_a$

Así $P_d = \rho g L_p \quad (3.72)$

Proporciona el valor de la presión diferencial entre las dos cámaras del transmisor siendo igual a la presión que ejercería la columna del mismo líquido de altura L_p sobre el centro de la membrana sensora.

Siendo:

ρ = densidad constante de la pulpa en suspensión, en cada ejecución de máquina.

g = aceleración de la gravedad

$L_p =$ altura del líquido desde el centro de la membrana sensora a la superficie del líquido.

Así la salida de corriente del transmisor de presión diferencial, que ingresa al PLC, es proporcional a la presión de una columna del mismo líquido de altura L_p dentro del headbox.

El nivel del líquido a controlar (h_L) es medido desde la superficie del labio inferior del headbox

$$h_L = L_p + 48 \text{ mm H}_2\text{O} \quad (3.73)$$

El transmisor de presión diferencial está calibrado según la presión diferencial $[0, 500] \text{ mm H}_2\text{O} \langle \rangle [4, 20] \text{ mA}$ de salida

El nivel (L_p) sentido y controlado tendrá el mismo rango del transmisor así:

$$L_p \in [0, 500] \text{ mm H}_2\text{O}$$

De esta relación y de la ecuación anterior tenemos los límites del nivel (h_L), así

$$L_p \in [0, 500] \text{ mm H}_2\text{O} \langle \rangle h_L \in [48, 548] \text{ mm H}_2\text{O}$$

Indica el rango de la altura del líquido L_p que se sensa y controla con el correspondiente rango del nivel que es necesario conocer y controlar (h_L), en función de L_p , medido desde la superficie del labio inferior del headbox.

Nivel teórico (L_T) del control del nivel del headbox

El valor teórico de nivel (L_T) toma un valor que se encuentra dentro del rango.

$$L_T \in [48, 548] \text{ mm H}_2\text{O} \quad (3.74)$$

Que el operador ingresa desde el panel de control (panel view) como set point de nivel en el bloque de control PID de nivel del PLC.

El rango de $L_T \in [48, 548]$ mm H_2O del valor teórico corresponde al rango real de nivel $h_L \in [48, 548]$ mm H_2O que se necesita controlar.

Como para este tipo de headbox necesitamos controlar a nivel constante en 385 mm H_2O (ó 380 mm H_2O) el valor teórico de nivel será $L_T = 385$ mm H_2O del rango $L_T \in [48, 548]$ mm H_2O (ó 380 mm H_2O) a cualquier velocidad de operación de máquina.

3.4.3 Implementación del sistema de control automático de presión total del headbox que establece la relación del parámetro “ r_p ” de velocidades de jet a tela, usando un PLC.

De acuerdo al diseño, el headbox de tipo cerrado trabaja sobre el principio de:

- Presión total controlada (P_{JP}) por aire, para cada velocidad de tela (V_w)
- Nivel constante de la pulpa en suspensión en el headbox a 385 mm H_2O (ó 380 mm H_2O) a cualquier velocidad del rango de operación $[0 - 450] m / min$

El control de presión total se muestra en la fig. 3.4. Este control también establece la relación “ r_p ” de velocidades jet o tela según la ecuación (3.64).

$$r_p = \frac{V_{JP}}{V_w}$$

Siendo la velocidad jet (V_{JP}) medida en la vena contraído del ahorro a la salida del headbox.

Y la velocidad real de tela (V_w) medida en el eje de rotación del motor de corriente continua del rollo de accionamiento que abraza fuertemente a la tela.

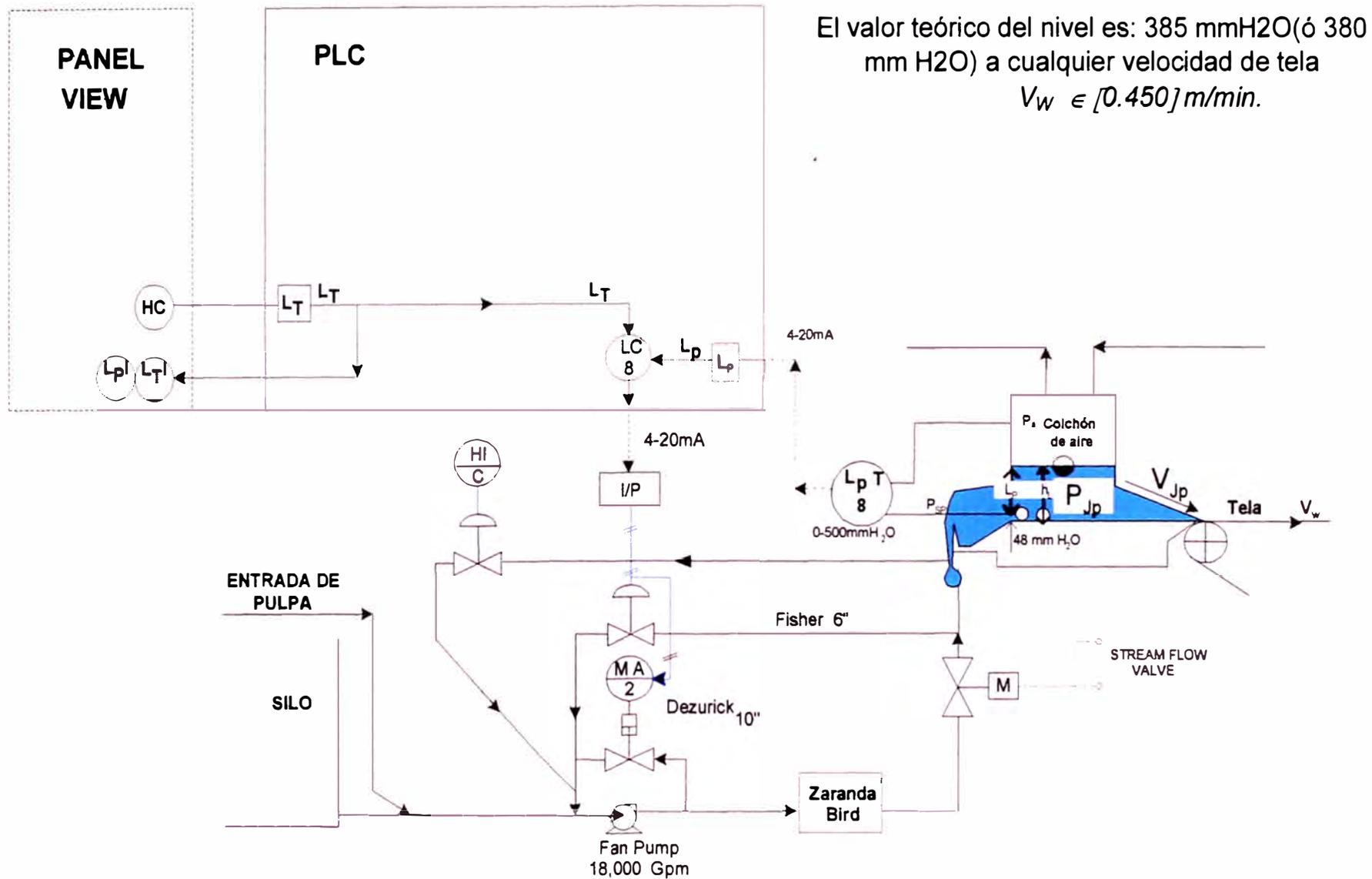


Figura 3.5 Circuito de control automático de nivel de la pulpa en suspensión en el Headbox.

Para implementar este control de presión total se ha usado

- PLC Allen-Bradley SLC 5/03
- Panel View (panel de control)
- Un transmisor electrónico para sensar la presión instantánea total de operación.
- Un tacogenerador para sensar la velocidad real de tela
- Un convertidor corriente – presión (I/P).
- Dos válvulas de control neumáticas de tres vías cada uno, como elementos de control final, para regular la presión o vacío en el colchón de aire del headbox.

Señal de proceso

El transmisor de presión detecta el valor de la presión total instantánea en la parte inferior del headbox a la altura del labio inferior, dando una señal de corriente proporcional a esta presión total.

El transmisor de presión se calibra según el span de la presión de entrada

$$[0 - 2867] \text{ mm H}_2\text{O} \langle \rangle [4 - 20] \text{ ma. corriente de salida}$$

Esta señal de corriente ingresa al PLC por el canal 1 del módulo 1746 – NI4 en slot N°1, para ser escalada y llevada al control PID como variable de proceso.

Set Point de presión total

El valor teórico de la presión total (P_{JT}) lo obtiene el PLC por cálculo en base a dos variables: V_w , r_T . Donde el promedio de la velocidad de tela (V_w) es obtenido a partir del tacogenerador y el parámetro Teórico (r_T) es ingresado por el operador en el panel view. En el programa del PLC las variables V_w y r_T son elevadas al cuadrado y se multiplican y el resultado luego se divide entre 70.632 para obtener el

valor teórico de presión total según la ecuación (3.62).
$$P_{J_T} = \frac{r_T^2 \bar{V}_w^2}{70.632}$$

Este valor calculado en el PLC es movido al PID de presión total como set point.

Controlador

Estando la máquina en régimen estable y si el set point de presión total

$P_{J_T} = \frac{r_T^2 \bar{V}_w^2}{70.632}$ toma nuevos valores al variar la velocidad de máquina y/o

cuando el operador ingrese desde el panel de control (panel view) un nuevo valor del parámetro r_T para conseguir mejores propiedades físicas del papel, el controlador PID de presión total inicia la corrección; comparando la señal de proceso (P_{JP}) con el nuevo valor teórico de presión total (P_{JT}), el error es corregido variando su señal de salida para llevar la presión de proceso al nuevo valor teórico hasta que el error sea cero.

En condiciones estables en el control de presión total se tendrá que el valor teórico de presión (P_{JT}) es igual al valor real de presión (P_{JP}) en el headbox. Es decir

$$P_{JT} = P_{JP} \quad (3.75)$$

A partir de la cual se puede deducir que el control de presión total está actuando como control de velocidad real del Jet (V_{JP}) y como control del parámetro real (r_P) como sigue:

* Control de presión total (P_{JP}) como control de velocidad real del Jet (V_{JP})

de las ecuaciones (3.57) y (3.61):

$$V_{JT} = r \bar{V}_w \quad (3.76)$$

de las ecuaciones (3.59) y (3.76):

$$P_{JT} = \frac{V_{JT}^2}{70.632} \quad (3.77)$$

de la ecuación (3.65) $P_{JP} = \frac{V_{JP}^2}{70.632}$

llevando las ecuaciones (3.77) y (3.65) a la ecuación (3.75), se obtiene:

$$\frac{V_{JT}^2}{70.632} = \frac{V_{JP}^2}{70.632}$$

simplificando

$$V_{JT} = V_{JP} \quad (3.78)$$

En condiciones estables el control de presión total proporciona un control de la velocidad del chorro de pasta sobre la tela; es decir el control de presión total tiende a mantener el valor teórico de la velocidad del Jet (V_{JT}) igual a la velocidad del Jet a la salida del headbox (V_{JP}).

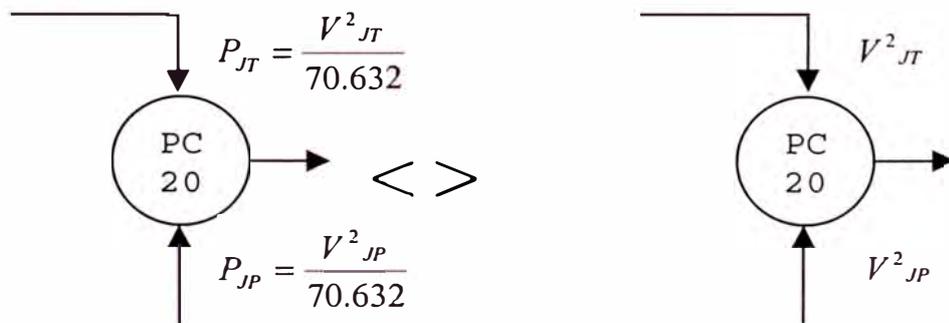


Figura 3.6 Control de Presión total (P_{JP}) como control de velocidad real del Jet (V_{JP})

- **Control de presión total (P_{JP}) como control del parámetro (r_p)**

De la ecuación (3.62) $P_{JT} = \frac{r_T^2 \bar{V}_w^2}{70.632}$

De la ecuación (3.66) $P_{JP} = \frac{r_P^2 \bar{V}_w^2}{70.632}$

Reemplazando las ecuaciones anteriores en la ecuación (3.75), se obtiene:

$$\frac{r_T^2 \bar{V}_w^2}{70.632} = \frac{r_P^2 \bar{V}_w^2}{70.632}$$

donde $\Gamma_T = \Gamma_P$ (3.79)

En condiciones estables el control de presión total es un control del parámetro real (Γ_P), es decir el valor teórico del parámetro (Γ_T) designado por el operador en el panel de control (panel view), es igual al valor del parámetro real (Γ_P) de la relación de velocidades real Jet a tela, y la velocidad de Jet (V_{JP}) instantáneamente sigue a la velocidad de la tela (V_w) según la relación

$$r_P \dots \dots r_T = r_P = \frac{V_{JP}}{V_w}$$

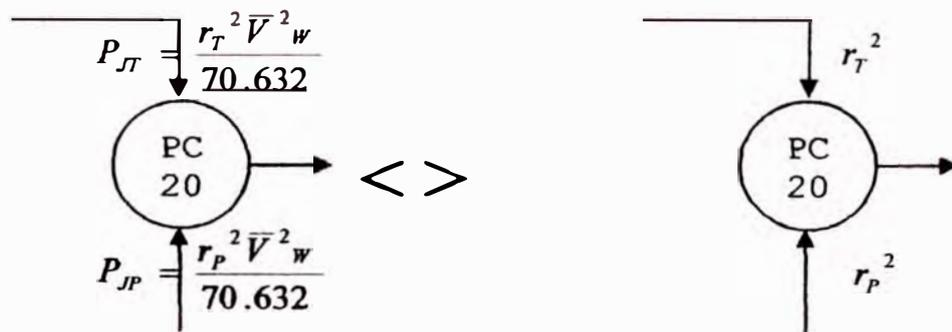


Figura 3.7 Control de presión total (P_{JP}) como control del parámetro (r_P)

La salida del controlador PID en el control de presión total, después de ser escalada va al canal 1 del módulo 1746-NO4I en el Slot N°2 de allí a un conversor (I/P) que convierte la señal de corriente a presión de la siguiente manera:

entrada corriente [4-20] mA <> [3 – 15] psi salida de presión aire, para actuar dos válvulas de control neumático. Una para presurizar ingresando aire y otra para despresurizar descargando aire o creando vacío en el colchón de aire del headbox.

La salida del controlador realiza la corrección actuando sobre dos válvulas neumáticas que regulan la entrada y descarga de aire para controlar la presión total sobre la superficie del labio inferior del headbox.

La variable velocidad que proporciona el tacogenerador:

El tacogenerador envía una señal de tensión continua proporcional a la velocidad, en la relación:

Entrada de velocidad $[0 - 450] \text{ m/min} <> [0 - 150] \text{ Vdc}$ voltaje de salida.

Luego el voltaje de salida se reduce al rango $[0 - 10] \text{ Vdc}$ para ingresar al PLC, por el canal 2 del módulo 1746-NI4 en el Slot N° 1 con el fin de ser escalado mediante el programa y así obtener el valor V_w como la velocidad de tela en tiempo real.

La variable del parámetro r_T o relación teórica de velocidades jet a tela, debe ser ingresado por el operador desde el panel de control seleccionando un valor del rango $[0.8, 1.2]$, así $r_T \in [0.8, 1.2]$

Promedio de la velocidad de tela (\bar{V}_w)

En condiciones estables de operación se requiere que el set point de presión total (P_{JT}) calculado por el PLC no varíe ni por la velocidad de tela V_w ni por el parámetro r_T , así para minimizar las variaciones del set point de presión total (P_{JT}) se ha tomado como velocidad de tela el promedio \bar{V}_w de nueve muestras del valor instantáneo de velocidad de tela (V_w).

Se estima que las variaciones producidas en la señal de velocidad instantánea de la tela (V_w) generado por el tacogenerador se deben a:

- Efectos de acoplamiento del tacogenerador al eje de rotación del motor del rollo de accionamiento principal que mueve la tela.
- Efectos de resbalamiento entre superficies del rollo de accionamiento y la tela. El rollo de accionamiento es el rollo principal que mueve la tela por rozamiento entre sus superficies en una amplia zona de contacto donde la tela lo abraza fuertemente.

Limites de variación del porcentaje de desviación instantánea del parámetro real r_p alrededor de r_T

En el control de presión total en base a la figura 3.1 - curva de menor consistencia 0.41%, la máxima desviación instantánea de r_p alrededor de r_T se expresa como un porcentaje del valor teórico r_T

$$\text{Así: } \left(\frac{r_p - r_T}{r_T} \right) 100 = \left(\frac{\Delta r_{PT}}{r_T} \right) 100 \in \left[0, \frac{0.0025}{0.9925} \right] 100$$

Siendo el mínimo valor igual a cero cuando $r_T = r_p$

Tomado el valor máximo permitido del rango podremos tener el parámetro real de proceso r_p dado según la fórmula de ecuación (3.67)

$$r_p = r_T \pm \left(\frac{0.0025}{0.9925} \right) r_T \quad (3.80)$$

Expresa los límites de variación máxima aceptable o confiable del porcentaje de desviación instantánea del parámetro real r_p alrededor del valor teórico r_T , lo cual indica que se está trabajando con un r_p en la zona estrecha Δr de la figura 3.1 (tomado de la figura # 6 del manual de Beloit Corporation) sobre la curva de

consistencia 0.41%, en la cual la relación de tensiones de dirección máquina (MD) a dirección transversa (CD) :

$$\text{Tensile Ratio } \frac{MD}{CD} \leq 1.15$$

Se obtiene por orientación de la fibras en dirección maquina y en dirección transversa, sobre la Tela, con la pulpa de stock considerada.

Para calcular en el PLC el valor real de la relación instantánea (r_p) de velocidades jet

a tela se usa la ecuación:

$$r_p = \frac{V_{JP}}{V_w}$$

donde:

$$V_{JP} = \sqrt{70.632 P_{JP}}$$

P_{JP} , es la presión total real instantánea detectada por el transmisor de presión total, en la parte inferior del headbox.

La velocidad instantánea de tela V_w es comparado con 48 m/min:

- Si V_w es mayor que 48 m/min el programa del PLC procede a calcular el valor real instantáneo de r_p
- Si V_w no es mayor que 48 m/min el programa del PLC no calcula r_p para evitar alguna indeterminación, cuando la tela está detenida ($V_w = 0$), que pueda producir algún error en el CPU.

Si el valor de velocidad de tela es menor que 48 m/min el control PID asigna un valor teórico de presión total mínimo igual a 48 para evitar que actúen las válvulas de entrada y salida de aire al headbox por acción del PID, cuando se detenga la tela, estando el PLC energizado, evitando de esta forma que se deteriore las partes mecánicas de las válvulas.

Indicadores:

En el panel de control se visualiza muchas variables importantes como:

- Presión total real instantáneo (P_{JP})
- Valor teórico (set point) de la presión total (P_{JT})
- Velocidad real instantánea de la tela (V_w)
- Valor real instantáneo de la relación de velocidades Jet a tela (r_p)
- Valor teórico de la relación de velocidad teórica jet a tela (r_T) puesto por el operador.
- En el panel de control se visualiza el porcentaje de desviación instantánea de r_p alrededor de r_T .

3.4.4 Implementación del sistema de control automático de nivel de la pulpa en suspensión en el headbox, usando PLC

Mediante el diseño del headbox de tipo cerrado, éste trabaja a nivel constante igual a 385 mm H_2O (ó 380 mm H_2O), medido desde el labio inferior del headbox, a cualquier velocidad del rango de operación de máquina [0 – 450] m/min .

El control de nivel se muestra en la figura 3.5

Para implementar el sistema de control de nivel se han utilizado:

- PLC Allen - Bradley SLC 5/03
- Panel de control (panel view)
- Un transmisor de presión diferencial electrónico para sensar el nivel de pulpa en suspensión en el headbox.
- Un convertidor de corriente – presión (I/P)

- Dos válvulas de control neumático como elementos de control final para regular la entrada de pulpa en suspensión al headbox

Señal de proceso

El transmisor de presión diferencial detecta la altura de la pulpa en suspensión en el headbox por diferencia entre dos medidas:

- La presión total del proceso a la altura del labio inferior del headbox y
- La presión del colchón de aire.

El transmisor de nivel se calibra para un span de la presión diferencial de entrada según:

$$[0 - 500] \text{ mm H}_2\text{O} \quad \langle \quad \rangle \quad [4 - 20] \text{ ma. como una señal de salida de corriente}$$

La salida del transmisor es una señal de corriente proporcional a la altura. Esta señal de corriente ingresa al PLC por el canal 0 del módulo 1746 – NI4 en el slot N°1 para ser escalada y llevado al control PID como variable de proceso.

Set point de nivel

El valor teórico de nivel L_T lo ingresa el operador desde el panel de control tomando un valor que esté dentro del rango de control de nivel $L_T \in [48, 548] \text{ mm H}_2\text{O}$ que luego es transmitido al PID de nivel como set point.

Controlador

En el controlador PID de nivel, la señal de proceso es comparada con el valor teórico, si existe diferencia entonces la salida del controlador de nivel cambia para hacer que el error tienda a cero.

La salida de este controlador PID después de ser escalada va al canal “0” del módulo 1746 – NO4I en el slot nº 2 y de allí a un conversor (I/P) el cual convierte la corriente en una variable de salida de presión como sigue:

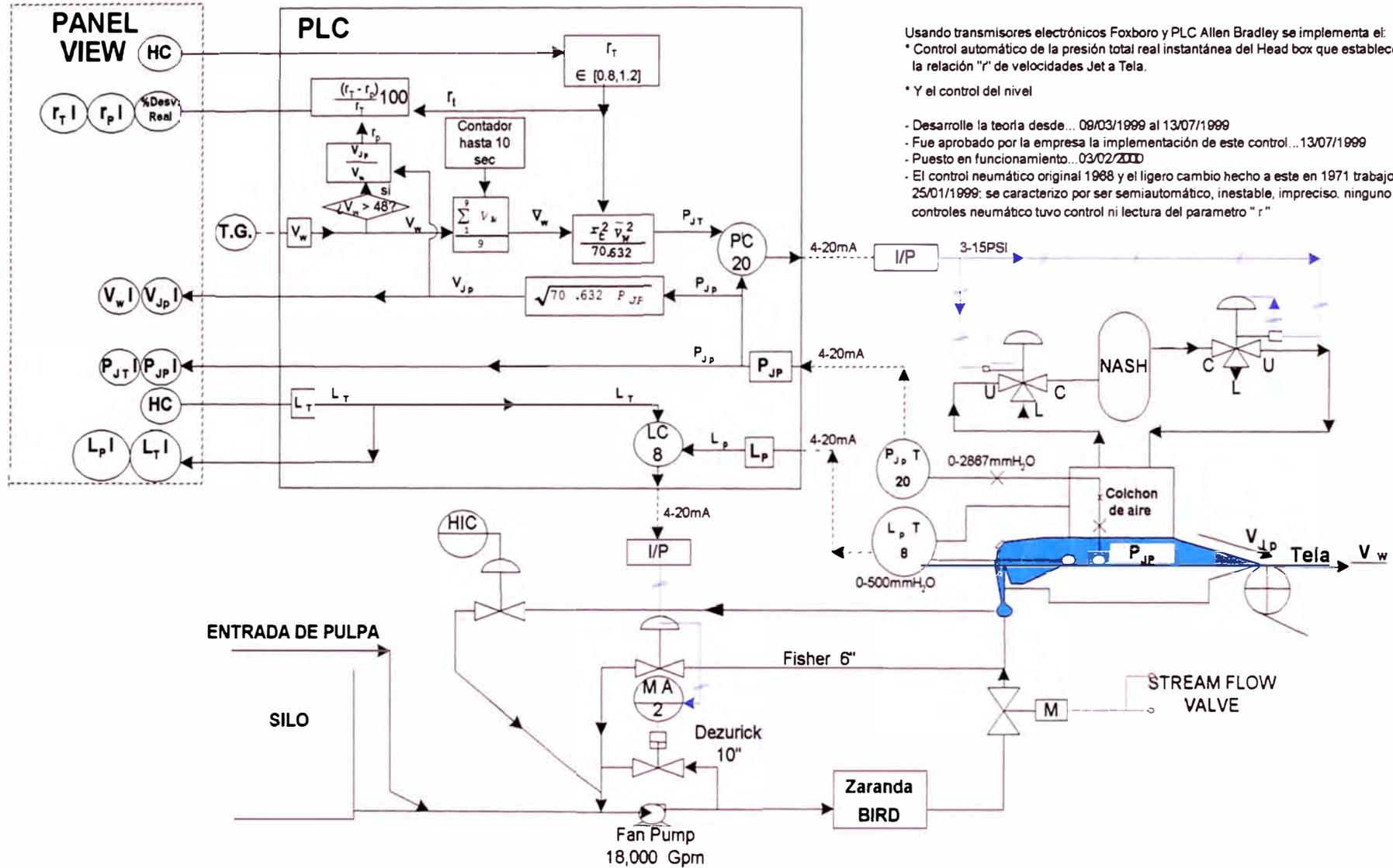
Entrada de $[4 - 20]$ ma $\langle \rangle$ $[3 - 15]$ psi de salida

para activar las dos válvulas de control neumático a fin de aumentar o disminuir el flujo de pulpa al headbox en el control de nivel.

Indicadores

En el panel de control se muestra el valor instantáneo del nivel de pulpa en suspensión (L_p) y el valor teórico de nivel (L_T)

Mediante las figuras (3.4) y (3.5) obtenemos la figura (3.8) que es la “Modernización del Sistema de Control del headbox en una máquina de papel Fourdrinier”



Usando transmisores electrónicos Foxboro y PLC Allen Bradley se implementa el:
 * Control automático de la presión total real instantánea del Head box que establece la relación "r" de velocidades Jet a Tela.

* Y el control del nivel

- Desarrolle la teoría desde... 09/03/1999 al 13/07/1999
- Fue aprobado por la empresa la implementación de este control... 13/07/1999
- Puesto en funcionamiento... 03/02/2000
- El control neumático original 1968 y el ligero cambio hecho a este en 1971 trabajo hasta 25/01/1999: se caracterizo por ser semiautomático, inestable, impreciso. ninguno de los controles neumático tuvo control ni lectura del parametro "r"

Figura 3.8. MODERNIZACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DEL HEADBOX EN UNA MAQUINA DE PAPEL FOURDRINIER

3.4.5 Sistema de Control SLC 500

La figura 3.9 muestra el esquema simplificado del sistema de control SLC 500, para la modernización del sistema de control de headbox en una máquina papelerera Fourdrinier, el cual consiste de :

- Un controlador modular Allen-Bradley SLC 5/03
- Un panel view 550 – (2711 – K5A2)
- Un panel view 600 – (2711 – K6C2)
- Conectados a través de 3 acopladores de enlace (1747 – AIC) a una red de enlaces DH-485.
- Adicional a esto se cuenta con :

1 Robotic Faxmodem para tener acceso al PLC desde Lima.

Y una estación de programación consistente en una computadora personal unida al sistema o través del convertidor de interface(1747 – PIC).

RED DE ENLACE DH-485

Cadena en cascada solamente. Longitud del enlace 1219 m (4000 pies) como máximo
32 nodos como máximo (0-31)

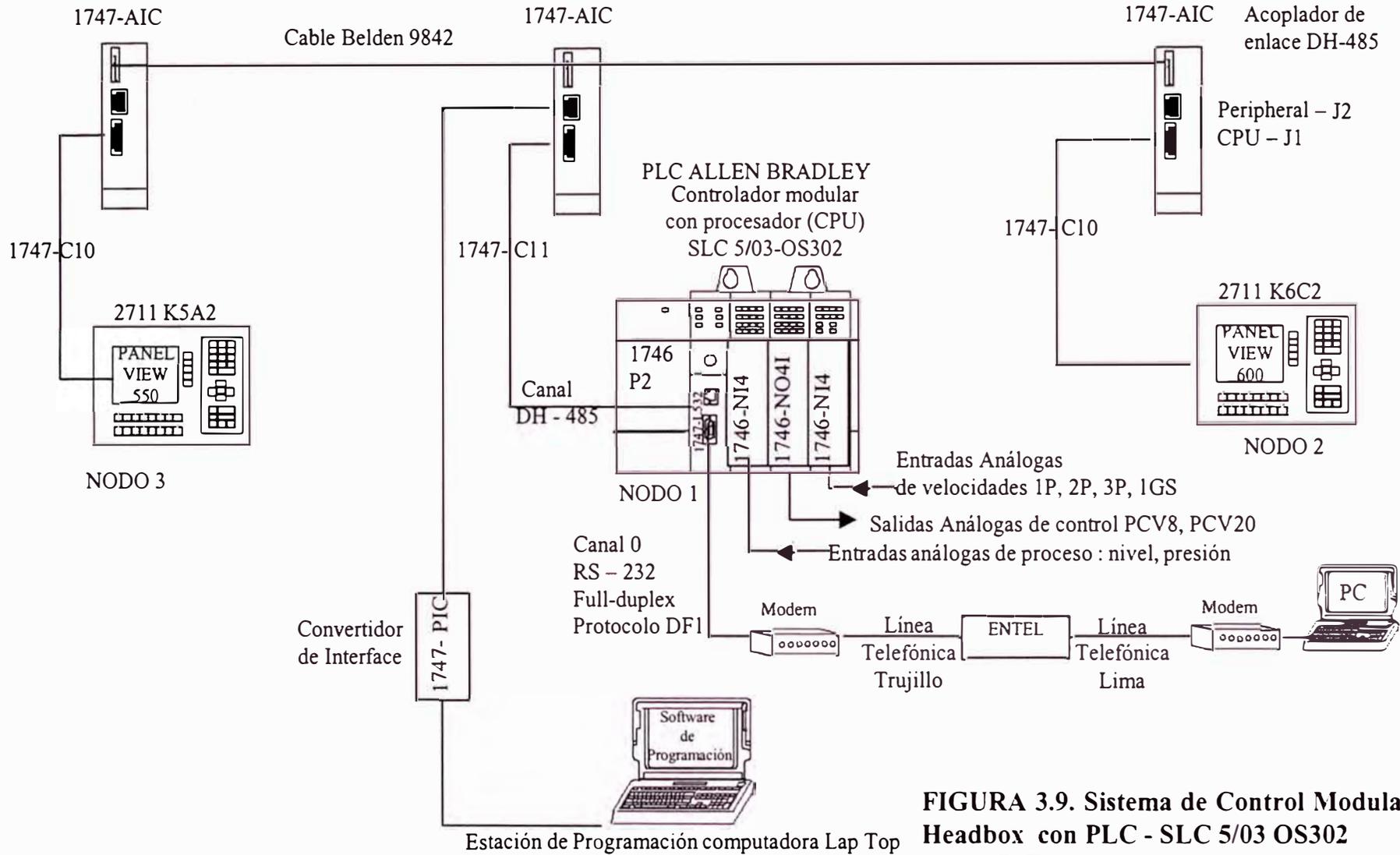


FIGURA 3.9. Sistema de Control Modular del Headbox con PLC - SLC 5/03 OS302 Red DH - 485 (Allen Brodley)

La figura 3.10. muestra el controlador modular programable SLC 500 de E/S análogas - Allen Bradley SLC5/03, con la siguiente distribución .

Nº Slot	Allen Bradley Catálogo Nº	DESCRIPCIÓN
-	1746 – P2	Fuente de alimentación 120/240 V _{AC}
-	1746 – A4	Chasis de 4 slots (ranuras)
0	1747 – L532	Procesador SLC 5/03 OS302, memoria 16 K
1	1746 – NI4	Módulo análogo de alta resolución de 4 canales de entrada análoga de corriente (4-20mA) o tensión (0-10 V _{DC}) : Canal 0 – Entrada (4-20mA) desde sensor nivel Canal 1 – Entrada (4-20mA) desde sensor presión Canal 2 – Entrada (0-10 V _{DC}) desde sensor velocidad Canal 3 – Entrada (4-20mA) desde sensor frecuencia de red.
2	1746-NO4I	Módulo análogo de alta resolución de 4 canales de salida análoga de corriente (4-20mA). Para accionar válvulas de control final. Canal 0 – Válvula PCV 8 – Nivel H. Box Canal 1 – Válvula PCV 20 – Presión H. Box Canal 2 – Libre Canal 3 – Libre
3	1746 – NI4	4 entradas analógicas (0-10 V _{DC}) para lectura de velocidades Canal 0 – Velocidad primera prensa (0-10V _{DC}) Canal 1 – Velocidad segunda prensa (0-10V _{DC}) Canal 2 – Velocidad tercera prensa (0-10V _{DC}) Canal 3 – Velocidad primer grupo secador (0-10V _{DC})

En el PLC además de los módulos en las ranuras 1 y 2 para el sistema de Control del headbox, se ha agregado otro módulo análogo 1746-NI4 en la ranura 3 para tener lecturas de velocidades en las prensas 1P, 2P, 3P y primer grupo secador, así como de la frecuencia de red eléctrica.

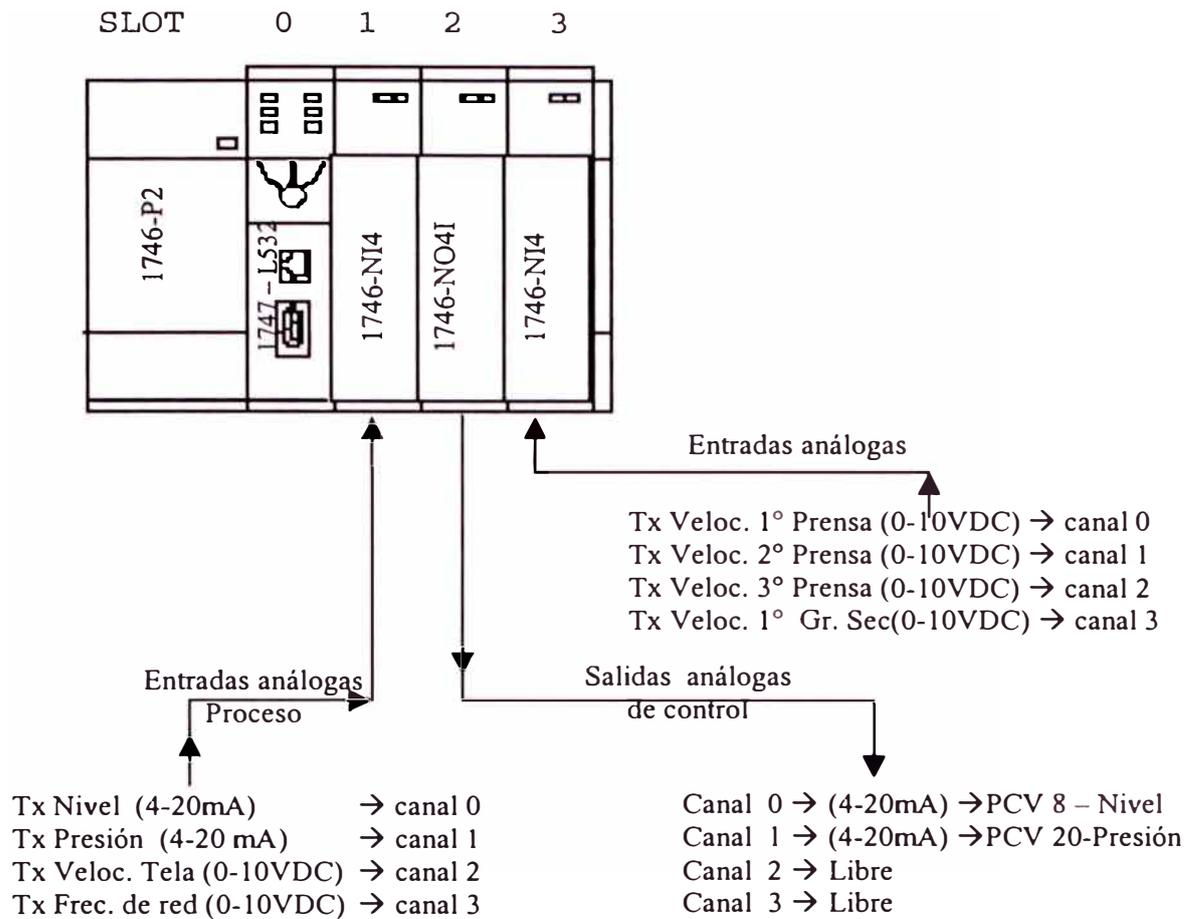


Figura 3.10. Controlador Modular Programable SLC 500 de E/S análoga Allen Brodley SLC 5/03. Mostrando la distribución de módulos en el chasis para el sistema de control SLC 500 del Headbox.

Módulos Análogos de Entrada y Salida

Este sistema de control por PLC tiene dos módulos de entrada 1746 NI4 y un módulo de salida 1746-NO4I, donde los números de catálogo son codificados como sigue :

N = alta resolución de módulos análogos de 4 canales

I(Prefijo) = entrada

O(Prefijo) = salida

n = número total de canales de entrada y/o salida

I(último) = salida de corriente

V(último) = salida de voltaje

Así el 1746-NI4 es un módulo análogo de alta resolución, de entrada análoga (corriente 4-20mA o tensión 0-10V_{DC}), de cuatro canales de entrada.

Y el 1746-NO4I es un módulo análogo de alta resolución, de salida análoga, cuatro canales con salida de corriente (4-20mA).

Módulos de 4 Canales - Cableado

Cableado en el (1746 – NI4) Módulo de entradas analógicas diferenciales

El primer módulo E/S en el rack (Slot 1), desde la izquierda, es el 1746-NI4. Este módulo tiene 4 canales de entrada análoga que son seleccionables por canal para entrada de corriente (DIP Switch = cerrado) o tensión (DIP Switch= abierto). Los 4 grupos de entrada análoga como mostrado en la figura 3.11, son conectados a la bornera del panel frontal del módulo 1746-NI4.

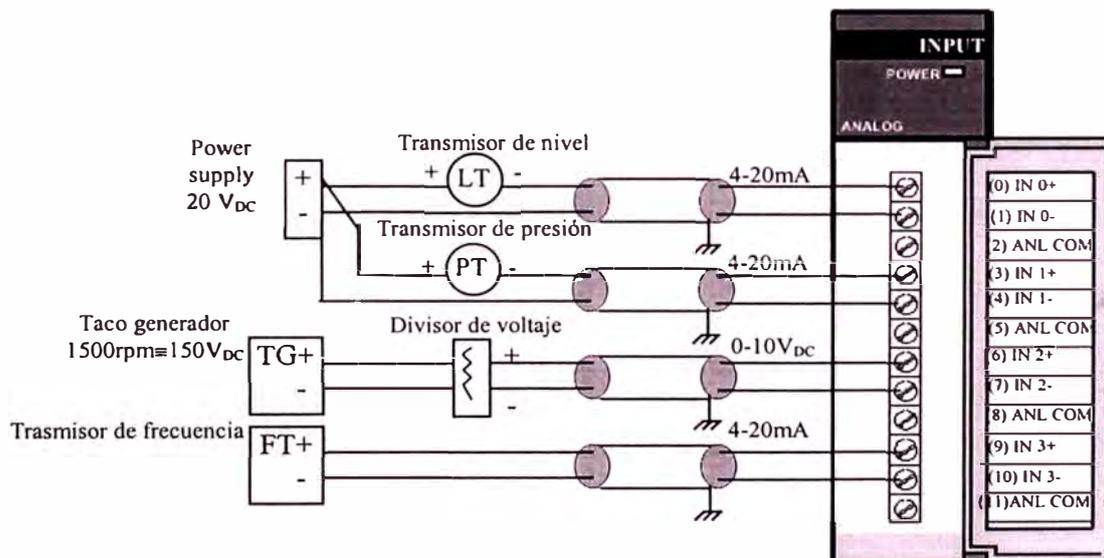
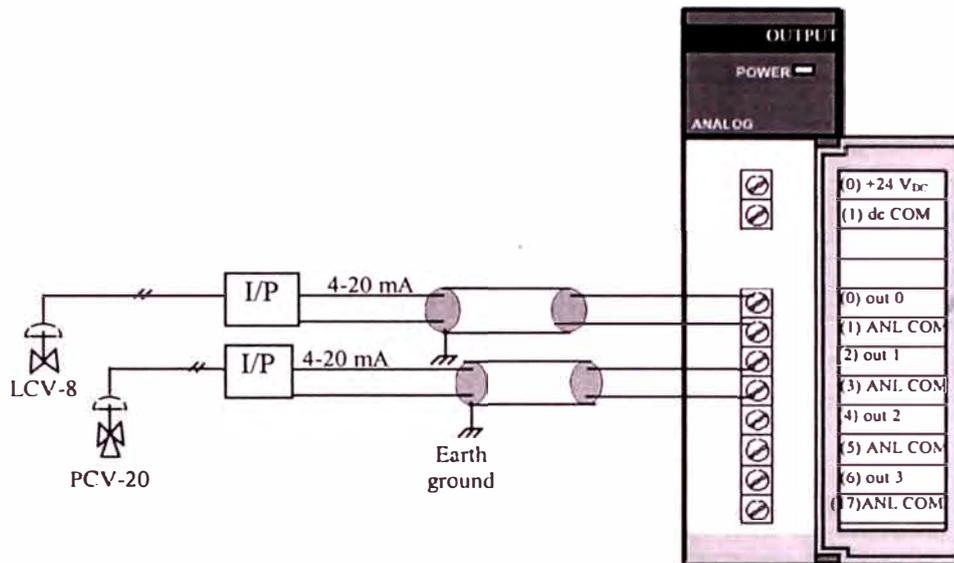


Figura 3.11. Diagrama de conexiones de los terminales de entradas analógicas conectados a la bornera del módulo 1746 NI4 (Vista Frontal)

Cableado en el (1746-NO4I) módulo de salidas analógicas

El segundo módulo E/S en el rack (Slot 2), desde la izquierda, es el 1746-NO4I. Este es un módulo de 4 canales con salidas análogas de corriente. Los 4 grupos de terminales de salidas análogas como mostrado en la figura 3.12, están conectados a la bornera del módulo 1746-NO4I, en el panel frontal



ANL COM están internamente conectados en el módulo. Los canales no están aislados uno del otro.

Figura 3.12. Diagrama de conexiones de las salidas del módulo analógico 1746-NO4I (Vista General)

Características del hardware de los módulos análogos de 4 canales

Los módulos contienen una bornera removible para conexiones de los canales de entrada y/o salida análoga; la cual es especialmente diseñada para interface con corriente análoga y señal entrada de voltaje. Los canales pueden ser conectados como entradas comunes o diferenciales. Hay Dip switches en la tarjeta para seleccionar voltaje o corriente de entrada, en la figura 3.13 se muestra la vista frontal (genérica) de los módulos análogos E/S de 4 canales.

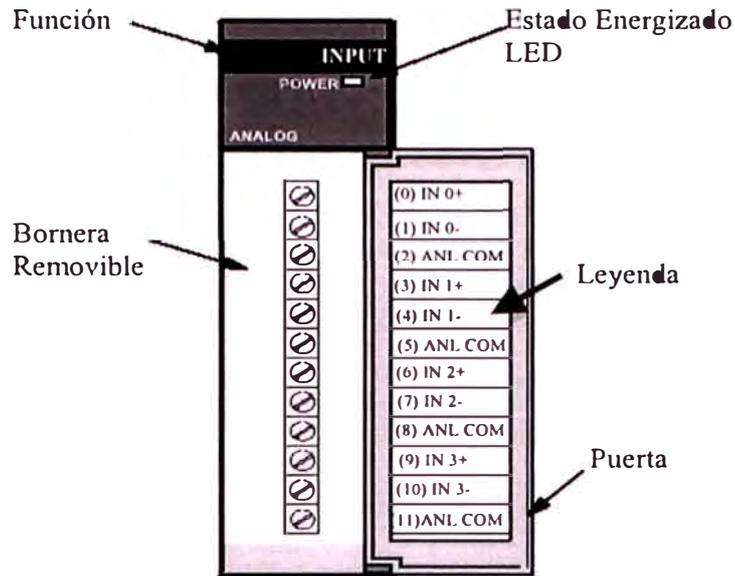


Figura 3.13. Vista Frontal (genérica) de los módulos analógicos E/S de 4 canales

Operación Módulos de 4 canales

Módulos de 4 canales, características de el convertidor de entrada A/D.

- Rango de la señal de entrada
- Representación decimal de la señal analógica (según la tabla imagen de entrada).
- Número de bits significantes para almacenar la representación decimal.
- Resolución de la señal de entrada.

Módulo Analógico 1746-NI4

El módulo convierte las señales de entrada analógica a valores binarios de 16 bits para almacenarlo en la tabla imagen de entrada del procesador SLC 5/03. El rango decimal (tabla imagen de entrada), número de bits significantes y resolución del convertidor depende del rango de entrada que usted use para el canal como se muestran en la siguiente tabla.

NI4 Rango señal entrada	Rango decimal (Tabla imagen de entrada)	Número de bits significantes	Resolución Nominal
0 a 10 V _{dc} – 1LSB	0 a 32767	15	305.176 μV/LSB
4 a 20 mA	3277 a 16384	13.67	1.22070 μA/LSB

Tabla 3.1. Características del módulo análogo de entrada 1746-NI4

- **Módulos de 4 canales, características del convertidor de salida D/A.**

Módulo	Rango de salida	Rango decimal (Tabla de imagen de salida)	Bits significantes	Resolución
NO4I	4 a 20 mA	6242 a 31208	12.6 bits	2.56348 μA/LSB

Tabla 3.2. Características del módulo análogo de salida 1746-NO4I

Módulo de 4 canales - configuración :

Esta sección describe como poner en marcha (instalar) un módulo análogo.

Entrar los códigos de identificación (ID) de módulos.

Cuando configure un módulo para un sistema SLC 500 usando su software de programación, una lista de los módulos E/S es proveído, si esta lista no es proveída, se necesitará entrar al código de identificación (ID) del módulo cuando se configura el slot.

Catálogo N°	Código de identificación del Módulo análogo
1746-NI4	4401
1746-NO4I	5401

Tabla 3.3. Muestra el código de identificación (ID) de los módulos análogos de entrada/salida.

Direccionando módulos análogos E/S de entrada y salida para el controlador modular.

Las figuras 3.14, 3.15 indican el número de entradas y salidas en cada módulo análogo y muestran así mismo como estas entradas y salidas se organizan en los archivos de datos

Los archivos de entrada y salida tienen elementos de una palabra, con cada elemento especificado por el número de ranura y de palabra .

Direccionando el módulo análogo 1746-NI4

Como se muestra en la figura 3.14. cada canal de entrada del módulo 1746-NI4 es direccionado como una simple palabra en la tabla imagen de entrada. El módulo 1746-NI4 usa un total de 4 palabras en la tabla imagen de entrada. Los valores convertidos desde el canal 0 hasta 3 son direccionados como palabras de entrada 0 hasta 3 respectivamente para el slot 1.

Ejemplo : Si deseamos direccionar el canal de entrada 2 del módulo 1746-NI4 en el slot 1, a este lo direccionamos como palabra de entrada 2 en el slot 1 (I:1.2).

Imagen del proceso
de entrada en la
memoria del controlador
ARCHIVO DE DATOS
SLC 5/03

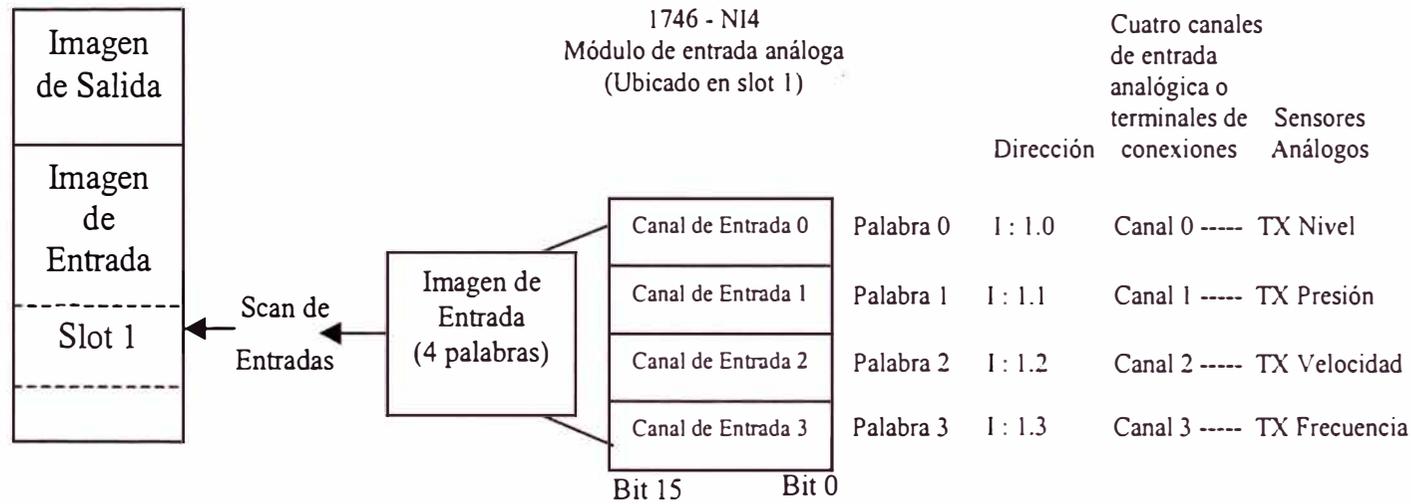


Figura 3.14 - Direccionando el módulo analógico 1746-NI4

Direccionando el Módulo Análogo 1746-NO4I

Como se muestra en la Figura 3.15 cada canal de salida del módulo 1746-NO4I es direccionado como una simple palabra en la tabla imagen de salida. El módulo 1746-NO4I usa un total de 4 palabras de salida. Los valores de salida convertidos desde los canales de salida 0 hasta 3 son direccionados como palabras 0 hasta 3 respectivamente para el slot 2.

Ejemplo : Si deseamos direccionar el canal de salida 1 del módulo 1746-NO4I en el slot 2, a este lo direccionamos como palabra de salida 1 en el slot 2 (O:2.1).

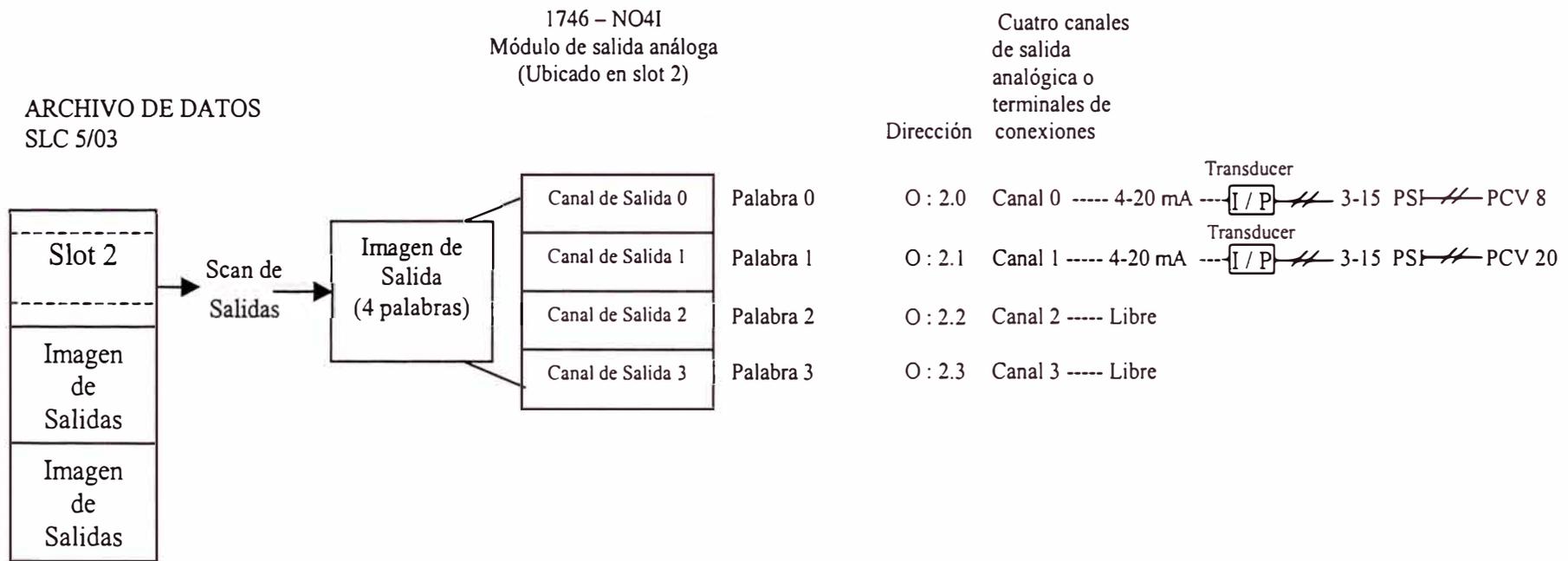


Figura 3.15. Direccionando el módulo analógico 1746-NO4I

CAPÍTULO IV COSTOS

4.1 Introducción

En el presente capítulo se presentan los costos de la implementación del sistema de control del headbox de la máquina Fourdrinier de la fábrica de papel. Se presentan, también otros costos, como los de capacitación de ingenieros y costos de puesta en operación del sistema de control. No se contemplan los costos de los servicios de la dirección técnica y de la mano de obra calificada, que estuvo a cargo de empleados y trabajadores de la planilla.

4.2 Costos de la implementación del sistema de control

La tabla 4.1, presenta los costos de los equipos y materiales que se han empleado en la implementación del sistema de control, el elemento principal de estos equipos lo constituye un PLC y los elementos de entrada y salida del PLC, así como el software de programación y el dispositivo de monitoreo de datos del PLC, denominado panel-view (panel de control). Es importante resaltar que, los costos mostrados en la tabla 4.1, por cada Item, son globales, de acuerdo a los costos del pedido de importación, es decir, no se dispone los costos detallados.

4.3 Costo de capacitación de los ingenieros en la programación y operación del PLC Allen Bradley SLC500:5/03

Con la finalidad de que los ingenieros, tengan conocimientos para la programación, operación y monitoreo de datos del PLC se llevó a cabo un curso de PLC en planta auspiciado por la empresa y estuvo a cargo de una compañía y por un

total de 24 horas, a razón de 08 horas diarias. El costo del curso fue de \$ 826.00 (ochocientos veintiséis dólares americanos).

Tabla 4.1: Costos de los equipos y materiales para implementar el sistema de control del headbox

Item	Descripción	Costo Total en dólares USA
01	PLC + Panel View 550 + Software RS Logix + Software RS Linx Marca: Allen Bradley	7,045.89
02	Cable de comunicación del PLC con el Panel View. Marca: Allen Bradley	61.13
03	Transmisores de presión diferencial + conversores corriente / presión para nivel y presión del Head Box marca: Foxboro	3,433.24
04	Tacogenerador lineal para el motor de accionamiento de tela. Marca Baldor Electric	679.68
05	Cable Belden Proveedor: Kroton S.A.	366.98
06	Tuberías, conectores, cajas, pernos y demás accesorios de ferreteria .	355.61
SUB-TOTAL		11942.53

Nota.- Este cuadro de costos corresponde al pedido de importación de los equipos solicitados. No se dispone de costos unitarios.

4.4 Costo de la puesta en operación del sistema de control

La puesta a punto estuvo a cargo de ingenieros de la empresa e ingenieros de la compañía contratada, consistiendo básicamente en la configuración, programación del PLC, panel de control (panel view) y ajuste de los parámetros para la

sintonización del controlador PLC de presión y nivel del headbox.

El costo que demandó esta tarea fue de \$ 1003.00 (mil tres dólares americanos), que en realidad fueron los costos pagados por este servicio a la compañía contratada.

4.5 Costo total del proyecto

La tabla 4.2, muestra los costos parciales y el costo total del proyecto.

Tabla 4.2: Costos del proyecto del sistema de control del headbox de la máquina Fourdrinier.

Ítem	Descripción	Costo \$
01	Costos de los equipos y materiales para implementar el sistema de control del headbox	11,942.53
02	Costos de capacitación de los ingenieros de fábrica en la programación y operación del PLC Allen Bradley SLC500-5/03	826.00
03	Costos de la puesta en operación del sistema de control	1003.00
Costo Total		13,771.53

CONCLUSIONES

1. El control neumático de presión del headbox que ha venido funcionando durante 31 años (1968 – 21/01/1999) por ser de lazo abierto fue impreciso para hacer pequeños ajustes a la velocidad del chorro de pasta (Jet) requerido para dar mejores propiedades físicas al papel. Por la imprecisión del control de presión de lazo abierto y por la inestabilidad del control de presión diferencial de éste se trabajaron en puntos críticos que ocasionaron variaciones del Jet sobre la tela y que fue causa de las frecuentes roturas en la máquina y variación de humedad a lo largo de la banda de papel que al final ocasionaban pérdidas a la producción por roturas y por control de calidad.
2. Con la aplicación de una nueva tecnología a la automatización del sistema de control del headbox se ha demostrado incrementos en la eficiencia y productividad, obteniéndose los siguientes logros:

Incremento del tiempo efectivo de producción de máquina. Al disminuir sustancialmente la frecuencia de roturas de papel en la máquina se logró reducir el tiempo perdido por roturas.

Incremento de la producción. Al mejorar la formación de la banda de papel se logró obtener una mayor velocidad, sobre los valores de velocidad tradicionales para cada tipo de papel.

- **Incremento de su capacidad en el control de calidad.** El control del parámetro “ r ” o relación de velocidades jet a tela permite variar la orientación de las fibras de celulosa tanto hacia dirección máquina como dirección transversa determinado por la velocidad de jet (V_J) relativo a la tela, asentando el chorro de pasta en velocidad (V_J) sobre la tela de velocidad (V_w) siendo la magnitud de velocidad del jet controlado por el parámetro “ r ” según la relación $r = \frac{V_J}{V_w}$

Y con ello obtener mejores propiedades físicas del papel. Así a consistencias bajas 0.41% que corresponde a la figura 3.1, en que se basa este proyecto y su fibra larga se obtendrá que en la relación de tensiones dirección máquina a dirección contraria esté dado según

Tensión $\frac{MD}{CD} \leq 1.15$ requerido para fabricar papel extensible clupak.

- **Ahorro de vapor.** Al haberse logrado reducir las frecuentes roturas de papel en la máquina, también se consigue reducir las frecuentes pérdidas de vapor a la atmósfera producidas al despresurizar el sistema de vapor en cada rotura, y que el Sistema de Vapor trabaje en forma más estable en el tiempo de producción de la máquina.

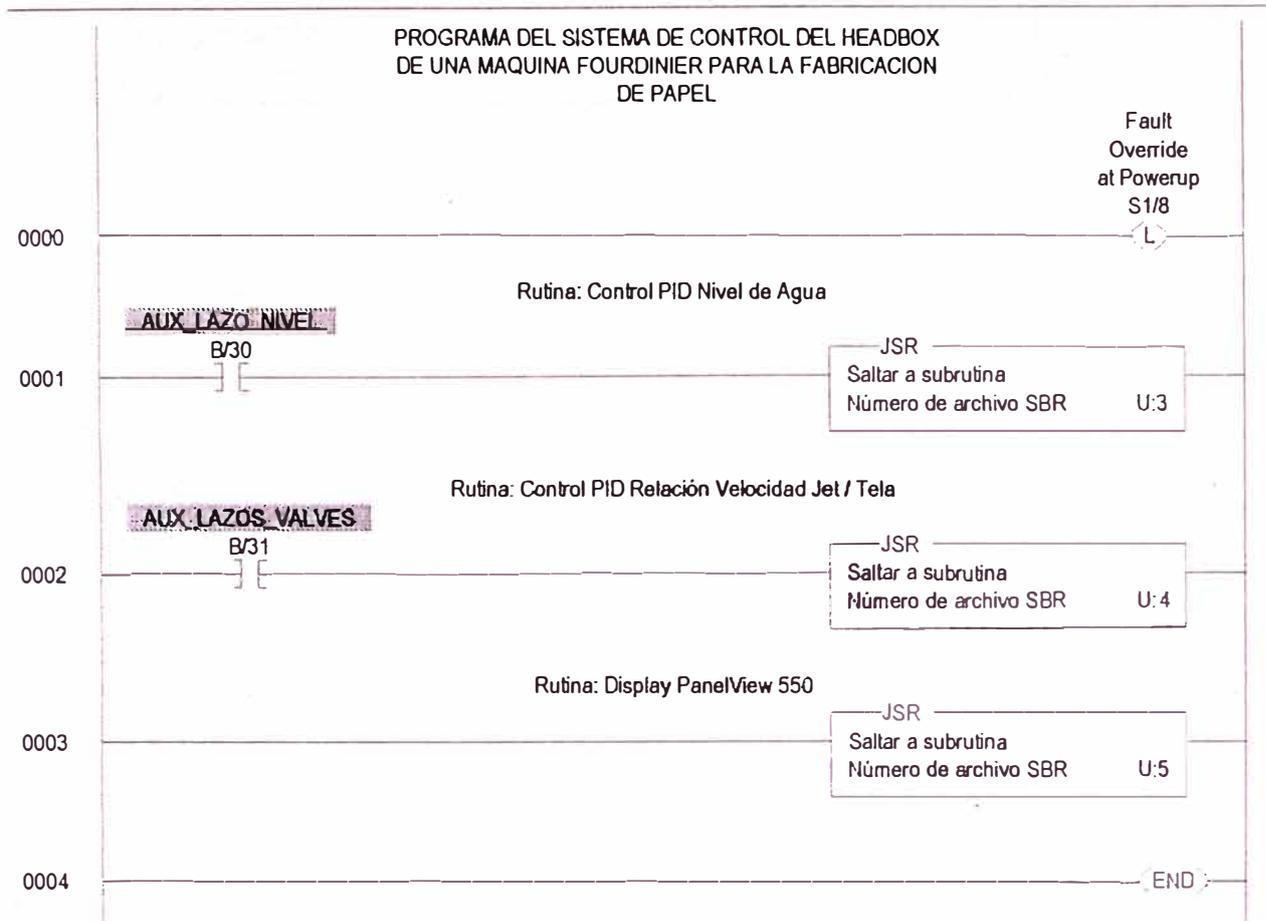
Es común en cada rotura despresurizar automáticamente el sistema de vapor de secado para evitar el recalentamiento en la superficie de los cilindros secadores, porque ya no fue necesario variar la presión en los grupos secadores para compensar variaciones de humedad dado que a lo largo de la banda de papel la formación es uniforme.

- 3. Que los proyectos de automatización y control se pueden hacer con recursos humanos nacionales,** ahorrando tiempo y dinero, en vez de contratar compañías extranjeras como originalmente se tuvo canalizando este caso.

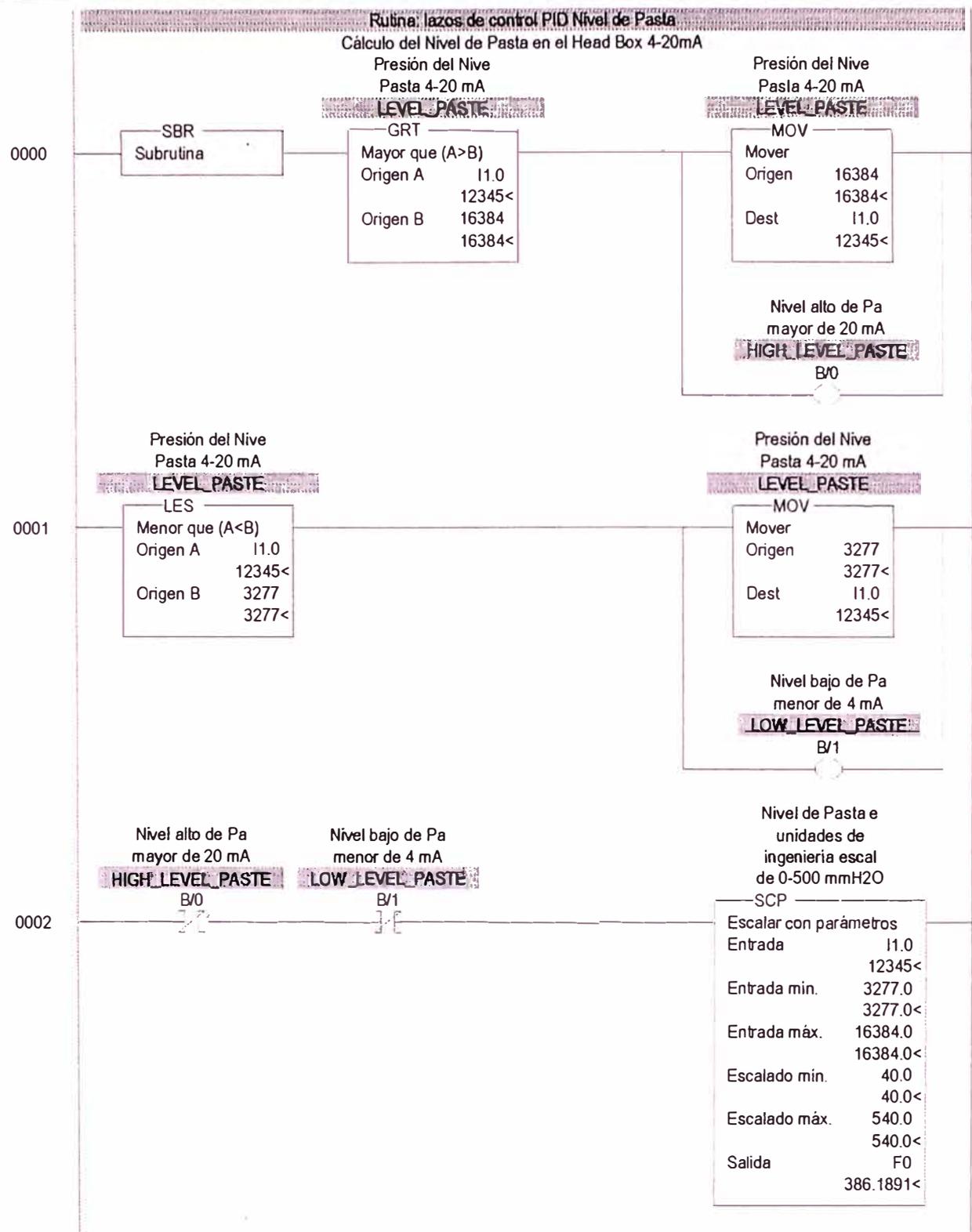
ANEXO A
LISTADO DEL PROGRAMA DEL SISTEMA DE
CONTROL DEL HEADBOX, EN LENGUAJE LADDER

Papelera.rss

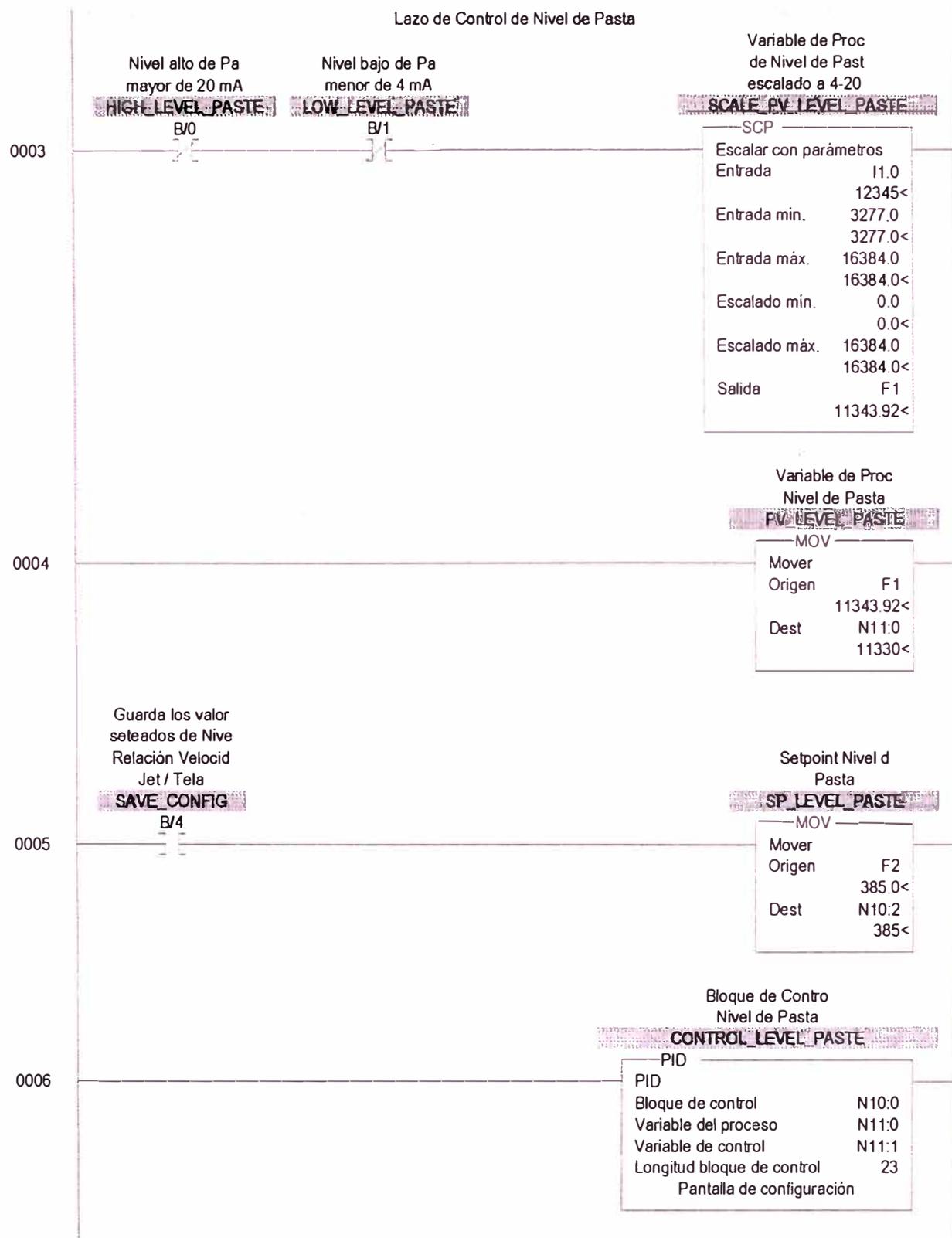
LAD 2 - PRINCIPAL — Total renglones en archivo = 5

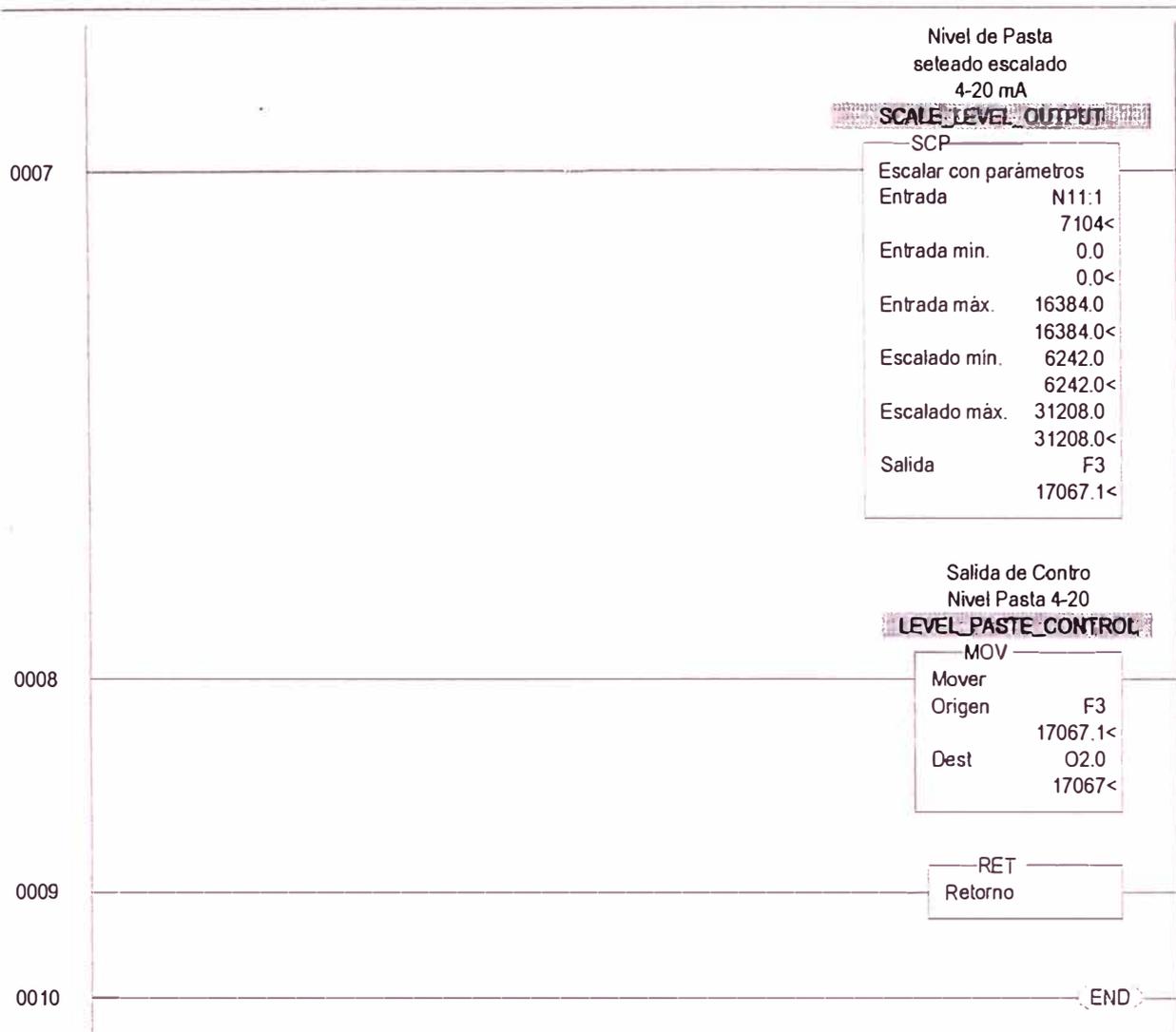


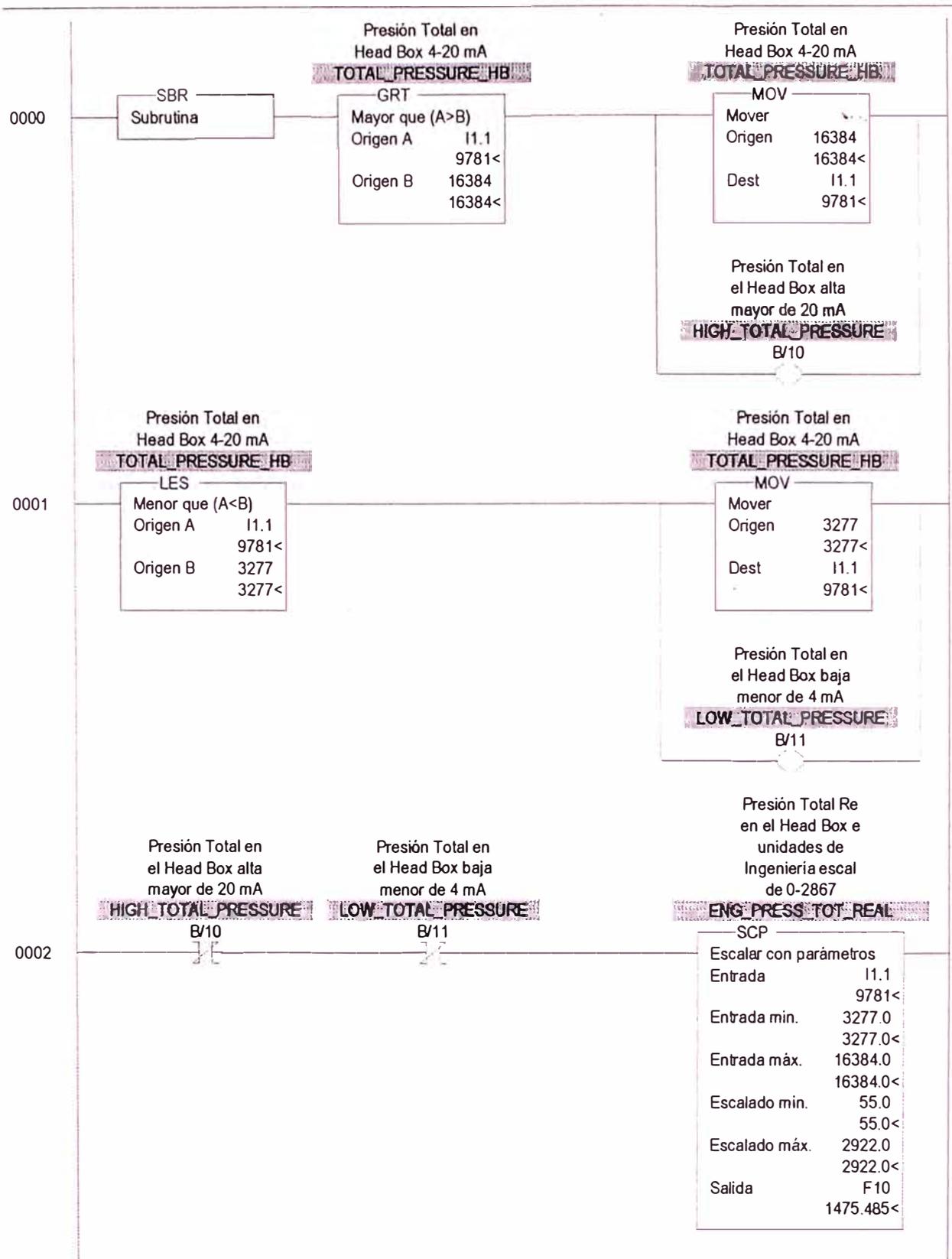
LAD 3 - NIVEL_PAST — Total renglones en archivo = 11

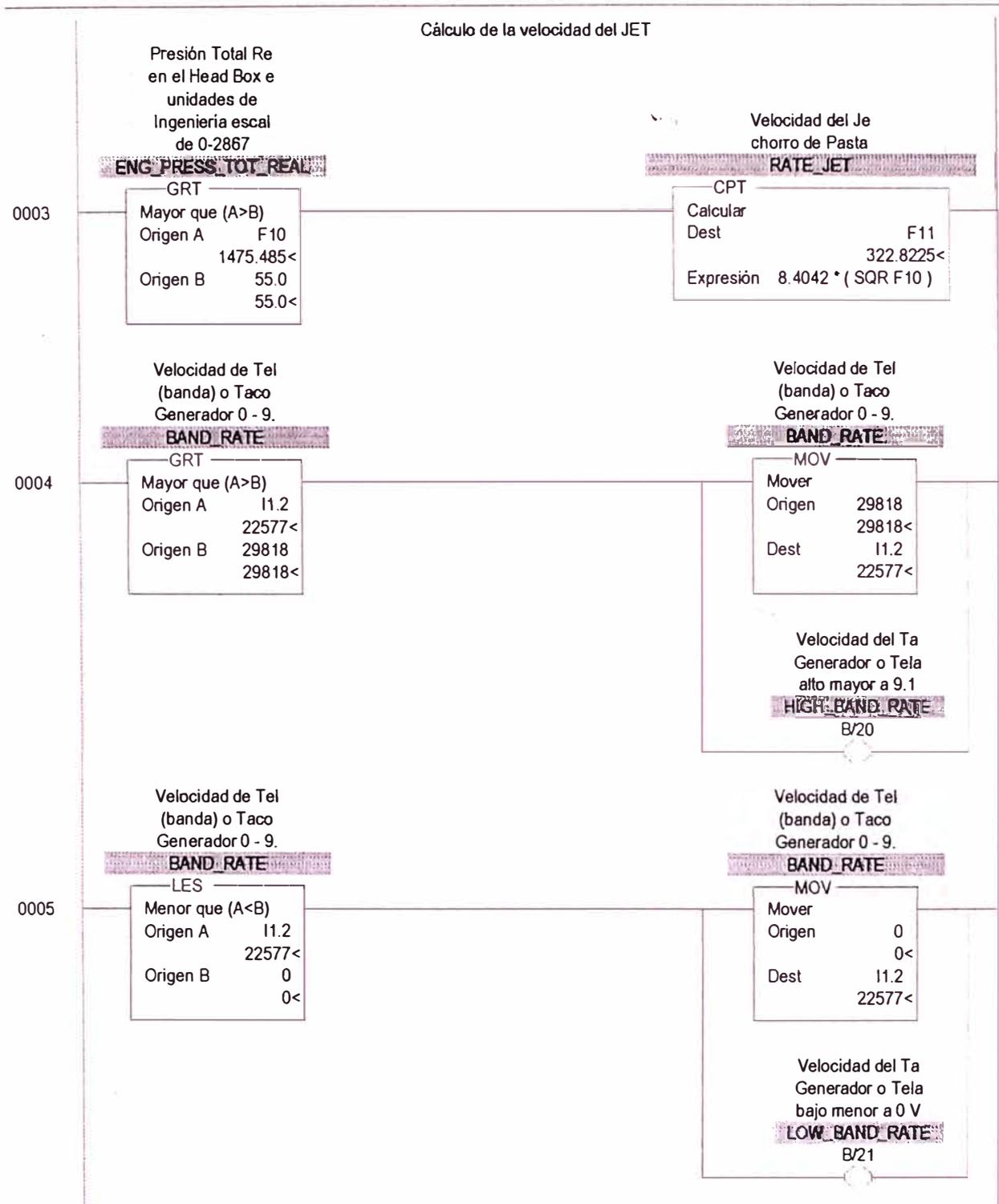


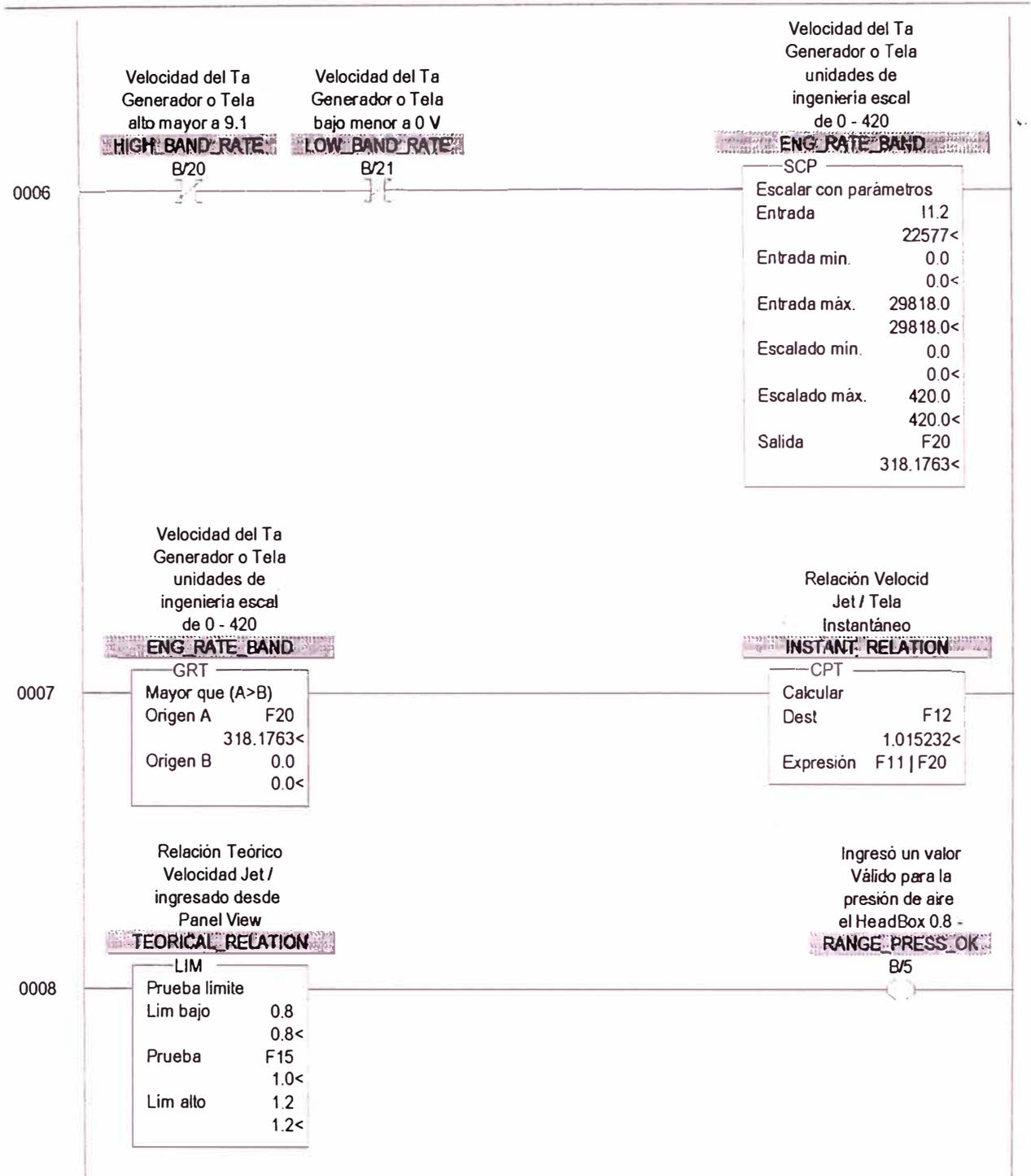
LAD 3 - NIVEL_PAST — Total renglones en archivo = 11



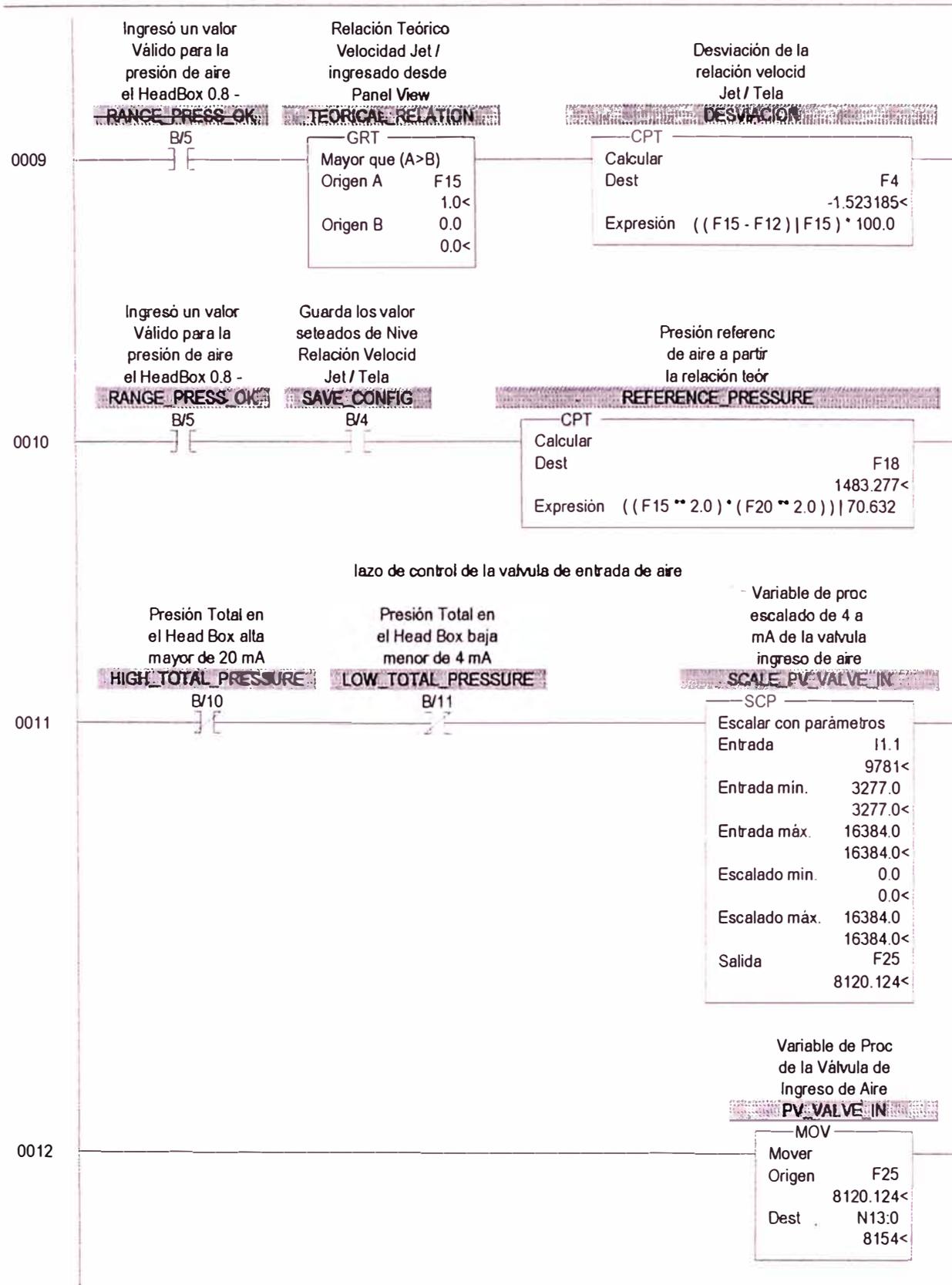


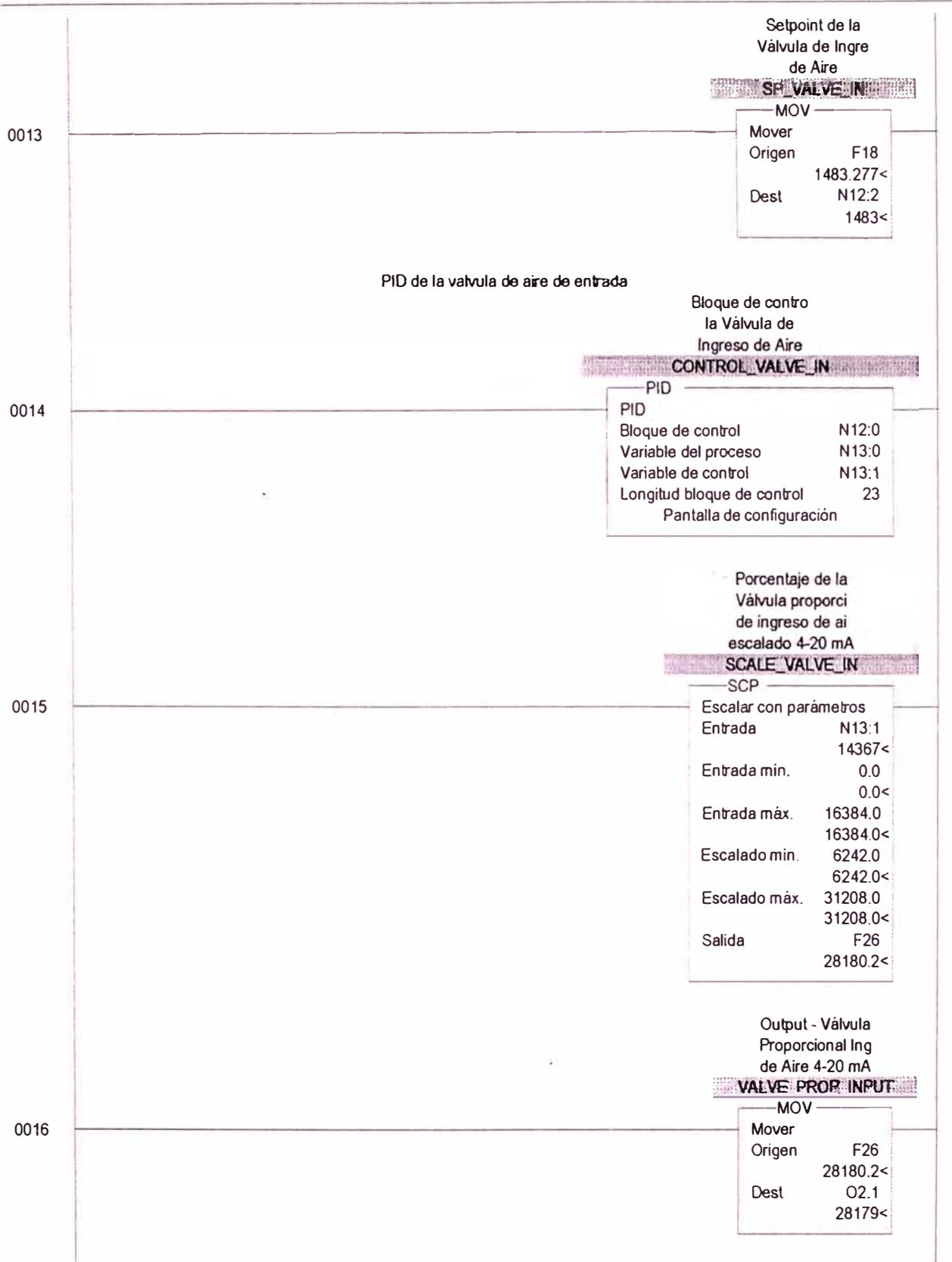


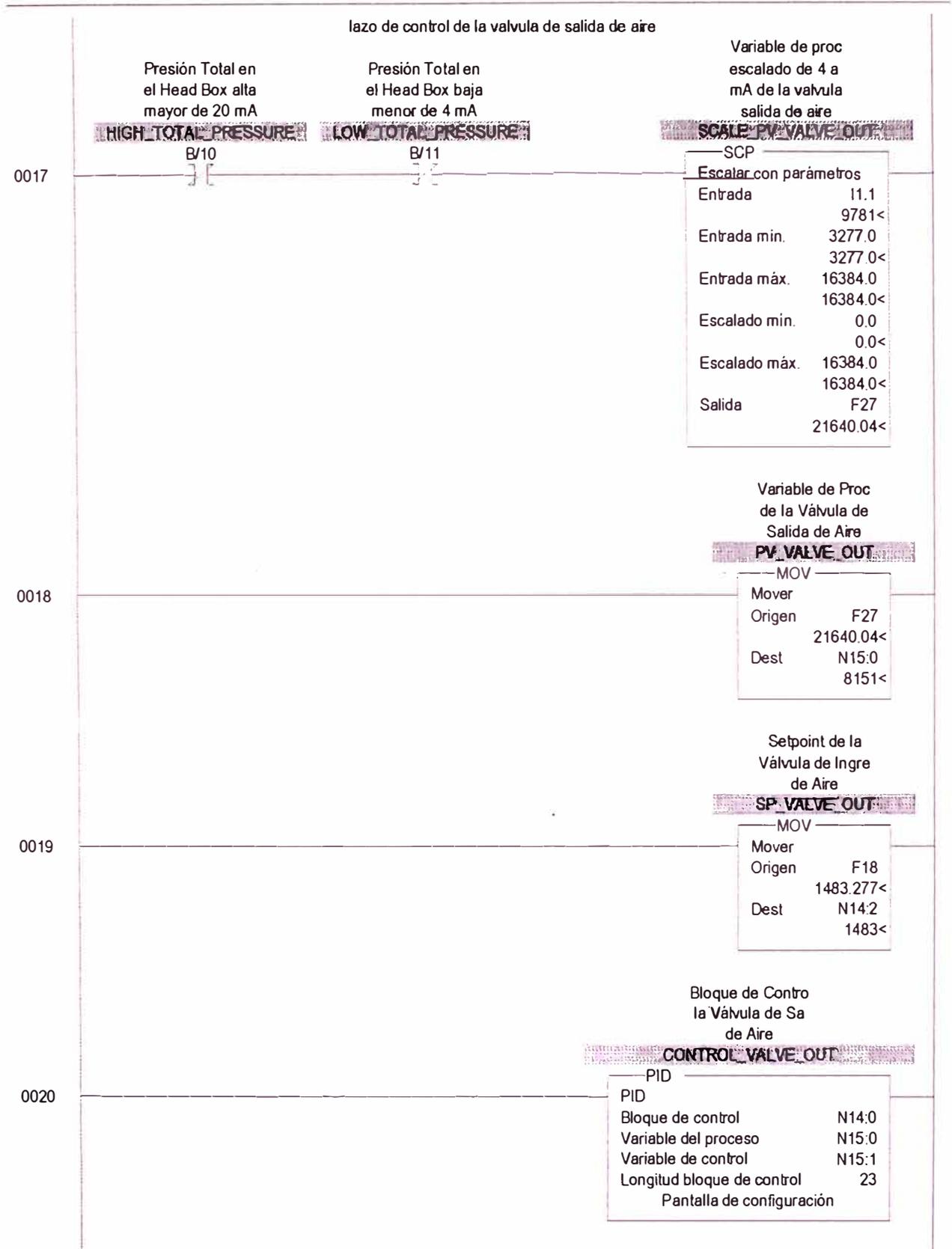


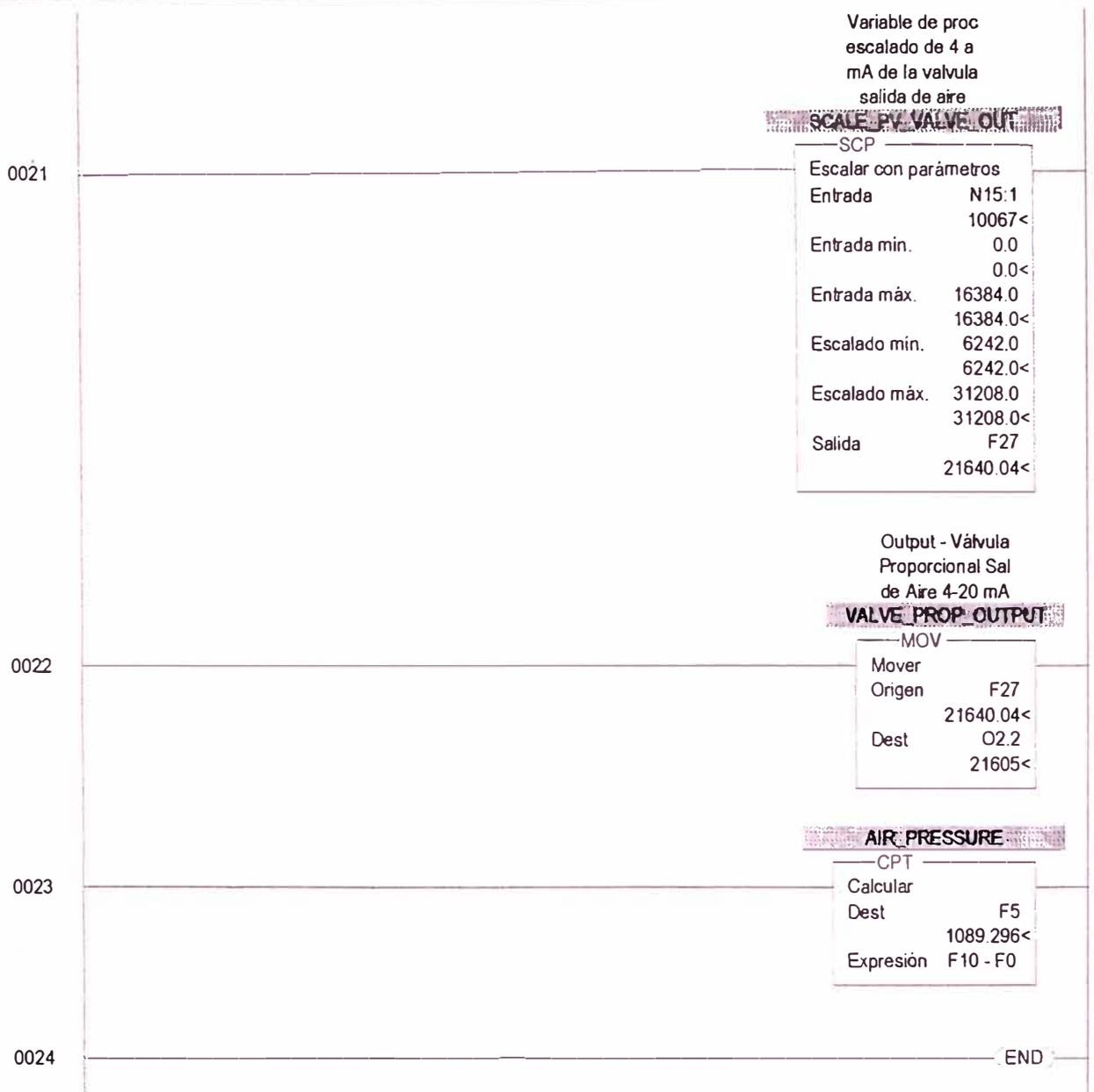


LAD 4 - JET/TELA — Total renglones en archivo = 25

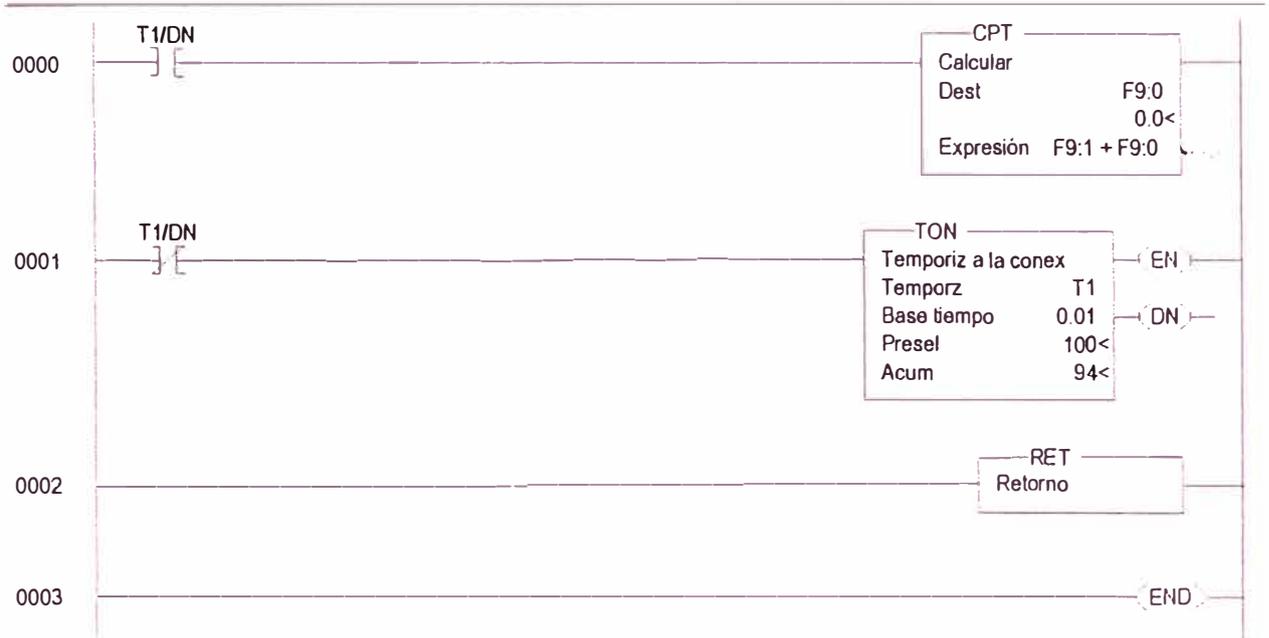








LAD 5 - PANEL_OPER — Total renglones en archivo = 4



BIBLIOGRAFÍA

1. Ciencia y Tecnología sobre pulpa y papel.
C. Earl Libby
By McGraw – Hill Book Company, Inc.
2. Beloit Corporation.
Bolton Research Centre
Bolton
England.
3. Examensarbete 1995 – 074 E
Avdelningen för reglerteknik – ISSN 039-6023
ISRN HLU – TH – EX- 1995/47-E--SE
Styrning av utströmningshastighet ur inloppslada
John Erik Larsson y Torbojörn Olsson.
Tekniska -Högskolan I Lulea 21/8/96
4. Rocwell automation – Allen Bradley.Publication 1746-2.34
Analog I/O Módulos for SLC Processors
5. Allen Bradley.Publication 1747 – UM0 11C-EN-P- December 2001
SLC 500 Modular Hardware style - User Manual
6. Allen Bradley.Publicación 1747 – 6.15 es
Manual de Referencia