

**Optimización de una caldera de bagazo en un Ingenio
Azucarero mediante la automatización**

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ciencias y Humanidades



**Optimización de una caldera de bagazo en un Ingenio
Azucarero mediante la automatización**

**Trabajo de graduación presentado por Juan Carlos
Tercero Antillón para optar al grado de Licenciatura
en Ingeniería Mecánica**

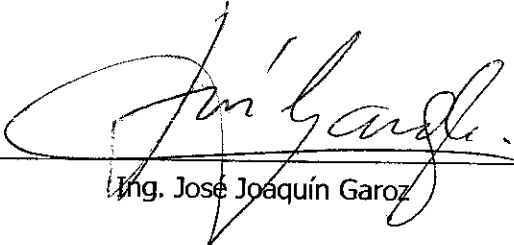
Guatemala 2003

Vo.Bo.:

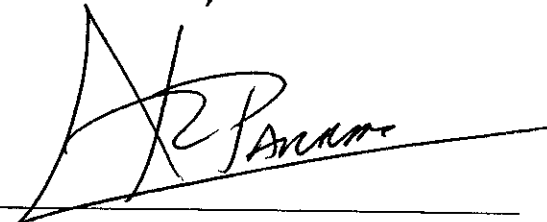
(f) 

Ing. Jorge Luis Muñoz

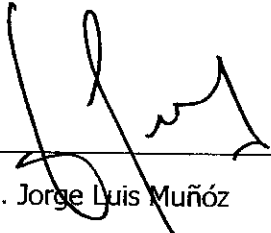
Tribunal:

(f) 

Ing. José Joaquín Garoz

(f) 

Ing. Carlos Paredes

(f) 

Ing. Jorge Luis Muñoz

Fecha de aprobación: Guatemala, Julio 2003

PREFACIO

AGRADECIMIENTOS

A: Mis padres, por darme la oportunidad de continuar mis estudios académicos.

A: Universidad del Valle de Guatemala, por brindarme una educación excepcional.

A: Ing. Jorge Luis Muñoz, por su valiosa asesoría.

A: German Gutierrez, por su ayuda en este trabajo.

A: ESINSA, por permitirme adquirir nuevos conocimientos.

RESUMEN

El tema la "Optimización de una caldera de bagazo en un Ingenio Azucarero mediante la automatización" muestra la importancia de la automatización aplicada en la Industria; en este caso en un Ingenio Azucarero.

Inicialmente en este trabajo se describe todo lo que es el proceso de la fabricación del azúcar para establecer la importancia que tiene una caldera dentro de un Ingenio Azucarero.

A continuación se describe la estructura y el funcionamiento de una caldera de bagazo; detallando todas sus partes e instrumentos que la conforman.

Este trabajo de investigación también contiene una introducción a la automatización dando una descripción de los conceptos y términos generales utilizados, dentro de la cual se listan y definen los instrumentos que conforman un sistema de automatización.

Por último, se detallan los puntos críticos para automatizar y se analiza el equipo necesario a implementar en el sistema de automatización para la operación de la caldera. Dentro de este tema se realizan los cálculos necesarios para poder elegir el equipo a implementar en la caldera.

Al final del trabajo se tiene una amplia y específica referencia acerca de la integración del sistema de automatización de una caldera típica de bagazo en un Ingenio Azucarero.

ÍNDICE

	Página
PREFACIO	iv
RESUMEN	v
LISTA DE CUADROS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix

Capítulos

1. INTRODUCCIÓN	1
2. PROCESO DEL AZÚCAR	3
2.1 Preparación de caña	3
2.2 Molinos	7
2.3 Fábrica	9
2.4 Uso de vapor en el Ingenio	18
3. CALDERAS DE BAGAZO	20
3.1 Cámara de combustión	20
3.2 Alimentadores de bagazo	22
3.3 Over fire	23
3.4 Colectores de ceniza	23
3.5 Domos	24
3.6 Economizadores	26
3.7 Supercalentador	27

3.8	Tiro forzado	27
3.9	Precalentadores de aire	28
3.10	Tiro inducido	29
3.11	Ciclo de vapor	29
4.	INTRODUCCIÓN A LA AUTOMATIZACIÓN	32
4.1	Definición de automatización	32
4.2	Definición de proceso	33
4.3	Control de procesos	33
4.4	Tipos de lazos de control	35
4.5	Modos de control de procesos	39
4.6	Sensores y transmisores	44
4.7	Controladores	78
4.8	Elemento final de control	80
5.	AUTOMATIZACIÓN DE UNA CALDERA DE BAGAZO	82
5.1	Datos de la caldera	82
5.2	Sistema de automatización	83
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	102
7.	BIBLIOGRAFÍA	104

LISTA DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Porcentaje de sacarosa en mieles	17
2. Áreas de uso del vapor	18
3. Rango de trabajo en termómetros de vidrio	44
4. Tipos de termocoplas	47
5. Datos de la caldera	82
6. Elementos para control de alimentadores de bagazo	84
7. Elementos para control de over fire	86
8. Elementos para control de nivel	87
9. Elementos para control de tiro forzado	96
10. Elementos para control de tiro inducido	98
11. Elementos para control de economizador y precalentador	99

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1. Mesa alimentadora	4
2. Picadora de caña	5
3. Desfibradora	6
4. Mazas	7
5. Agua de imbibición	8
6. Clarificador	10
7. Filtro de cachaza	10
8. Evaporador	11
9. Etapa de evaporadores	13
10. Tacho	14
11. Crecimiento de grano	15
12. Agotamiento de mieles	16
13. Area de secado	18
14. Caldera de bagazo	21
15. Triángulo de combustión	22
16. Alimentador de bagazo	23
17. Domo superior e inferior	24
18. Domo superior	25
19. Sección de economizador	26
20. Precalentador de aire	28
21. Ciclo de Ranking	30

22. Ciclo de vapor de calderas	31
23. Lazo de control	34
24. Lazo de retroalimentación	35
25. Lazo de cascada	36
26. Lazo de relación	37
27. Control adelantado	38
28. Control adelantado retroalimentado	38
29. Control proporcional	40
30. Banda proporcional	40
31. Efecto de banda proporcional estrecha	41
32. Efecto de banda proporcional ancha	42
33. Offset	42
34. Control integral	43
35. Control derivativo	43
36. Termómetro bimetalico	45
37. Termómetro de bulbo y capilar	46
38. Termocoplas	46
39. RTD	48
40. Tubo Bourdon	49
41. Diafragma	49
42. Fuelle	50
43. Transmisor de equilibrio de fuerzas	51
44. Transductor resistivo	51
45. Transductor de inductancia variable	52
46. Transductor de reluctancia variable	52
47. Transductor capacitivo	53

48. Galgas extensiométricos	53
49. Transductor piezoeléctrico	54
50. Placa-orificio	55
51. Tubo venturi	56
52. Tubo Pitot	56
53. Tubo Annubar	57
54. Transmisor de fuelle	57
55. Transductor de diafragma	58
56. Rotámetros	58
57. Potenciómetro	59
58. Medidor de caudal de turbina	60
59. Transductor ultrasónico	61
60. Medidor de placa	62
61. Medidor magnético	62
62. Medidor de disco oscilante	63
63. Medidor térmico de caudal	65
64. Medidor axial de doble turbina	66
65. Medidor giroscópico	67
66. Medidor de regla graduada	68
67. Nivel de cristal	68
68. Instrumento de flotador	69
69. Medidor manométrico	70
70. Medidor de membrana	70
71. Medidor tipo burbujeo	71
72. Medidor de presión diferencial en un tanque cerrado	71
73. Instrumento de desplazamiento	72

74. Medidor de nivel conductivo	73
75. Medidor de capacidad	73
76. Ultrasónico	74
77. Medidor de radiación	77
78. Válvula	80
79. Lazo de control para alimentadores de bagazo	85
80. Lazo de control para over fire	86
81. Lazo de control de nivel	87
82. Nivel de seguridad	88
83. Coeficiente de descarga para placa-orificio	92
84. Lazo de control para tiro forzado	97
85. Lazo de control para tiro inducido	99
86. Lazo de control para economizador y precalentador	100

1. INTRODUCCIÓN

El sector azucarero en Guatemala tiene una gran importancia en la economía del país ya que el azúcar es considerado uno de los productos tradicionales de exportación más importantes; ocupa el segundo lugar en la tabla de productos principales de exportación después del café. Actualmente Guatemala ocupa el sexto lugar como país exportador de azúcar a nivel mundial, y el año pasado exportó 29.50 millones de quintales de azúcar, generando el 3% del PIB de nuestro país. Por otro lado, la industria azucarera genera cerca de 250,000 empleados directos e indirectos, por lo que no sólo la industria azucarera es muy influyente en la economía del país sino que también aporta muchas oportunidades de trabajo.

La optimización de los procesos en la industria azucarera es vital para asegurar que se siga generando capital y así seguir apoyando la economía nacional de Guatemala. Actualmente el mercado del azúcar se vuelve cada día más competitivo, por lo que al mejorar un proceso se pueden disminuir precios y así volverse más competitivos en el mercado mundial.

La automatización industrial es el medio por el cual se puede llevar a cabo un control de procesos y así mejorar tanto el proceso como el producto final, se disminuyen tiempos perdidos, fallas de operación, mejora en la eficiencia, entre muchos beneficios más. Todo esto gira en torno a la reducción de costos de operación, creando así un proceso competitivo a nivel mundial.

Las calderas en un Ingenio Azucarero se pueden considerar como el corazón del Ingenio, ya que tienen la función de producir vapor para generar energía eléctrica para la operación del Ingenio, accionar molinos, proporcionar vapor a los evaporadores, generar energía eléctrica para la red nacional, entre otras. Es por esto que las calderas de bagazo son una parte vital a automatizar dentro de un Ingenio Azucarero.

Con el presente trabajo se pretende dejar plasmada una base para la implementación de un sistema de automatización en una caldera de bagazo en un Ingenio Azucarero.

2. PROCESO DEL AZÚCAR

El proceso del azúcar es muy completo ya que reúne varias áreas de Ingeniería dentro del mismo proceso. Éste inicia con la obtención de la caña de azúcar de los cañaverales transportándola hacia el Ingenio en donde se procesa pasando por varias etapas: preparación de caña, molinos y fábrica dando como resultado el grano de azúcar.

A continuación se describe cada parte que involucra el proceso del azúcar.

2.1. Preparación de caña

El primer paso de la fabricación de azúcar es la preparación de la caña; la cual consiste en preparar la materia prima de tal forma que esta pueda ser molida para la extracción del jugo.

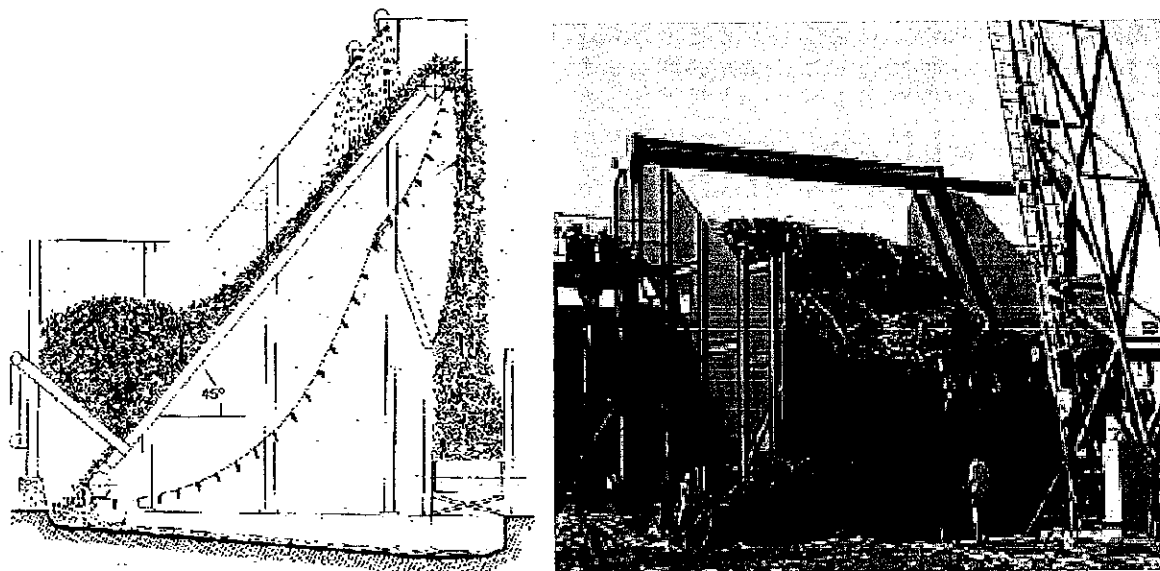
La preparación de caña se divide en dos pasos: lavado y el desmenuzado; el lavado se realiza en las mesas alimentadoras y el desmenuzado ya sea en picadoras, desfibradoras o en una combinación de ellas.

2.1.1. Mesas alimentadoras. La caña de azúcar proveniente de las siembras se transporta al Ingenio Azucarero por medio de trailers, camiones, tractores, etc. y luego se deposita en mesas alimentadoras por medio de grúas de pluma.

La función de las mesas alimentadoras es limpiar la caña de azúcar de todas las impurezas que trae de los cañaverales; incluyendo basura, hojas secas, tierra, raíces, etc.

Las mesas alimentadoras constan de un equipo transportador y de un sistema de lavado. El equipo transportador, por lo general, está inclinado a 45° con el fin de aumentar la eficiencia del lavado de la caña y el sistema de lavado se encuentra en la parte superior de la mesa alimentadora así como se muestra en la figura #1.

Figura #1. Mesa alimentadora



El agua de lavado, por lo general, proviene del sistema de condensadores en el Ingenio. El sistema de condensadores se alimenta por agua proveniente de algún cauce natural, siendo un río lo más común en nuestro medio. El agua de lavado arrastra el lodo y gran parte de la basura, la cual se drena por la parte inferior de la mesa alimentadora y luego se somete a un tratamiento de agua para regresarla a su cauce natural.

2.1.2. Desmenuzado. La caña de azúcar proveniente de la mesa alimentadora se conduce al área de desmenuzado. La función del desmenuzado es reducir el tamaño de la caña hasta pequeñas fibras para que esta pueda ser

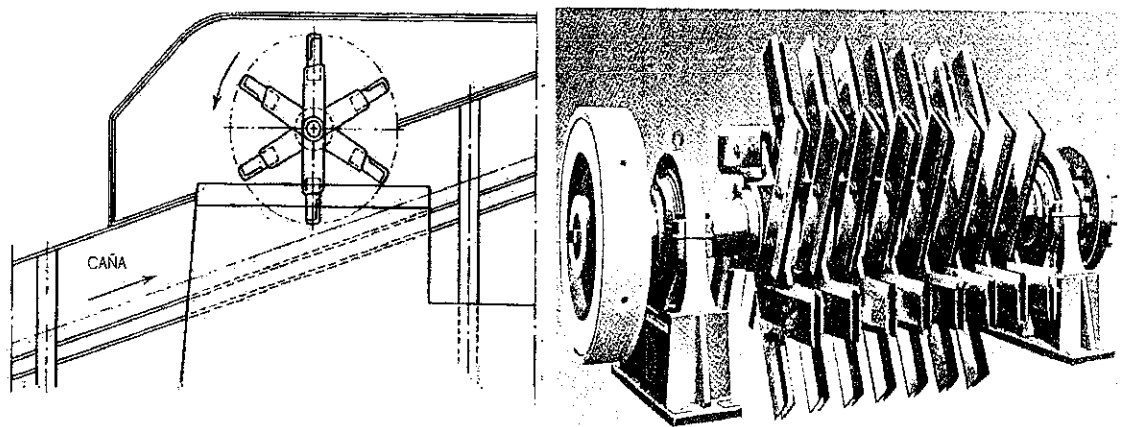
procesada en el área de molinos. El desmenuzado tiene que reducir el tamaño de la caña sin extraer el jugo de la misma.

La maquinaria utilizada para el proceso de desmenuzado son picadoras, desfibradoras o una combinación de estas. A continuación se describe cada una de ellas.

2.1.2.1. Picadoras. Las picadoras constan de un juego de cuchillas giratorias que están ubicadas a todo el ancho de los conductores de caña. Éstas únicamente cortan la caña en trozos sin extraer el jugo.

Por lo general se utilizan uno, dos o tres juegos de cuchillas colocadas a cierta distancia. Las cuchillas giran a velocidades entre 450 a 700 RPM en la misma dirección con que avanza la caña de azúcar, así como se muestra en la figura #2.

Figura #2. Picadora de caña



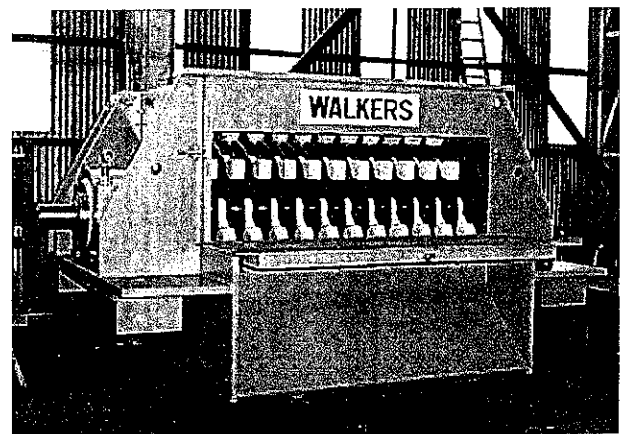
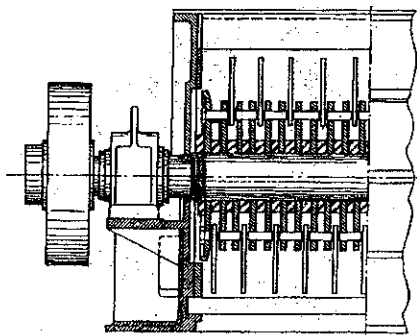
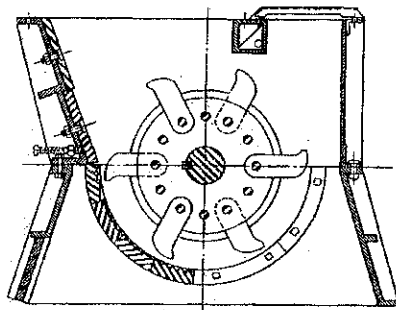
Existen algunos Ingenios Azucareros que únicamente utilizan picadoras para la preparación de la caña de azúcar. La extracción en los molinos aumenta si se utilizan desfibradoras.

2.1.2.2. Desfibradoras. Una configuración típica para la preparación de caña es la utilización de una picadora seguida por una desfibradora. La desfibradora tiene la función de reducir los trozos de caña en pequeñas fibras para aumentar el rendimiento de la extracción del jugo en los molinos. Al igual que las picadoras las desfibradoras de reducir la caña en pequeñas fibras sin extraer jugo.

Las desfibradoras no pueden trabajar con trozos enteros de caña, por lo que las picadoras deben reducir el tamaño de la caña para que luego pueda pasar por las desfibradoras.

Éstas están compuestas por una serie de martillos oscilantes que son accionados por motores eléctricos, los cuales trabajan a velocidades de 1,200 RPM.

Figura #3. Desfibradora



2.2. Molinos

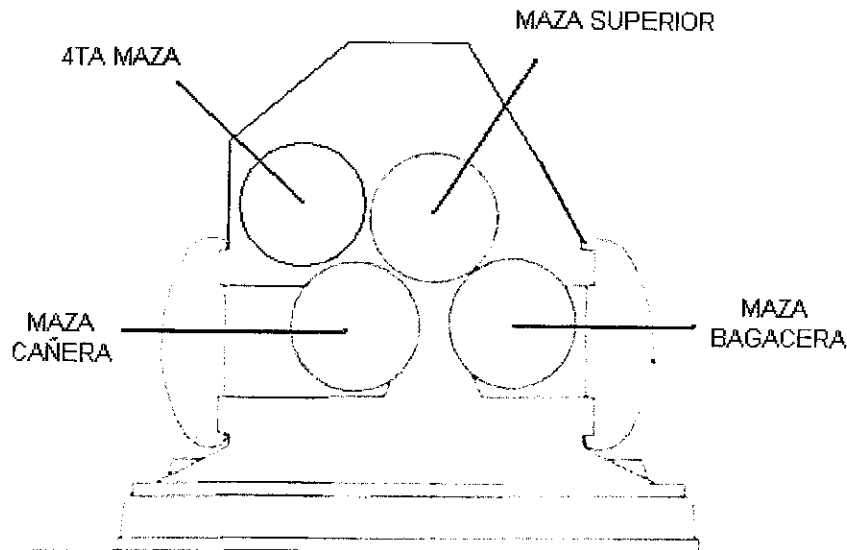
Después de la preparación, la caña se encuentra lista para la extracción de jugo que contiene la sacarosa que al final del proceso dará como resultado el grano de azúcar. La extracción del jugo se lleva a cabo por medio de los molinos.

En un Ingenio Azucarero se tienen varios molinos en serie para moler la caña de azúcar. A esta serie de molinos se le conoce como tandem de molinos. A su vez dentro de un Ingenio se puede tener 1 ó 2 tandems de molinos.

La extracción del jugo en los molinos tiene lugar en los rodillos, conocidos como mazas en la industria azucarera. El número de mazas por molino, por lo general varía entre 3, 4 y 6, de las cuales los molinos de 4 mazas son los más utilizados; es por esto que analizaremos este tipo de molinos.

Cada maza en un molino posee un nombre específico; éstas se identifican en la figura #4.

Figura #4. Mazas



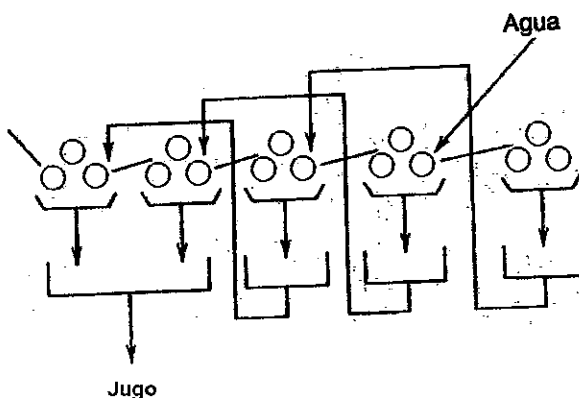
La caña de azúcar entra por la cuarta maza o alimentadora, cuya función así como su nombre lo indica es la de alimentar la caña preparada al molino, sin tener ningún efecto de molienda. Luego pasa entre la maza superior y las mazas cañera y bagacera, extrayendo así el jugo.

El jugo extraído en el molino se drena por la parte inferior del molino hacia el canal que conduce el jugo. Por otro lado, la parte fibrosa, llamada bagazo, sale por el lado opuesto de la cuarta maza, o sea la maza bagacera y se dirige hacia el siguiente molino para una siguiente extracción. En el caso en que sea el último molino del tandem el bagazo se dirige hacia el área de calderas para generar vapor.

Una parte muy importante en el área de molinos es la aplicación de agua de imbibición al bagazo. El término imbibición se define como "el proceso en el que se aplica agua o jugo al bagazo para aumentar la extracción de jugo en el siguiente molino".

En la práctica, la imbibición consiste en agregar agua al bagazo que se transporta hacia el último molino del tandem, y el jugo extraído de este último molino se agrega al bagazo que se dirige al penúltimo molino y así sucesivamente hasta llegar al primer molino. Un esquema de imbibición se visualiza en la figura #5.

Figura #5. Agua de imbibición



Luego de la extracción del jugo se procede al colado del jugo proveniente de los molinos debido a que posee impurezas así como fibras pequeñas de bagazo; conocidas como bagacillo; tierra, arena, entre otras. El equipo que se utiliza para colar o filtrar el jugo se conoce como tamiz, el cual es un proceso mecánico de filtración.

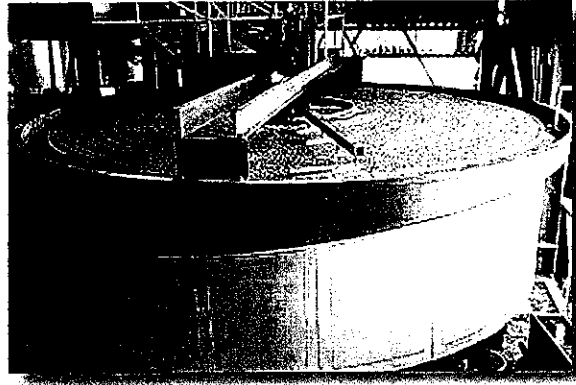
2.3. Fábrica

Después de filtrar el jugo de caña proveniente de los molinos, éste procede al área de fábrica en donde se procesa el jugo con el fin de obtener el grano de azúcar. La fábrica se divide en cuatro partes: Clarificación, Evaporación, Cristalización, Centrífugas y Secado. A continuación se describe cada parte de la fábrica.

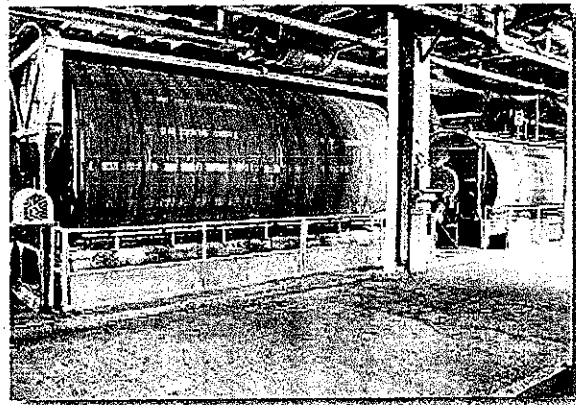
2.3.1. Clarificación. La función de la clarificación consiste en purificar el jugo por medio de la adición de cal, calor y otros productos. En este proceso se le añade cal suficiente para neutralizar los ácidos orgánicos presentes en el jugo y luego se eleva la temperatura a 95°C o más.

Durante este proceso se forma un precipitado denso que contiene diferentes sustancias, así como sales insolubles de calcio, albúmina coagulada y proporciones variables de ceras, grasas y gomas. A este precipitado se le conoce como cachaza, la cual es un producto de desecho en el Ingenio. Anteriormente la cachaza se desechaba, pero ahora ésta se utiliza como abono para tierras.

La cachaza se separa del jugo por medio de procesos de sedimentación y decantación. Estos procesos también eliminan todo el bagacillo que no se pudo filtrar en los tamices. El jugo obtenido en este proceso se conoce como jugo claro. Este proceso se lleva a cabo dentro de los clarificadores.

Figura #6. Clarificador

El jugo clarificado pasa a la etapa de evaporación y la cachaza hacia la etapa de filtros de cachaza. Los filtros de cachaza son filtros rotativos al vacío que separan el jugo remanente de la cachaza. Este jugo llamado jugo filtrado regresa a la etapa de clarificación y la cachaza se transporta al campo.

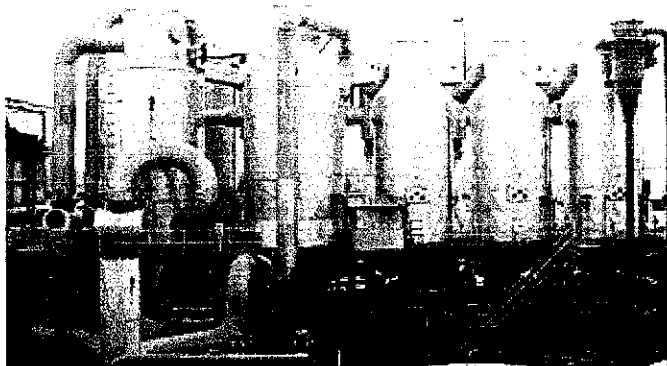
Figura #7. Filtro de cachaza

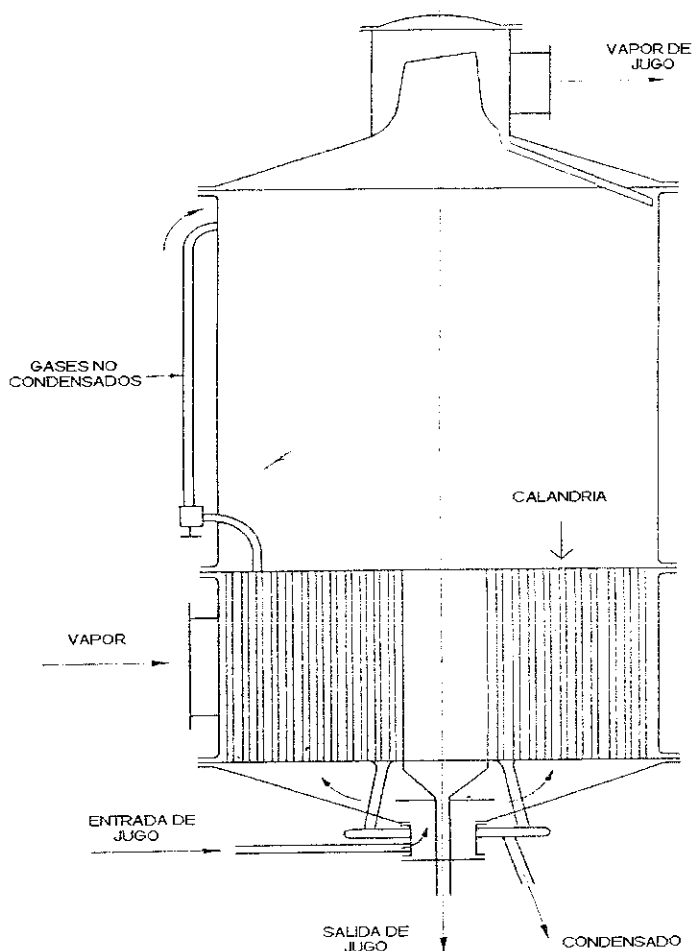
2.3.2. Evaporación. Una vez realizada la purificación del jugo se procede a la evaporación del agua que contiene el jugo. El jugo está compuesto de 85% de agua, la cual debe evaporarse por medio de los evaporadores. El proceso de evaporación es un proceso continuo.

El área de los evaporadores por lo general está compuesta de 3, 4 ó más etapas de evaporación, en donde cada etapa está compuesta por 2, 3 ó más cuerpos de evaporadores dependiendo del tamaño y configuración del sistema.

Los cuerpos de evaporación son recipientes cilíndricos que poseen un intercambiador de calor en la parte inferior del mismo conocido como calandria. La calandria es una estructura cilíndrica de igual diámetro que el evaporador que consta de una serie de tubos que rodean un tubo central. Dentro de la calandria circula el vapor y dentro de los tubos circula el jugo a evaporar. En la parte superior del evaporador se encuentra la tubería de vapores de escape formados por la evaporación del agua contenida en el jugo. En la parte inferior, al final de la calandria se encuentra la tubería de condensados que se forman al darse el intercambio de calor del vapor con el jugo. Un esquema de un evaporador se muestra en la siguiente figura #8.

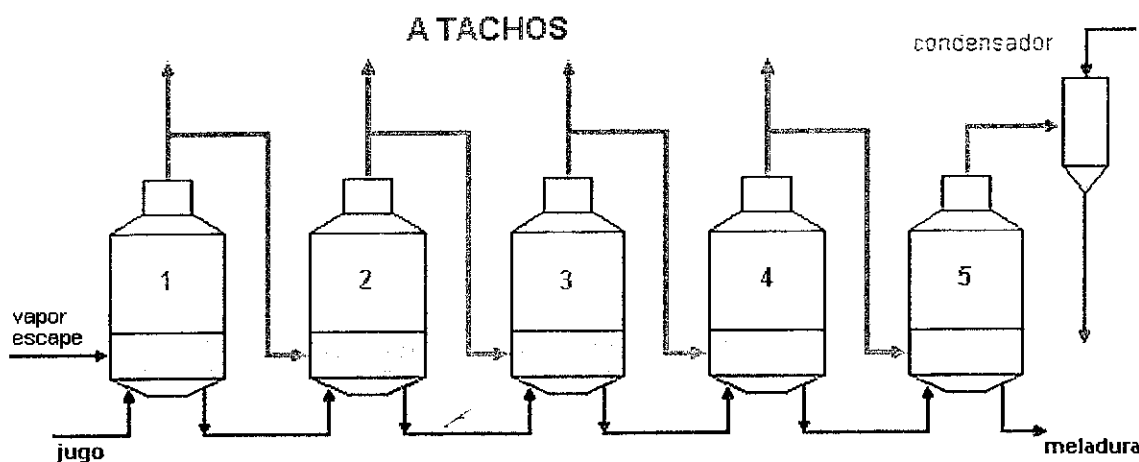
Figura #8. Evaporador



Continuación Figura #8. Evaporador

Los evaporadores se denominan de múltiple efecto debido a que únicamente la primera etapa de evaporadores es alimentada con vapor de escape generado por las calderas (el término vapor de escape será descrito en la sección de Ciclo de Vapor). Las siguientes etapas de evaporadores se alimentan del vapor generado durante la evaporación de agua en el evaporador anterior. Los vapores generados por el agua contenida en el jugo también son utilizados para alimentar el área de tachos. Este proceso se esquematiza en la figura #9.

Figura #9. Etapas de evaporadores



Únicamente los evaporadores de la primera etapa son alimentados con vapor generado por la caldera; el condensado que se forma de esta etapa en la salida de la calandria es retornado al tanque de alimentación de la caldera.

Como se puede observar en la figura los evaporadores están conectados en serie, tanto la tubería de vapor como la tubería del jugo; así es como se logra el efecto múltiple.

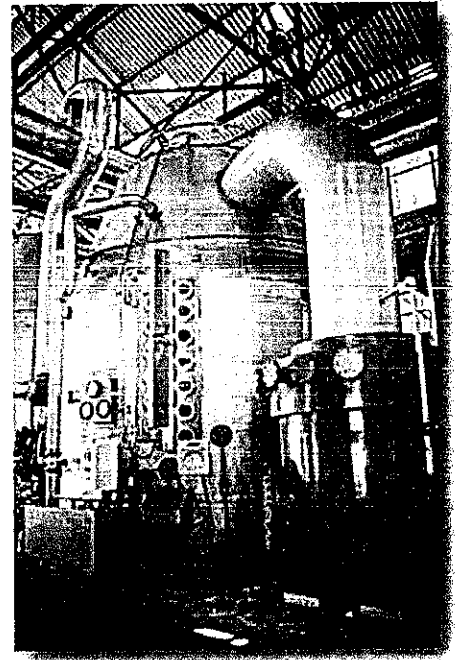
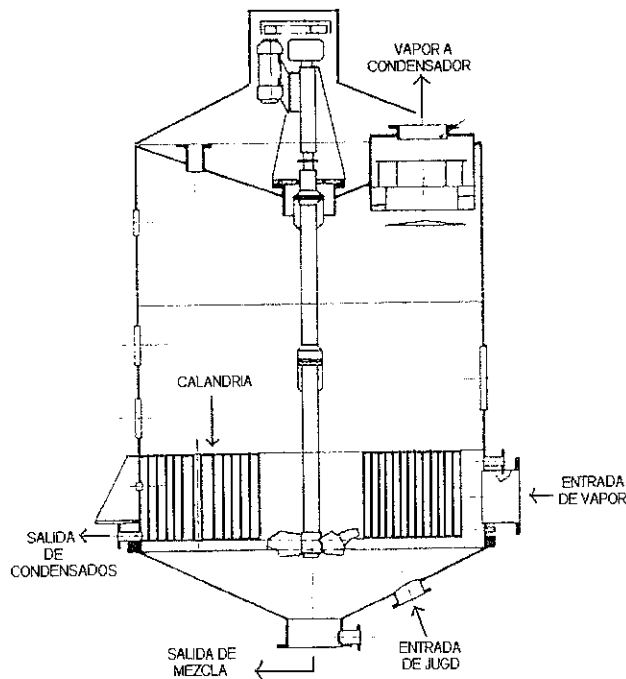
El vapor del último cuerpo de evaporadores se envía a un condensador, en donde los vapores se condensan y forman agua, la cual se utiliza en otras partes del Ingenio, así como por ejemplo en las mesas alimentadoras de caña.

El resultado de evaporar el jugo a través del cuerpo de evaporadores es una miel conocida como meladura, la cual posee un 35% de agua. La meladura se traslada al área de cristalización.

2.3.3. Cristalización. Su función, como su nombre lo indica, es la cristalización de la sacarosa que contiene la meladura. Este proceso se logra mediante evaporadores al vacío de simple efecto conocidos como tachos.

Los tachos poseen una estructura similar a los evaporadores con la diferencia que estos trabajan al vacío, poseen dimensiones diferentes y son de simple efecto. Las dimensiones de los tubos de la calandria son mayores que los de los evaporadores. El término "simple efecto" significa que cada tacho se alimenta con vapor generado por la evaporación y cada tacho posee su propio condensador.

Figura #10. Tacho



El área de tachos posee tres etapas conocidas como cristalización de primera, segunda y tercera.

La cristalización posee dos objetivos: Crecimiento del grano y agotamiento de mieles, las cuales se describen a continuación.

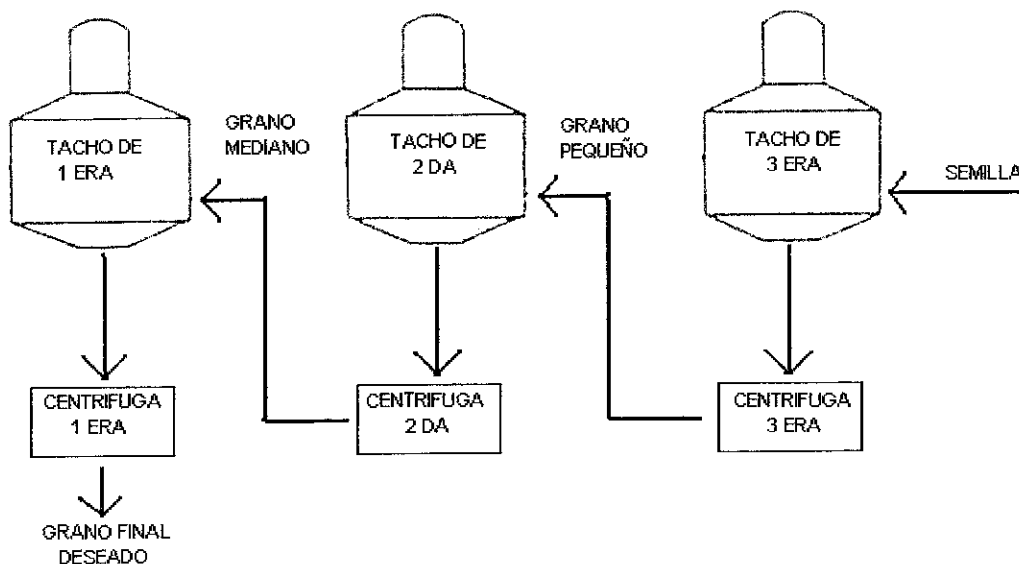
2.3.3.1. Crecimiento de grano. Este objetivo tiene como función darle un tamaño final deseado al grano para luego ser secado y envasado.

El crecimiento de grano inicia en los tachos de tercera en donde estos se alimentan de un grano molido conocido como semilla y de miel B, la cual se describe en la sección de agotamiento de mieles. La semilla tiene la función de darle una estructura al grano iniciando así el proceso de crecimiento. En la salida del tacho de tercera se tiene una mezcla de miel con grano la cual se separa en el área de Centrífugas; esta área se describirá en la sección de Centrífugas. Cada etapa de tachos posee su propia área de centrífugas para separar el grano de la miel.

El grano extraído del tacho de tercera se considera como grano pequeño y alimenta al tacho de segunda; del cual se obtiene un grano intermedio que alimenta al tacho de primera. En el tacho de primera se obtiene el grano final deseado que posteriormente pasa al área de secado.

En la figura #11 se representa el diagrama de flujo del crecimiento del grano.

Figura #11. Crecimiento de grano



2.3.3.2. Agotamiento de mieles. Este objetivo tiene la función de agotar la mayor cantidad de sacarosa contenida en la meladura proveniente de los evaporadores. La finalidad de agotar la sacarosa de las mieles es obtener la

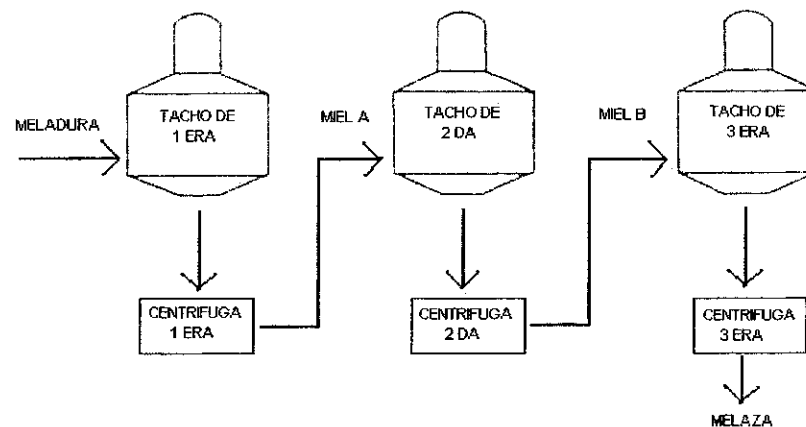
mayor cantidad de azúcar producida, término conocido como rendimiento de azúcar en el Ingenio.

La meladura entra en el tacho de primera y se mezcla con el grano intermedio proveniente del tacho de segunda, aquí se obtiene el crecimiento del grano intermedio a producto final agotando así la meladura. Luego de pasar por su respectiva centrífuga se separa el grano de su miel formándose miel A, que contiene menos porcentaje de sacarosa que la meladura.

La miel A, extraída de la centrífuga de primera, alimenta al tacho de segunda, en el cual el grano pequeño pasa a ser grano intermedio y consecuentemente la miel A se agota convirtiéndose en miel B.

Por último la miel B alimenta al tacho de tercera donde la semilla crece formando el grano pequeño y agotando la miel B la cual pasa a ser miel final conocida como melaza. En la figura #12 se muestra el diagrama del flujo del agotamiento de mieles.

Figura #12. Agotamiento de mieles



Entre cada etapa de los tachos la miel pierde sacarosa y el grano la recibe. En el cuadro #1 se muestran los porcentajes de pureza de sacarosa promedio en cada tipo de miel.

Cuadro #1. Porcentajes de sacarosa en mieles

Tipo de miel	Meladura	Miel A	Miel B	Melaza
Porcentaje de sacarosa	88%	74%	53%	34%

2.3.4. Centrífugas. La función de las centrífugas es separar el grano de azúcar de la miel. Como se indicó en la sección anterior cada tacho posee su respectiva área de centrífugas y se les denomina de la misma forma que los tachos: centrífuga de primera, segunda y tercera.

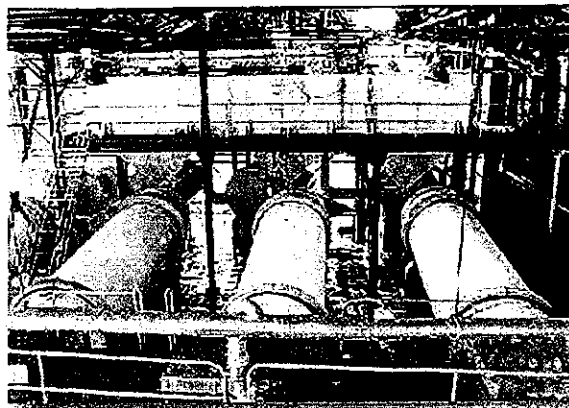
La centrífuga es una máquina que posee una canasta giratoria forrada por una malla, la cual está perforada con una infinidad de agujeros de pequeño diámetro conocido y diferente para cada área relacionado con el tamaño de grano; permitiendo así el paso de la miel por dichos agujeros y la retención del grano.

La separación se logra debido a la fuerza centrífuga que se genera debido a las altas velocidades a las que gira la canasta.

2.3.5. Secado. El azúcar proveniente de las centrífugas posee alrededor del 1% de humedad, por lo que se lleva al área de secado para eliminar la humedad.

Los secadores son tambores rotativos que se les introduce aire caliente por medio de ventiladores para secar el azúcar. El aire circula en contracorriente con el grano. Luego del secado el azúcar se lleva al área de envasado para su posterior comercialización.

Figura #13. Área de secado



2.4. Uso de vapor en el Ingenio

El vapor es una parte esencial en un Ingenio Azucarero, ya que éste genera energía para el funcionamiento del Ingenio, accionamiento de molinos, evaporadores, generación de energía eléctrica, calor proceso de azúcar, entre otros.

La fuente para generar vapor es el bagazo de caña proveniente de los molinos y el medio son las calderas de bagazo, las cuales funcionan con un ciclo de vapor que se describirán en el siguiente capítulo.

En el cuadro #2 se detallan las áreas en donde se emplea el vapor.

Cuadro #2. Áreas de uso del vapor

ÁREA	FUNCIÓN
Turbogeneradores	Los turbogeneradores se emplean para generar energía eléctrica para el Ingenio y en algunos casos para venta a la red nacional. El vapor se emplea para accionar las turbinas que a su vez accionan un generador de energía. Las turbinas reciben vapor a presión directamente de la caldera y sale de la turbina a una menor presión; a este vapor se le conoce como vapor de escape.
Molinos	Los molinos se accionan por turbinas de vapor, las cuales como su nombre lo indican son accionadas por medio del flujo

	de vapor. Al igual que los turbogeneradores las turbinas de los molinos reciben vapor a alta presión y descargan vapor de escape.
Evaporadores	El vapor de escape proveniente tanto de los turbogeneradores como de los molinos se utiliza para alimentar la primera etapa de evaporadores.
Tachos	El vapor generado por los evaporadores se utiliza para alimentar cada uno de los tachos.
Otras áreas	El vapor proveniente de evaporadores como de escape se utiliza en otras áreas tales como: calentadores, limpiezas, área de secado y otras.

3. CALDERAS DE BAGAZO

Las calderas son una parte esencial en un Ingenio Azucarero ya que éstas producen vapor para generar energía eléctrica y para el uso interno en la Planta. Dentro de un Ingenio se utilizan varias calderas y también de distinto tamaño dependiendo del equipo de la fábrica, la calidad de la caña, la cantidad de agua de imbibición y la calidad de azúcar que se produce.

Las calderas son aparatos de transferencia térmica que convierten combustible fósil, energía eléctrica o nuclear, a través de un medio de trabajo, por lo general agua, en energía y la dirige hacia algún aparato externo de transferencia de calor dentro de una planta. Esta energía se puede convertir para producir energía mecánica mediante turbinas de vapor o energía eléctrica mediante turbogeneradores. Las calderas por lo general se dividen en tres: Piro-tubulares, Acuotubulares y Eléctricas.

Las calderas utilizadas en un Ingenio Azucarero son de tipo acuotubulares; o sea que los productos de la combustión rodean a los bancos de tubos y el agua circula por el interior de dichos tubos. En la figura #14 se ilustra una caldera de bagazo.

A continuación se describe cada parte de la caldera.

3.1. Cámaras de combustión (Horno)

Para que una caldera genere vapor se debe formar la combustión. La combustión requiere de tres elementos fundamentales: oxígeno, combustible y calor, si alguno de estos elementos se elimina o no se encuentra en la proporción adecuada la combustión se termina. A estos tres elementos se les conoce como el triángulo de la combustión.

Figura #14. Caldera de bagazo

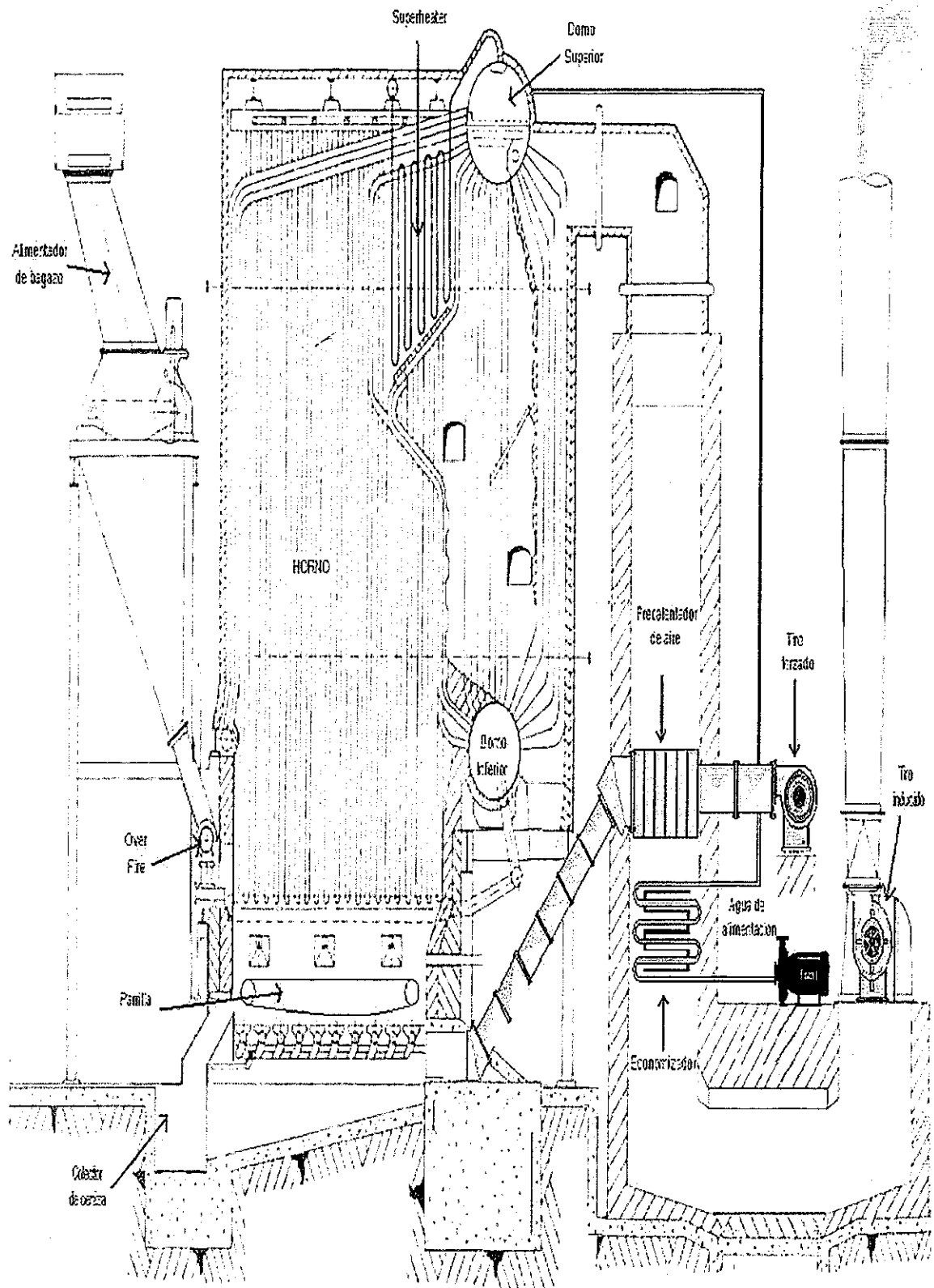
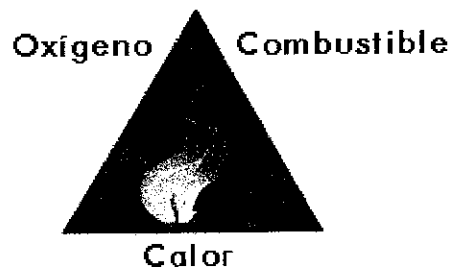


Figura #15. Triángulo de combustión



En una caldera de un Ingenio Azucarero el combustible utilizado para generar la combustión es el bagazo proveniente de los molinos, el oxígeno lo proporciona el aire y el calor es formado por medios artificiales.

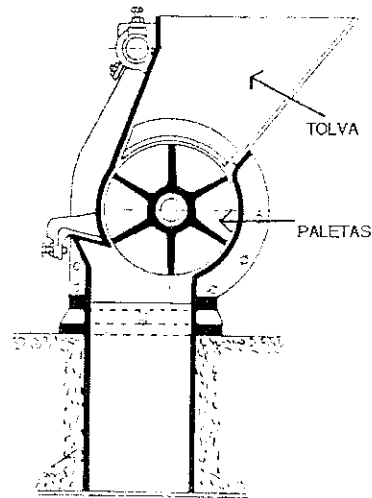
La cámara de combustión en una caldera de bagazo es todo el espacio entre las paredes del horno desde la parte superior de la parrilla hacia arriba.

3.2. Alimentadores de bagazo

El bagazo proveniente de los molinos se transporta al área de calderas por medio de conductores de bagazo. El bagazo se introduce a las calderas a través de alimentadores.

Los alimentadores de bagazo son dispositivos que constan de una tolva de alimentación y de unas paletas giratorias accionados por motores eléctricos o sistemas hidráulicos. Los alimentadores de bagazo son de velocidad variable para dosificar el combustible dependiendo de la producción de vapor de la caldera.

Figura #16. Alimentador de bagazo



3.3. Over Fire

Para la distribución del bagazo a través de toda la caldera se utilizan ventiladores de aire paralelo a la entrada a la caldera, sistema conocido como Over Fire. El bagazo es distribuido por toda la caldera y a medida que éste cae dentro del horno se va quemando. Estos ventiladores poseen dampers para regular el flujo de aire dependiendo de la alimentación de bagazo.

3.4. Colectores de ceniza

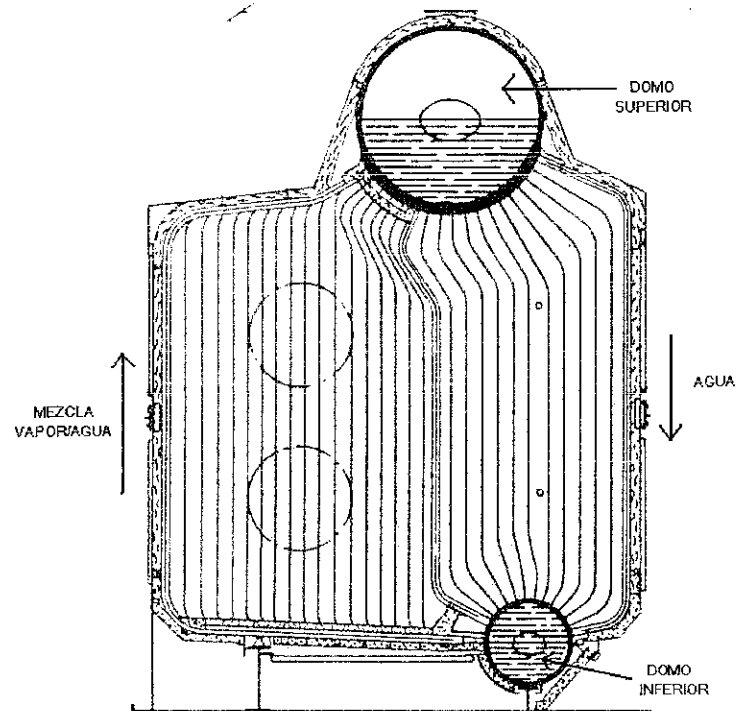
A medida que el bagazo se quema se forma ceniza, la cual debe ser removida del interior de la caldera. Por lo general, las calderas de bagazo poseen una rejilla corrediza o fija inclinada conocida como parrilla, la cual transporta la ceniza hacia los colectores. Dichas rejillas son accionadas por medio de motores eléctricos y debe circular a cierta velocidad tal que mantenga la capa de ceniza lo más bajo posible.

Una vez la ceniza se encuentra en los colectores se desecha del Ingenio por medio de agua. La ceniza puede ser utilizada como abono para tierras.

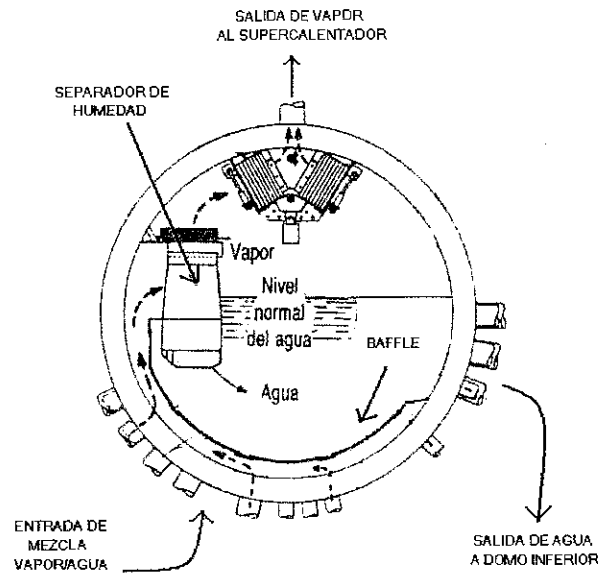
3.5. Domos

Generalmente las calderas poseen dos domos denominados superior e inferior. El agua de alimentación es bombeada al domo superior desde un tanque en donde se almacena agua proveniente de los condensados del área de fábrica del Ingenio. En la figura #17 se muestra un esquema del domo superior e inferior.

Figura #17. Domo superior e inferior



3.5.1. Domo superior. El domo superior posee tuberías de salida de agua hacia el domo inferior y de vapor hacia los sobrecalentadores. También tiene tuberías de entradas tanto de mezcla de vapor/agua como de agua de alimentación.

Figura #18. Domo superior

Dentro de este domo se separa el vapor del agua por medio de separadores de humedad. La separación del vapor se realiza bajo principios de fuerza de flotación o gravitacional; para las cuales se necesita un área de sección transversal relativamente grande y, por lo tanto, una velocidad baja del fluido dentro del domo, así como una diferencia efectiva en las densidades de los fluidos. El domo posee un separador conocido como Baffle que separa la entrada de agua de alimentación de la entrada de mezcla de vapor/agua.

3.5.2. Domo inferior. El domo inferior recibe agua del domo superior y posee tuberías de salida; las cuales están distribuidas por todo el horno de la caldera y es donde ocurre la transferencia de calor dando como resultado una mezcla de vapor/agua y ésta circula hacia el domo superior en donde se separa el vapor del agua.

En el domo inferior se depositan las impurezas del agua, las cuales se remueven por medio de tuberías de purgado.

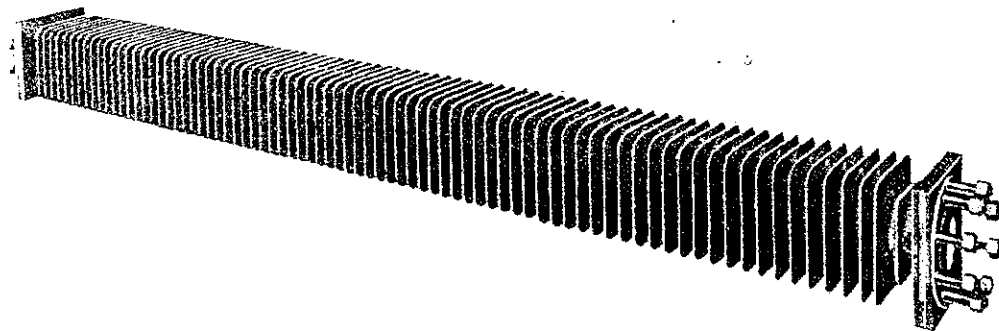
3.6. Economizadores

El agua de alimentación que se bombea a la caldera, por lo general, se encuentra a una temperatura de 90 °C y el rango de temperaturas al que debe de entrar el agua a una caldera va de 164 – 236 °C. Para evaporar agua a 90 °C se necesita mayor cantidad de calor, es por esto que se debe calentar el agua a una temperatura que se encuentre dentro del rango descrito anteriormente para disminuir la cantidad de calor suministrado al vapor en la caldera y así aumentar la eficiencia de la misma.

Para aumentar la temperatura al agua de alimentación se utiliza un intercambiador de calor conocido como economizador. El economizador es colocado en la línea de salida de los gases de combustión de la caldera posterior al precalentador de aire, con el fin de utilizar los gases de escape para elevarle la temperatura al agua de alimentación.

El agua circula dentro de una serie de tubos que poseen aletas para aumentar la transferencia de calor y los gases de escape atraviesan el economizador por la parte de afuera. En la figura #19 se muestra una sección de un economizador.

Figura #19. Sección de economizador



3.7. Supercalentador

El vapor que sale del domo superior es vapor saturado y debe llevarse al estado de vapor sobrecalentado. Este aumento de temperatura se lleva a cabo en el supercalentador.

El supercalentador es un intercambiador de calor en forma de serpentín que está ubicado estratégicamente en la trayectoria de los gases de combustión de mayor temperatura. Éste recibe vapor saturado del domo superior y envía vapor sobrecalentado hacia la salida general de la caldera.

El vapor que se dirige a molinos y turbogeneradores no puede ser saturado debido a que se corre el riesgo de que en la trayectoria de la caldera a estos el vapor se condense y forme gotas de agua, las cuales pueden ser destructivas debido a la alta presión que se maneja a la salida de la caldera.

3.8. Tiro forzado

Para mantener la combustión dentro de la caldera se requiere de grandes cantidades de aire, lo cual se logra utilizando ventiladores llamados de tiro forzado.

Los ventiladores de tiro forzado deben introducir aire a presión a través de toda la rejilla y así alimentar toda la cámara de combustión. Esto se realiza por medio de una cámara de distribución de aire que se encuentra debajo de la parrilla.

La cantidad de aire que se alimenta a través del tiro forzado se regula por medio de dampers y/o variadores de velocidad en función de la cantidad de combustible que va relacionada con la producción de vapor de la caldera.

3.9. Precalentadores de aire

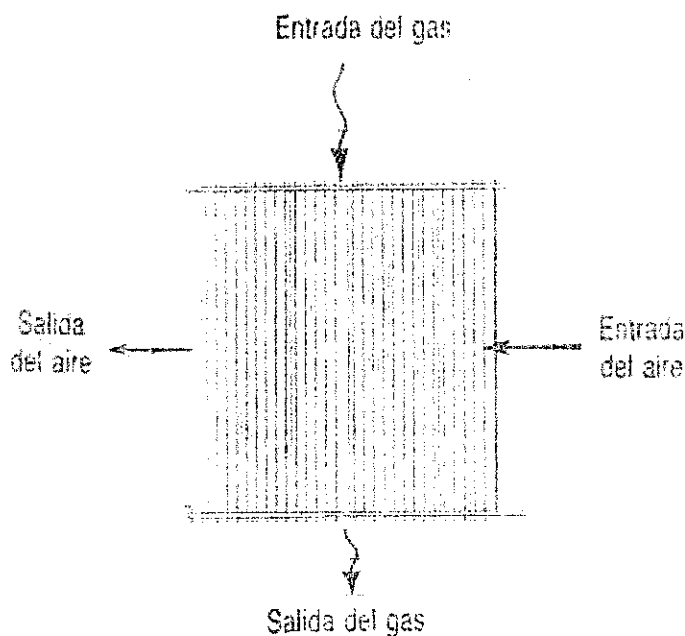
Al igual que los economizadores, los precalentadores de aire sirven para aumentar la eficiencia de la caldera. El calor que contiene los gases de escape es transferido al aire de alimentación y así aumentan la temperatura del aire para mantener las condiciones óptimas de temperatura para una combustión eficiente.

Los calentadores de aire son intercambiadores de calor del tipo gas a gas que pueden ser de dos tipos:

- Intercambiadores tubulares
- Intercambiadores de placas

En estos intercambiadores de calor los gases de escape circulan en el interior de los tubos o placas y el aire alrededor de estos. Ambos tipos de intercambiadores poseen aletas para incrementar la transferencia de calor. En la figura #20 se muestra un esquema de un precalentador de aire.

Figura #20. Precalentador de aire



3.10. Tiro inducido

Los gases de combustión salen de la caldera a través de la chimenea y estos son inducidos a salir por medio de ventiladores conocidos como de tiro inducido. Estos son colocados en la parte inferior de la chimenea.

La cantidad de gases de combustión que desaloja la caldera a través del tiro inducido debe ser regulada por medio de dampers y/o variadores de velocidad, según la cantidad de combustible y producción de vapor.

Los gases de combustión deben ser regulados ya que si estos desalojan la caldera a un flujo alto la eficiencia de la caldera disminuye debido a que los gases de combustión transfieren su calor al agua o vapor; por lo tanto, si desalojan muy rápido la caldera no se realiza la transferencia deseada. Por otro lado, si el flujo de los gases de combustión es lento, la caldera retiene una gran cantidad de gases, minimizando la cantidad de oxígeno en la caldera y así se reducen las condiciones óptimas para la combustión.

3.11. Ciclo de vapor

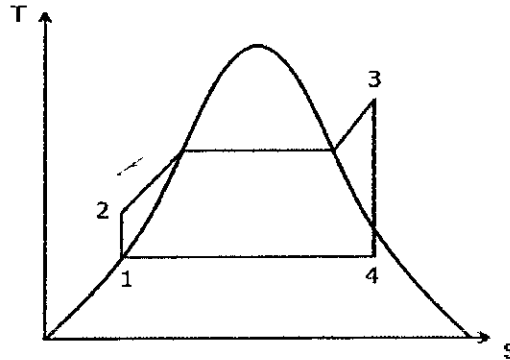
El Ciclo de Rankine es el que representa el ciclo de vapor en un Ingenio Azucarero, el cual consiste en cuatro partes:

1. Compresión en la bomba de alimentación (1-2).
2. Adición de calor en la caldera (2-3).
3. Expansión en las turbinas (3-4).

4. Rechazo de calor en el condensador (4-1).

En la figura #21 se muestra un diagrama de temperatura contra entalpía que representa al Ciclo Rankine.

Figura #21. Ciclo de Rankine



En el estado 1-2 se realiza la compresión en la bomba de alimentación a la caldera en donde se aumenta la presión hasta la presión de trabajo de la caldera y la temperatura tiene un leve aumento debido a una ligera disminución del volumen específico del agua.

En el estado 2-3 se le agrega calor al agua de alimentación en la caldera, en donde el agua entra como líquido comprimido (debido a la compresión en la bomba) y sale como vapor sobrecalentado después de haber pasado por todos los pasos descritos en secciones previas. Este proceso se lleva a cabo a presión constante.

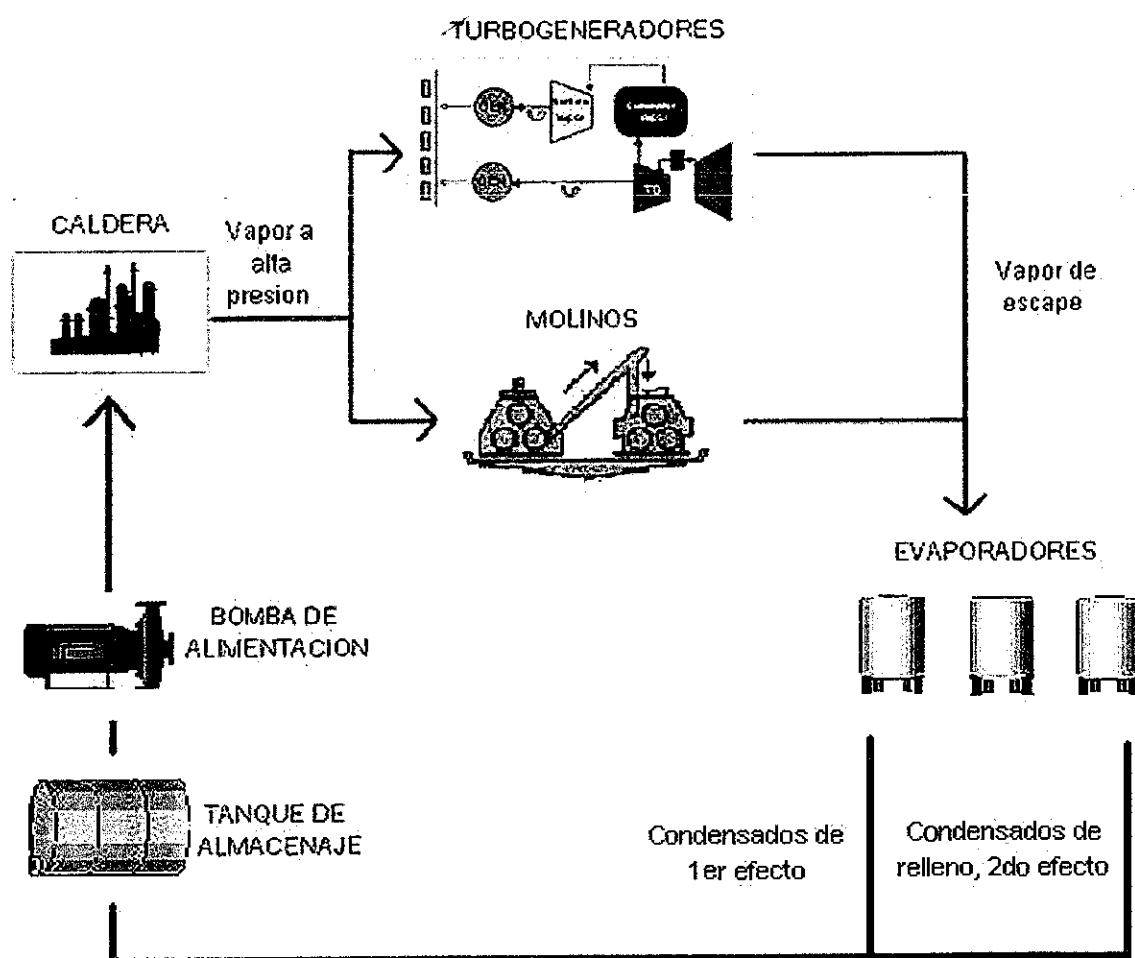
En el estado 3-4 se realiza la expansión en las turbinas tanto de los turbogeneradores como las de los molinos, en donde se produce trabajo y la presión y temperatura del vapor se reducen.

Por último, en el estado 4-1 el vapor se condensa dentro de la calandria del primer efecto de evaporadores, en donde el vapor sale como líquido saturado y se envía a los tanques de almacenamiento para luego ser bombeado de nuevo a la caldera.

Debido a que se realizan purgas de vapor, se debe alimentar agua de relleno a la caldera para reponer el vapor perdido durante la purga. El agua de relleno, por lo general, se utiliza del condensado del segundo efecto de evaporadores.

En la siguiente figura se visualiza el ciclo de vapor a través de un Ingenio Azucarero.

Figura #22. Ciclo del vapor de calderas



4. INTRODUCCIÓN A LA AUTOMATIZACIÓN

A lo largo de la historia el hombre siempre ha tratado de usar la tecnología para mejorar la productividad y aumentar la eficiencia en sus procesos y obtener así un beneficio propio. A medida que la era industrial se desarrolla, la tecnología ha ido creciendo; ya que al principio de la revolución industrial sólo se utilizaban instrumentos simples como manómetros, termómetros, válvulas manuales, etc., que se debía en parte a la simplicidad de los procesos. Sin embargo, en la medida en la que el grado de dificultad de controlar procesos se ha incrementado, se ha hecho necesaria la automatización completa.

4.1. Definición de automatización.

La automatización es un sistema integrado que provee los medios para controlar los procesos de producción y así hacerlos más eficientes y seguros. El control de procesos asegura que un producto cumpla con estándares de calidad y minimiza los riesgos de producir productos defectuosos o de baja calidad.

4.1.1. Objetivos de la automatización.

- Mejorar la productividad de una empresa, reduciendo costos y mejorando la calidad de la misma.
- Optimización de procesos industriales.
- Mejorar las condiciones de trabajo del personal, eliminando los trabajos pesados y aumentando la seguridad.

- Reducir tiempos de producción.
- Realizar operaciones complicadas con un alto grado de dificultad.
- Reducir la posibilidad de error humano.
- Integrar la gestión y producción.

4.2. Definición del proceso

Un proceso industrial se define como el medio por el cual se transforman las materias primas en productos terminados o finales. Esta transformación lleva una secuencia de cambios que pueden ocurrir tanto en la composición física como química de una sustancia en donde se requiere de transferencia de energía e incluye parámetros tales como temperatura, flujo, nivel, presión, densidad, volumen, acidez, gravedad específica, pH, entre muchos más. Estos parámetros son conocidos como variables de proceso, las cuales afectan las entradas y salidas de un proceso.

Los sistemas de procesos se pueden dividir en sistemas cerrados y sistemas abiertos. En un sistema cerrado el fluido de trabajo permanece en el sistema, así como por ejemplo el ciclo de vapor en un Ingenio Azucarero. Por otro lado, en los sistemas abiertos el fluido de trabajo abandona el sistema, así como por ejemplo los gases de combustión dentro de una caldera, los cuales transfieren su calor al fluido de trabajo y luego estos salen de la caldera.

4.3. Control de procesos

Para controlar un proceso se deben llevar a cabo una serie de acciones en las variables de proceso descritas anteriormente: medición, decisión y acción; las cuales son partes esenciales de un circuito que hace posible el control automático de procesos llamado lazo de control.

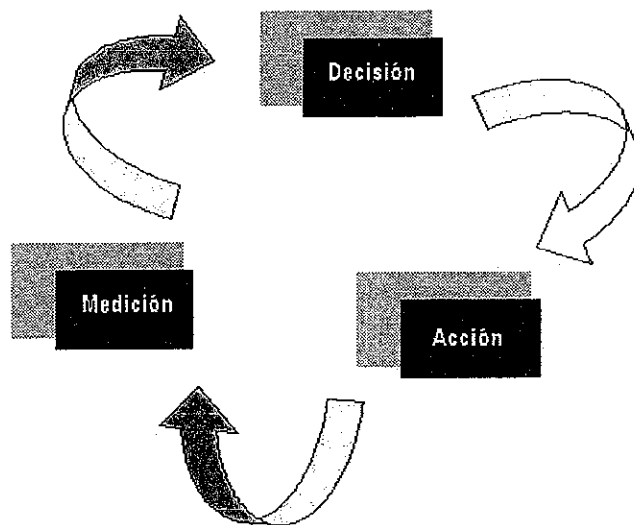
Cada parte del lazo de control consta de un elemento o instrumento que es el que realiza la acción indicada; estos se describen a continuación:

4.3.1. Medición. La medición de la variable a ser controlada es el primer paso del lazo de control y es hecha por el sensor y transmitida al controlador por medio de un transmisor.

4.3.2. Decisión. Basada en la medición, el controlador debe decidir qué hacer para mantener la variable en el valor deseado.

4.3.3. Acción. Como resultado de la decisión del controlador, el sistema debe tomar una acción, que es implementada por el elemento final de control y así se cierra el lazo de control.

Figura #23. Lazo de control

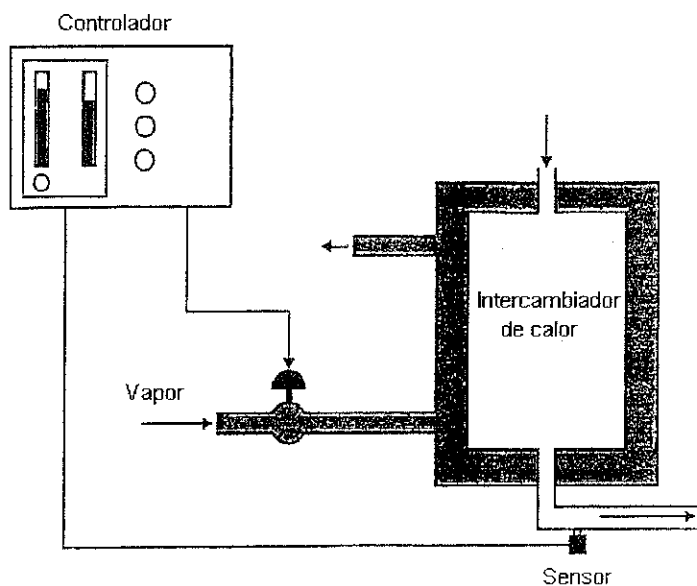


4.4. Tipos de lazo de control

4.4.1. Circuito abierto. Poco común, solamente obtiene información sobre el sistema, obteniéndose poco control sobre él. Se utiliza generalmente en sistemas que necesitan poco control.

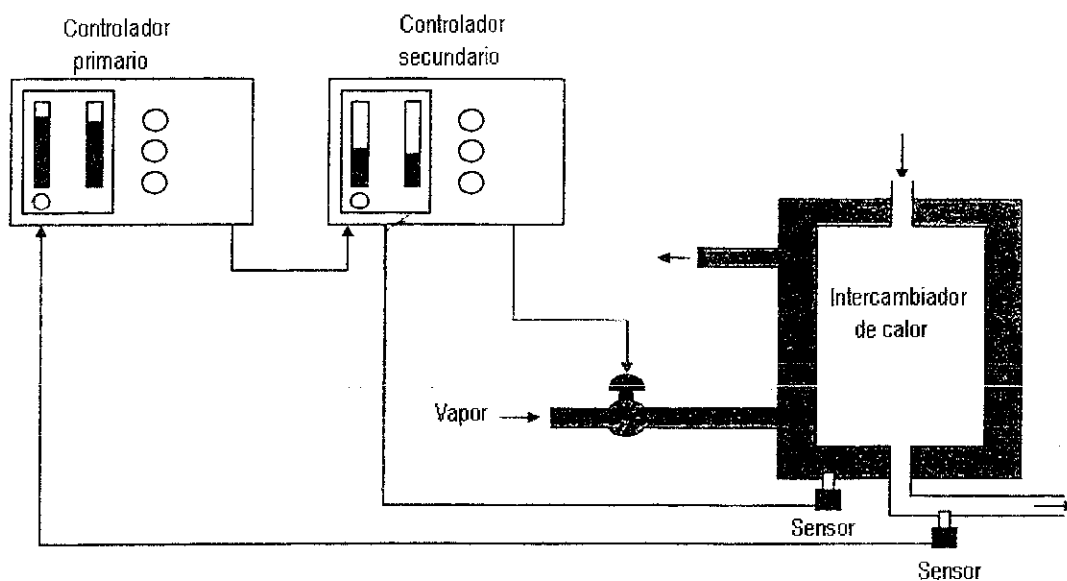
4.4.2. Retroalimentación. Este es el lazo de control más utilizado, en el cual la variable de un sistema es monitoreada por un sensor, el cual provee la información al controlador. En el controlador se compara la variable controlada con el punto de control (set point, SP) y se determina el valor de la señal de error y, basado en ésta, transmite una señal al elemento final de control para cambiar el valor de la variable manipulada. El nuevo valor de la variable controlada es monitoreado continuamente por el sensor, cuya señal es alimentada al sistema de control para completar el lazo de retroalimentación. De esta forma el sistema mantiene la variable controlada dentro de límites aceptables. En la figura #24 se muestra un intercambiador de calor controlado por un lazo de control de retroalimentación.

Figura #24. Lazo de retroalimentación



4.4.3. Cascada. El lazo de control en cascada se utiliza en procesos más precisos. Aquí se monitorea una segunda variable adicional a la variable primaria de control. Para visualizar mejor este lazo se toma el ejemplo de un intercambiador de calor que se muestra en la figura #25.

Figura #25. Lazo de cascada



En el intercambiador de calor la presión refleja fluctuaciones en el proceso más rápidas que las que refleja la temperatura del fluido de trabajo. El lazo en cascada involucra la instalación de un segundo lazo de retroalimentación, el cual, basado en la presión, es llamado lazo de retroalimentación secundario.

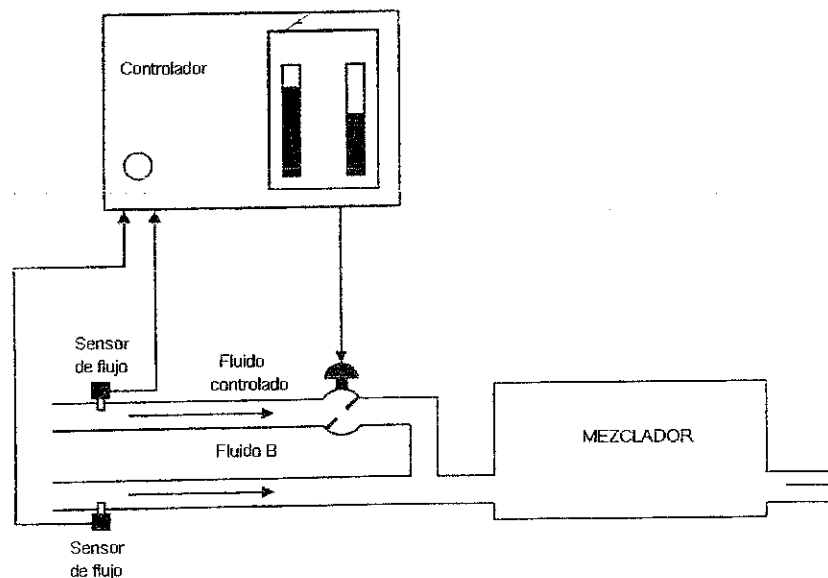
El lazo primario que sigue basado en la temperatura del fluido de trabajo ya no posiciona la válvula de vapor sino que la salida del controlador primario se utiliza para ajustar el punto de control del segundo controlador. El segundo controlador posiciona la válvula de vapor, generando así un sistema de control más preciso.

4.4.4. Control de relación. En muchos procesos industriales se requiere mezclar dos tipos de materiales por medio de una relación, por ejemplo, por cada dos partes de material A se necesita una parte de material B.

El lazo de relación controla ambos fluidos en el caso que sean dos materiales, pero únicamente se toma la acción en uno de los fluidos para mantener la relación establecida, el cual es llamado fluido controlado.

En el lazo de control de relación se coloca un sensor de flujo por cada fluido, los cuales llevan la señal al controlador con su respectiva relación de flujo. El controlador compara esta relación con el punto de control y envía una señal al elemento final de control para aumentar o disminuir el caudal del fluido controlado. En la figura #26 se muestra un lazo de control de relación.

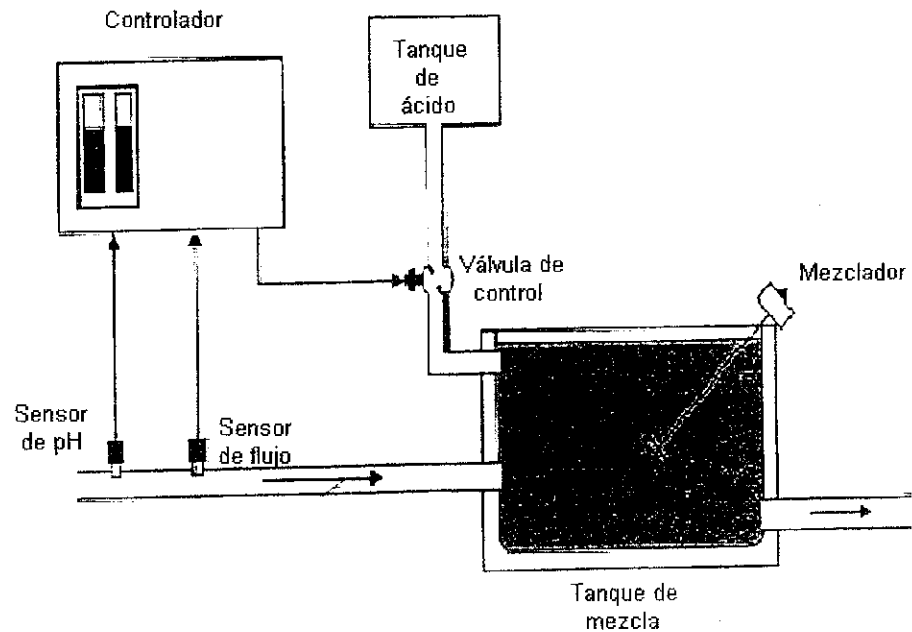
Figura #26. Lazo de relación



4.4.5. Control adelantado. El lazo de control adelantado mide y ajusta la variable en la entrada del proceso para que los errores no sean detectados dentro o después del mismo. De hecho, la acción correctiva se realiza antes de que ocurra un error dentro del proceso.

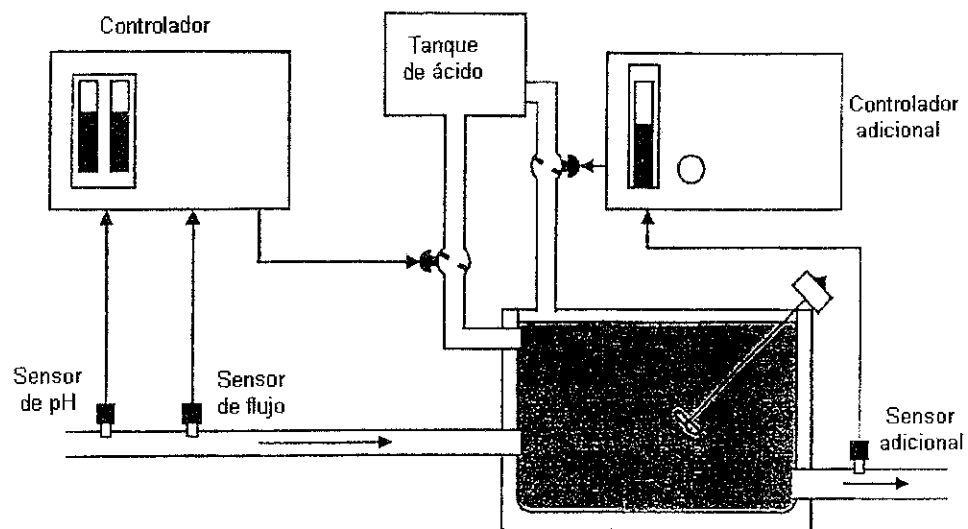
La desventaja de este lazo es que no se tiene una retroalimentación de la salida del proceso dentro del sistema de control. En la figura #27 se muestra un ejemplo de medición de pH por medio de un lazo de control adelantado.

Figura #27. Control adelantado



4.4.6. Control adelantado retroalimentado. En este método se agrega otro sensor a la salida del proceso que envía una señal a otro controlador para controlar y retroalimentar el proceso. En la figura #28 se muestra un lazo de control adelantado retroalimentado.

Figura #28. Control adelantado retroalimentado



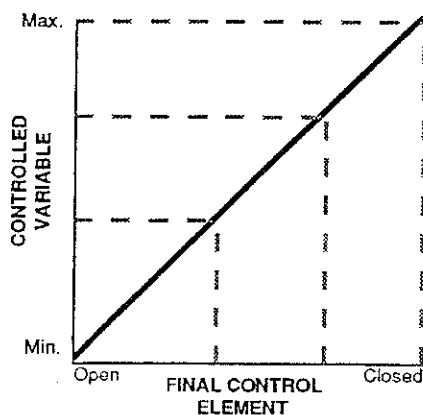
4.5. Modos de control de procesos

Existen dos modos de control de procesos, digitales y análogos, los cuales se describen a continuación.

4.5.1. Control digital. Este control también es conocido como de dos posiciones, todo o nada, discreto o ON-OFF. Este es el modo de control más simple en donde la señal al elemento final de control es el cero por ciento o el 100 por ciento. El elemento final de control se encuentra o totalmente abierto o totalmente cerrado; este tipo de modo no se puede utilizar para regulación de procesos, únicamente en procesos de encendido y apagado por ejemplo, el funcionamiento de un aire acondicionado.

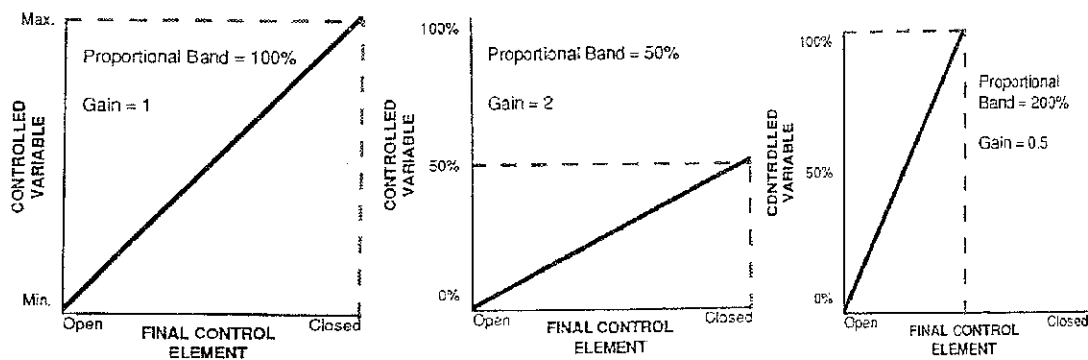
4.5.2. Control análogo. Para muchos procesos un control de dos posiciones no provee el control adecuado, en donde un control análogo provee las soluciones para dichos procesos y es utilizado para procesos continuos. En el control análogo el elemento final de control puede ser regulado en cualquier posición. Existen tres tipos de control análogo: proporcional, integral y derivativo.

4.5.2.1. Control proporcional. Este tipo de control se utiliza en procesos en donde el valor de la variable controlada cambia constantemente en respuesta a las perturbaciones del proceso. Por lo tanto, existe una relación lineal continua entre el valor de la variable controlada y la posición del elemento final de control, así como se muestra en la figura #29.

Figura #29. Control proporcional

En la mayoría de los casos el control proporcional debe ser ajustado. Este ajuste se realiza cambiando el ancho o porcentaje de la banda proporcional o también la ganancia proporcional.

- Banda proporcional: Cantidad de cambio de entrada necesario para proveer un rango total en el cambio de salida. La banda proporcional se representa en forma de porcentaje.
- Ganancia proporcional: Relación entre el cambio de salida y el cambio de entrada.

Figura #30. Banda proporcional

En el primer ejemplo se representa una banda proporcional del 100% y una ganancia de 1. En esta aplicación el elemento final de control está completamente cerrado cuando la variable controlada está al máximo.

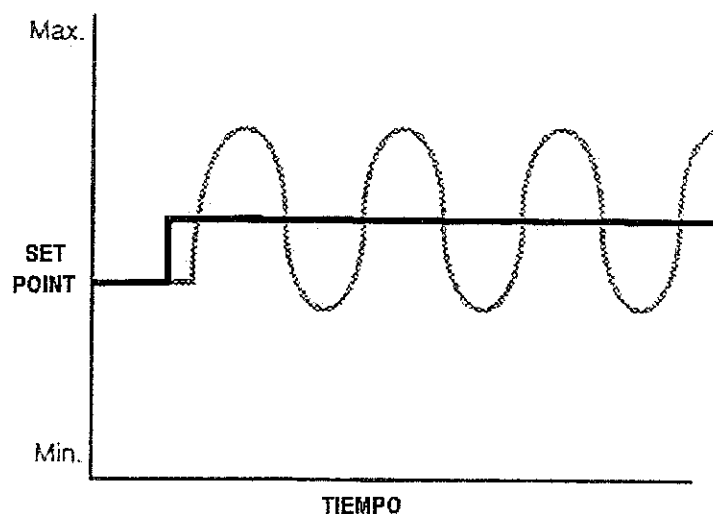
En el segundo ejemplo se representa una banda proporcional del 50% y una ganancia de 2. En esta aplicación, cuando la entrada se encuentra a la mitad, el elemento final de control se encuentra completamente cerrado.

En el tercer ejemplo se representa una banda proporcional del 200% y una ganancia de 0.5. En esta aplicación el elemento final de control está abierto un 50% cuando la variable controlada está al 100%.

Una banda proporcional ancha o una ganancia baja corresponde a una respuesta poco sensible. Una banda proporcional estrecha o una ganancia alta corresponde a una respuesta más sensible. La determinación de una banda proporcional óptima en un proceso por lo general se realiza por prueba y error observando los cambios cuidadosamente.

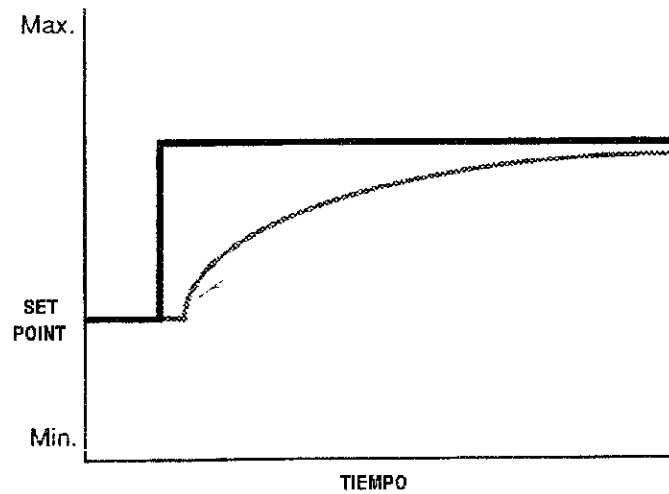
En la figura #31 se muestra el efecto de una banda proporcional estrecha, en donde un cambio relativamente pequeño en el punto de control resulta en un cambio significativo en la salida, causando un efecto oscilante similar al de dos posiciones.

Figura #31. Efecto de banda proporcional estrecha



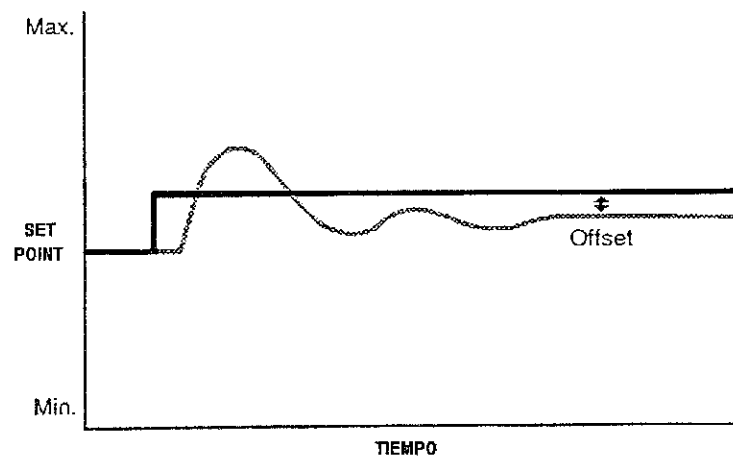
En la figura #32 se muestra el efecto de una banda proporcional ancha, en donde un gran cambio en la entrada produce un cambio pequeño en la salida, creando que la acción de control se realice en un amplio intervalo de tiempo.

Figura #32. Efecto de banda proporcional ancha



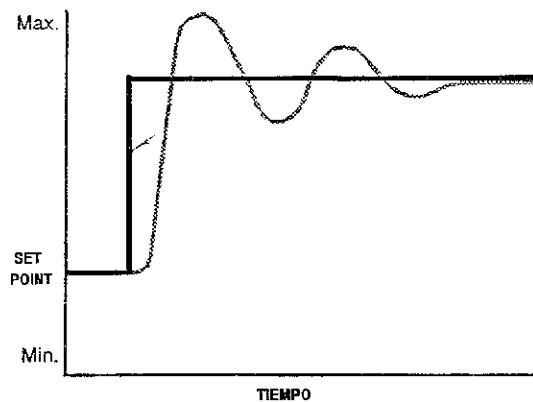
Cuando un proceso alcanza un estado constante existe una diferencia entre el punto de control y el valor de la variable. El término usado para expresar la diferencia entre el punto de control y el valor de la variable de proceso se conoce como offset.

Figura #33. Offset



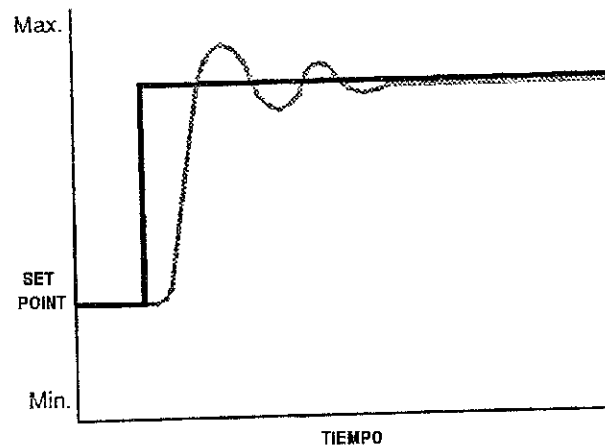
4.5.2.2. Control integral. Los controladores proporcionales usualmente poseen una segunda acción de control designada para eliminar el offset, llamada acción integral. La acción integral provee salidas al elemento final de control hasta que el proceso regresa al punto de control. Cuando el control proporcional se combina con el control integral se llama control PI. En la figura #34 se muestra el efecto de corrección del offset que provee el control integral.

Figura #34. Control integral



4.5.2.3. Control derivativo. El control proporcional e integral también se pueden combinar con un control derivativo que se llama control PID. La acción derivativa crea un control que responde rápidamente a variaciones en el proceso, por lo tanto provee un control con tiempos de respuesta altos. En la figura #35 se muestra el efecto de disminución del tiempo de respuesta que provee el control derivativo.

Figura #33. Control derivativo



4.6. Sensores y transmisores

Los sensores también son conocidos como elementos primarios y están en contacto con la variable y utilizan o absorben energía del medio controlado para dar al sistema de medición una indicación en respuesta a la variación de la variable controlada.

Los transmisores son instrumentos que captan la variable de proceso a través del elemento primario y la transmiten a distancia en forma de señal neumática, electrónica, hidráulica o telemétrica hacia el controlador. Las señales más utilizadas son las neumáticas y las electrónicas las cuales oscilan en un rango de 3 a 15 psi y 4 a 20 mA respectivamente. Los transmisores pueden o no formar parte integral del elemento primario.

A continuación se describen los instrumentos para medición y transmisión de la variable de proceso de acuerdo al tipo de medición efectuada.

4.6.1. Temperatura

4.6.1.1. Termómetros de vidrio. Éste consta de un depósito de vidrio que contiene por ejemplo, mercurio y que al calentarse se expande y sube en el tubo capilar. A continuación se muestra en el cuadro #3 los rangos de trabajo dependiendo del fluido empleado:

Cuadro #3. Rango de trabajo en termómetros de vidrio

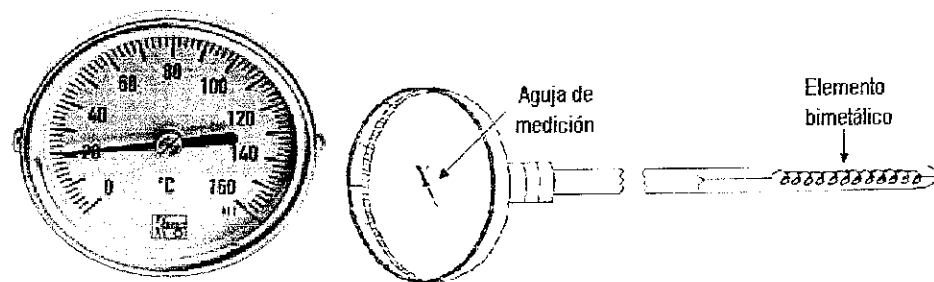
FLUIDO	RANGO DE TEMPERATURA
Mercurio	-35 a +280°C
Mercurio (tubo capilar lleno de gas)	-35 a +450°C
Pentano	-200 a +20°C

Alcohol	-110 a + 50°C
Tolueno	-70 a +100°C

4.6.1.2. Termómetros bimetálicos. Estos funcionan por la diferencia de coeficiente de dilatación de dos láminas de metales diferentes. Estas láminas bimetálicas están laminadas conjuntamente y pueden ser rectas, curvas, en forma de espiral o hélice.

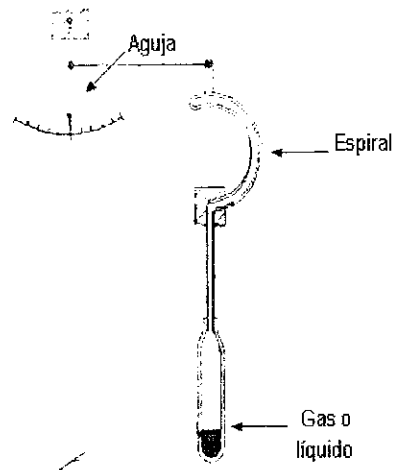
Este tipo de termómetro contiene pocas partes móviles, únicamente la aguja, que está sujeta al elemento bimetálico, y el mismo elemento bimetálico. La precisión del instrumento es de $\pm 1\%$ y su campo de medida de -200 a +500°C.

Figura #36. Termómetro bimetálico



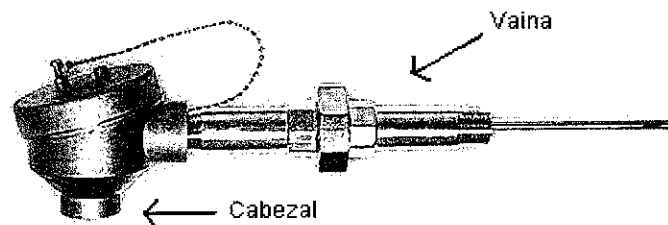
4.6.1.3. Termómetros de bulbo y capilar. Consisten en un bulbo conectado por un capilar a una espiral. Cuando la temperatura del bulbo cambia, el gas o líquido en el bulbo se expande y la espiral tiende a desenrollarse moviendo la aguja sobre la escala para indicar la elevación de la temperatura en el bulbo. Existen cuatro clases de este tipo de termómetros:

- Clase I: Termómetros actuados por líquido.
- Clase II: Termómetros actuados por vapor.
- Clase III: Termómetros actuados por gas.
- Clase IV: Termómetros actuados por mercurio.

Figura #37. Termómetro de bulbo y capilar

4.6.1.4. Termocoplas. Las termocoplas también son conocidas como termopares, las cuales se forman con dos alambres de distinto material unidos en un extremo (soldados generalmente). Al aplicar temperatura en la unión de los metales se genera un voltaje, del orden de los milivoltios, continuo y proporcional a la temperatura de medición.

Normalmente las termocoplas están encapsuladas dentro de un tubo de acero inoxidable u otro material (vaina), en un extremo está la unión y en el otro el terminal eléctrico de los cables protegido adentro de una caja redonda de aluminio (cabezal).

Figura #38. Termocopia.

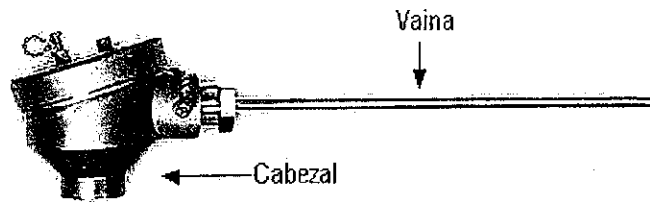
Existen una gran cantidad de termocoplas pero las más utilizadas son las de tipo T, J, K, R y S. En el cuadro #4 se explican los diferentes tipos.

Cuadro #4. Tipos de termocoplas

TIPO	MATERIALES	DESCRIPCIÓN
Tipo T	Cobre – Constantán	Elevada resistencia a la corrosión por humedad atmosférica o condensación y puede utilizarse en atmósferas oxidantes o reductoras. Rango de temperaturas -200 a +260°C
Tipo J	Hierro– Constantán	Adecuada en atmósferas con escaso oxígeno libre. La oxidación del hilo de hierro aumenta rápidamente por encima de 550°C, siendo necesario un mayor diámetro del hilo hasta una temperatura límite de 750°C.
Tipo K	Cromel - Alumel	Se recomienda en atmósferas oxidantes y a temperaturas de trabajo entre 500 y 1000°C. No debe de ser utilizado en atmósferas reductoras ni sulfurosas al menos que esté protegido con un tubo de protección.
Tipo R y S	Pt/Rh – Pt/Rh	Se emplean en atmósferas oxidantes y temperaturas de trabajo de hasta 1500°C.

4.6.1.5. Termómetros de resistencia (RTD). La medición de temperatura se realiza utilizando sondas de resistencia, las cuales varían su resistencia en función de la temperatura. Esta variación está en relación a las características propias del elemento de detección. El elemento consiste usualmente en un arrollamiento de hilo muy fino del conductor adecuado bobinado entre capas de material aislante y protegido con un revestimiento de vidrio o de cerámica.

Figura #39. RTD



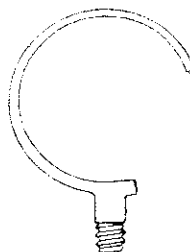
4.6.1.6. Pirómetros de radiación. Estos miden la temperatura de un cuerpo a distancia en función de su radiación. Los instrumentos que miden la temperatura de un cuerpo en función de la radiación luminosa que éste emite, se denominan pirómetros ópticos y los que miden la temperatura captando toda o una gran parte de la radiación emitida por el cuerpo se llaman pirómetros de radiación total.

4.6.2. Presión

4.6.2.1. Elementos de medida directa. Miden la presión comparándola con la ejercida por un líquido de densidad y altura conocida, por ejemplo: barómetro, manómetro de tubo en U, manómetro de tubo inclinado, etc.

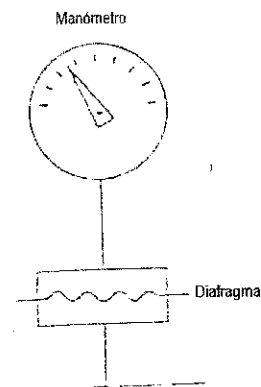
4.6.2.2. Elemento elástico. Estos se deforman por la presión interna del fluido que contienen, existen varios tipos y entre los más utilizados están los siguientes:

4.6.2.3. Tubo Bourdon. Tubo de sección elíptica que forma un anillo casi completo, cerrado por un extremo. Al aumentar la presión interior del tubo, esta tiende a enderezarse y el movimiento es transmitido a la aguja indicadora, por un sector dentado y un piñón. Los materiales empleados en este tubo son acero inoxidable, aleación de cobre o aleaciones especiales como hastelloy y monel.

Figura #40. Tubo Bourdon

4.6.2.4. Elemento en espiral y helicoidal. Se forma enrollando el tubo Bourdon en forma de espiral alrededor de un eje común, y el helicoidal enrollando más de una espiral en forma de hélice. Estos elementos proporcionan un desplazamiento grande del extremo libre y por ello son ideales para registradores.

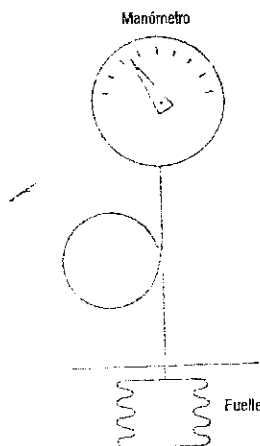
4.6.2.5. Diafragma. Consiste en una o varias cápsulas circulares conectadas rígidamente entre sí por soldadura, de forma que al aplicar presión, cada cápsula se deforma y la suma de los pequeños desplazamientos es amplificada por un juego de palancas. El material del diafragma es normalmente aleación de níquel o incoel y se utiliza para pequeñas presiones.

Figura #41. Diafragma

4.6.2.6. Fuelle. El fuelle es parecido al diafragma, pero de una sola pieza flexible axialmente, y puede dilatarse o contraerse con un

desplazamiento considerable. El material empleado para el fuelle es usualmente bronce fosforoso y se emplea en presiones pequeñas. Su vida útil es mayor que la del diafragma.

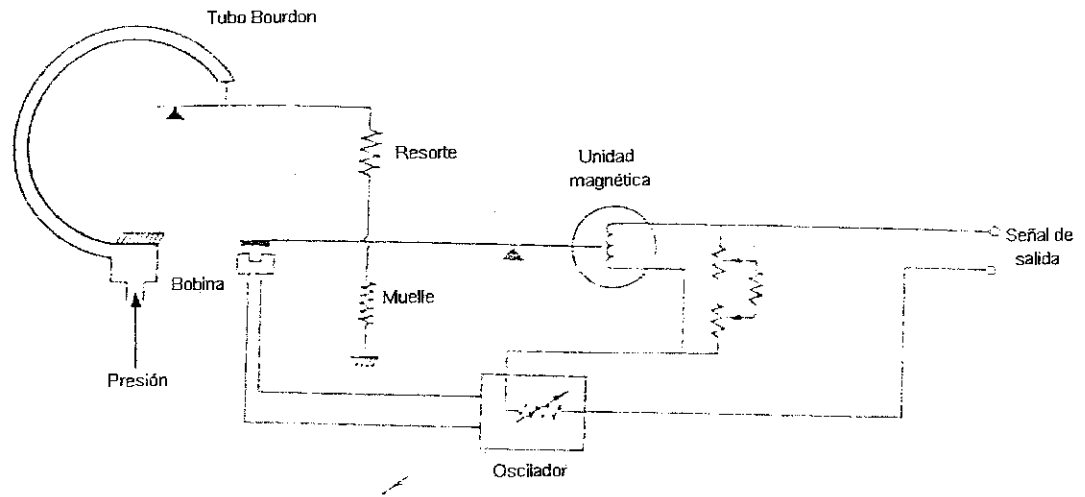
Figura #42. Fuelle



4.6.2.7. Transmisor electrónico de equilibrio de fuerzas. Este instrumento consta de una barra rígida apoyada en un punto en sobre el cuál actúan dos fuerzas en equilibrio: la fuerza ejercida por el elemento de medición y la fuerza electromagnética de una unidad magnética.

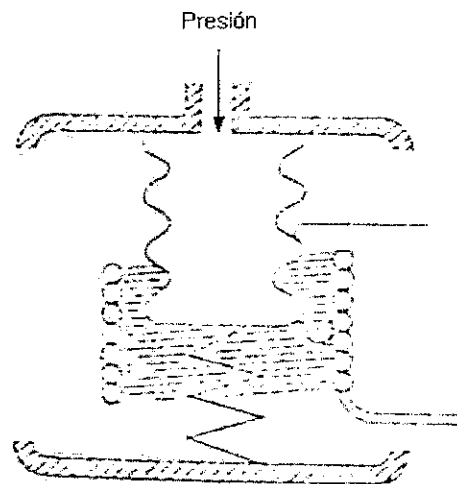
El elemento mecánico de medición (tubo Bourdon, espiral, fuelle, etc.) ejerce una fuerza sobre la barra rígida del transmisor. Por cada valor de la presión, la barra adopta una posición determinada excitándose un transductor de desplazamiento y un circuito oscilador alimenta una unidad magnética que reposiciona la barra de equilibrio de fuerzas. Se completa así un circuito variando la corriente de salida en forma proporcional al intervalo de presiones del proceso.

Figura #43. Transmisor de equilibrio de fuerzas



4.6.2.8. Transductores resistivos. Son los transmisores eléctricos más sencillos. Consisten en un elemento elástico que varía la resistencia óhmica de un potenciómetro en función de la presión.

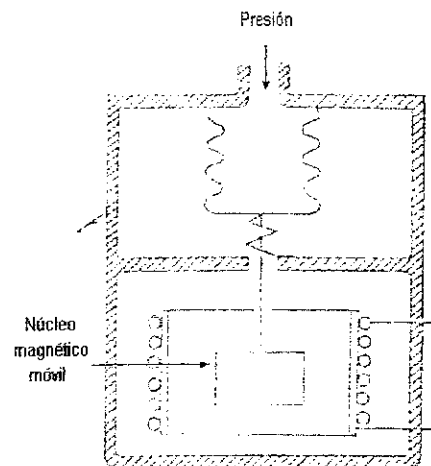
Figura #44. Transductor resistivo



4.6.2.9. Transductores magnéticos. Estos se clasifican en dos grupos según su funcionamiento:

4.6.2.9.1. Transductores de inductancia variable. Estos poseen un núcleo magnético móvil en el cual su desplazamiento dentro de una bobina aumenta la inductancia de ésta en forma proporcional a la porción metálica del núcleo contenida dentro de la bobina.

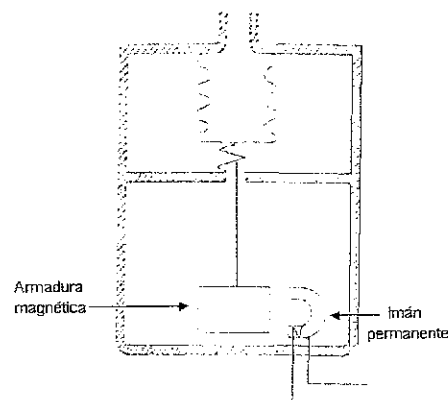
Figura #45. Transductor de inductancia variable



4.6.2.9.2. Transductores de reluctancia variable.

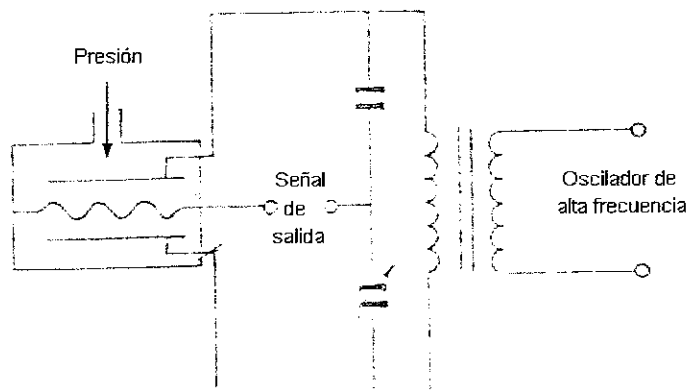
Consisten en un imán permanente o un electroimán que crea un campo magnético dentro del cual se mueve una armadura de material magnético. El circuito magnético se alimenta con una fuerza magnetomotriz constante con lo cual al cambiar la posición de la armadura varía la reluctancia y por lo tanto el flujo magnético. Esta variación de flujo da lugar a una corriente inducida en la bobina proporcional al grado de desplazamiento de la armadura móvil.

Figura #46. Transductor de reluctancia variable



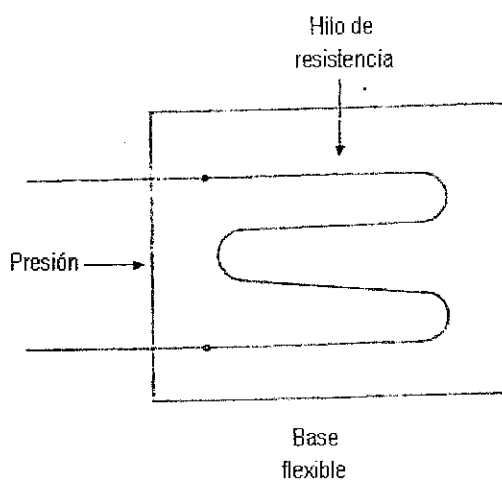
4.6.2.10. Transductores capacitivos. Se basan en la variación de capacidad que se produce en un capacitor al desplazarse una de sus placas por la aplicación de presión. La placa móvil tiene forma de diafragma y se encuentra situada entre dos placas fijas.

Figura #47. Transductor capacitivo



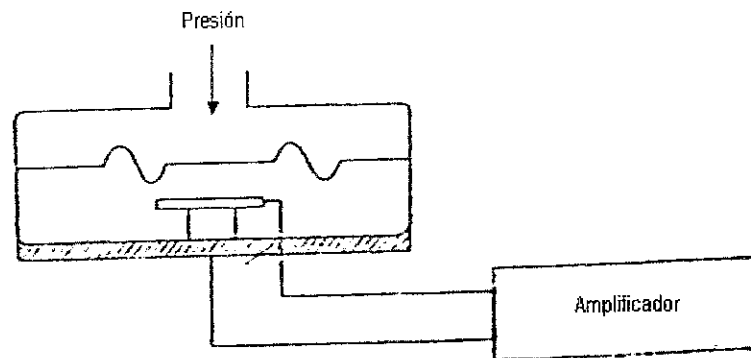
4.6.2.11. Galgas extensométricas. Se basan en la variación de longitud y diámetro, por lo tanto de resistencia, que tienen lugar cuando un hilo de resistencia se encuentra sometido a una tensión mecánica por la acción de una presión. La aplicación de presión estira o comprime los hilos modificando la resistencia de los mismos.

Figura #48. Galgas extensiométricas



4.6.2.12. Transductores piezoeléctricos. Los elementos piezoeléctricos son materiales cristalinos que al deformarse físicamente por la acción presión, generan una señal eléctrica. Dos materiales típicos en este tipo de transductores son el cuarzo y el titanio de bario.

Figura #49. Transductor piezoeléctrico



4.6.3. Caudal

4.6.3.1. Medidores volumétricos

4.6.3.1.1. Presión diferencial

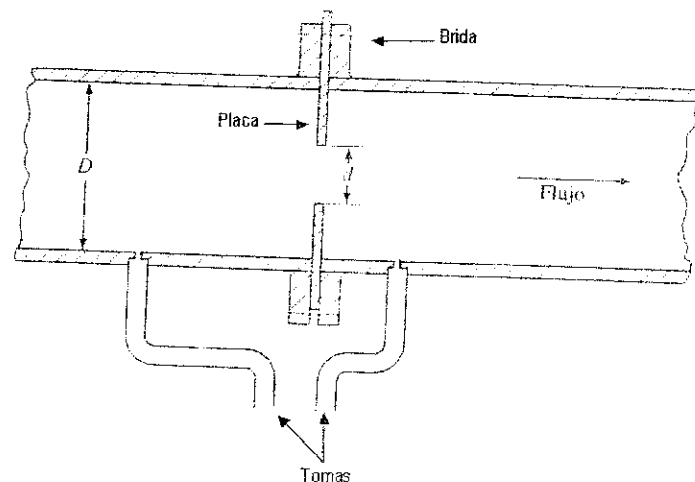
4.6.3.1.1.1. Placa – Orificio o diafragma. Consiste en una placa perforada instalada en la tubería. Dos tomas conectadas en la parte anterior y posterior de la placa, captan esta presión diferencial la cual es proporcional al cuadrado del caudal.

Las tomas pueden estar situadas en tres configuraciones:

- En la brida: Es bastante utilizada porque su instalación es cómoda ya que las tomas están taladradas en las bridas que soportan la placa y situadas a 1" de distancia de la misma.

- En la vena contraída: La toma posterior está situada en un punto donde la vena alcanza su diámetro más pequeño, lo cual depende de la razón de diámetros y se presenta aproximadamente a $\frac{1}{2} \text{Ø}$ de la tubería. La toma anterior se sitúa a 1Ø de la tubería.
- En la cámara anular: Las tomas están situadas inmediatamente antes y después del diafragma y requieren el empleo de una cámara anular.
- En la tubería: Las tomas anterior y posterior están situadas a $2\frac{1}{2} \text{Ø}$ y 8Ø respectivamente. Se emplean cuando se desea aumentar el intervalo de medida de un medidor de caudal dado. La posición de las tomas está en un lugar menos sensible a la medida.

Figura #50. Placa-orificio

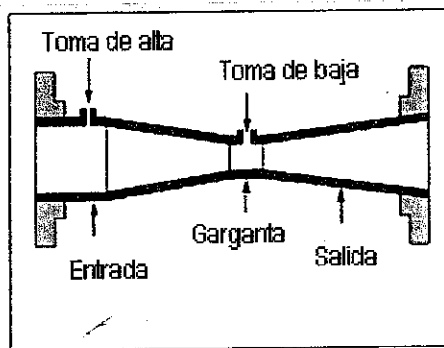


4.6.3.1.1.2. **Tobera.** Está situada en la tubería con dos tomas, una anterior y otra en el centro de la sección más pequeña. La tobera permite caudales 60% superiores a los de placa-orificio en las mismas condiciones de servicio. Su pérdida de carga es de 30 a 80% de la presión diferencial. Puede emplearse para fluidos que arrastren sólidos en pequeña cantidad.

4.6.3.1.1.3. **Tubo Venturi.** El flujo de una tubería se acelera a través de una sección más angosta llamada garganta, en donde disminuye la presión del fluido disminuye. Se colocan dos tomas, una en la sección

anterior al Venturi y otra en la garganta en donde se capta la diferencia de presiones que es proporcional al cuadrado del caudal.

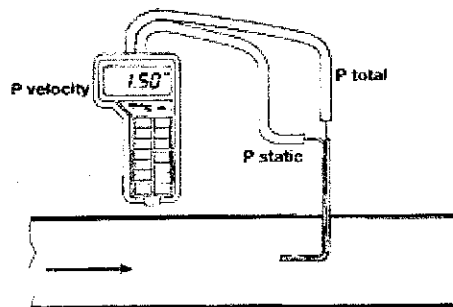
Figura #51. Tubo Venturi



Permite la medición de caudales 60% mayores a los de la placa de orificio en las mismas condiciones de servicio y con una pérdida de carga de sólo 10 a 20% de la presión diferencial. Posee una gran precisión y permite el paso de fluidos con un porcentaje relativamente alto de sólidos.

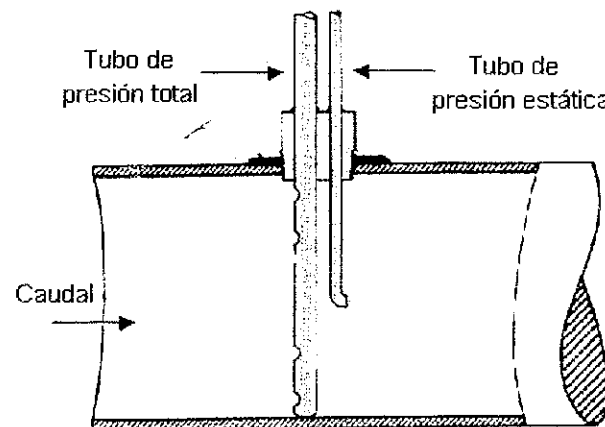
4.6.3.1.1.4. Tubo Pitot. El tubo Pitot mide la diferencia entre la cual es proporcional al cuadrado de la velocidad. Éste es sensible a las variaciones en la distribución de velocidades en la sección de la tubería, de aquí que en su empleo es esencial que el flujo sea laminar disponiéndolo en un tramo recto de la tubería. Su precisión es baja y se emplea normalmente para la medición de grandes caudales de fluidos limpios con una baja pérdida de carga.

Figura #52. Tubo Pitot



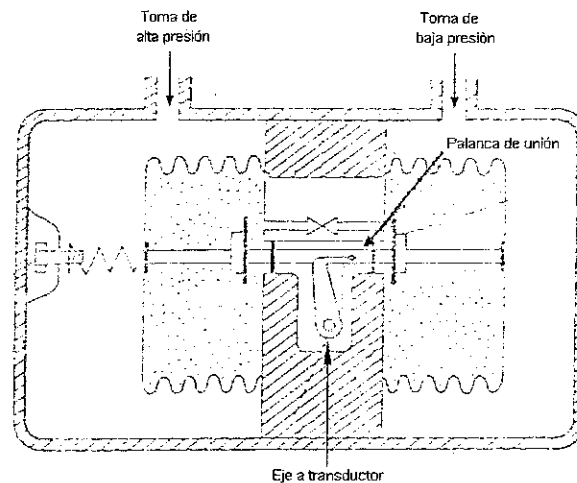
4.6.3.1.1.5. Tubo Annubar. Éste es una innovación del tubo de Pitot y consta de dos tubos, el de presión total y el de presión estática. El tubo que mide la presión total está situado a lo largo de un diámetro transversal de la tubería y consta de varios orificios de posición crítica que cubren cada uno la presión total en un anillo de área transversal de la tubería. El tubo que mide la presión estática se encuentra detrás del de presión total con su orificio en el centro de la tubería aguas abajo de la misma.

Figura #53. Tubo Annubar



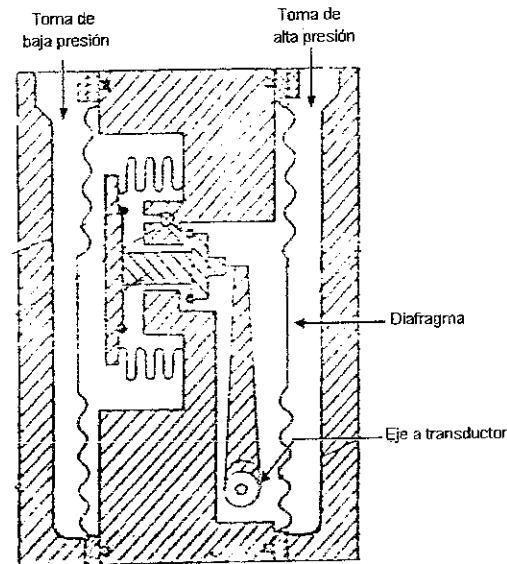
4.6.3.1.1.6. Transmisores de fuelle. Éste contiene dos cámaras para la alta y baja presión. La alta presión comprime el fuelle correspondiente, arrastrando la palanca de unión, el cable y un eje exterior, cuyo movimiento actúa sobre el transductor ya sea neumático o eléctrico.

Figura #54. Transmisor de fuelle



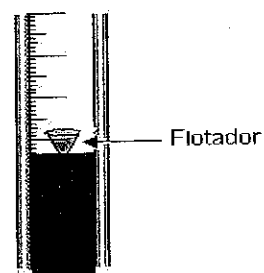
4.6.3.1.1.7. Transmisores de diafragma. A diferencia con el de fuelle es que la separación entre las dos cámaras se efectúa mediante diafragmas, en lugar de fuelles.

Figura #55. Transductor de diafragma



4.6.3.1.2. Área variable (Rotámetros). Son medidores de caudal de área variable en los cuales un flotador cambia su posición dentro de un tubo, proporcionalmente al flujo del fluido. Los tubos empleados en los rotámetros pueden ser de vidrio o metálicos.

Figura #56. Rotámetros

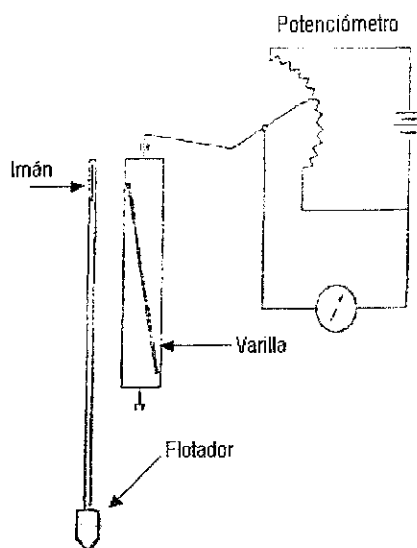


4.6.3.1.2.1. Transmisores neumáticos. Los transmisores neumáticos acoplados al rotámetro consisten en una leva que sigue magnéticamente el movimiento del flotador y que se encuentra situada entre dos toberas neumáticas.

4.6.3.1.2.2. Transmisores eléctricos. Los transductores eléctricos acoplados a rotámetros pueden ser de dos tipos:

4.6.3.1.2.2.1. Potenciométrico. Consiste en una varilla que sigue magnéticamente el movimiento del flotador dentro del tubo y mueve el brazo del potenciómetro. Este circuito da como resultado una tensión alta de salida proporcional a la posición del flotador.

Figura #57. Potenciómetro



4.6.3.1.2.2.2. Puente de impedancia. Consiste en un mecanismo de indicación actuado magnéticamente, un transformador diferencial de y un convertidor. Al variar el caudal, un imán montado en el flotador hace girar un mecanismo magnético de posición con el cual gira una leva que se introduce dentro del arrollamiento activo de un transformador diferencial a medida que gira. La señal de salida del transformador es proporcional al caudal y

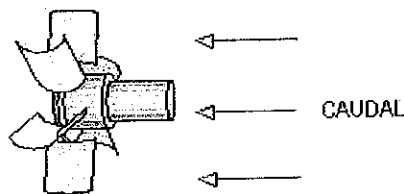
luego pasa a un convertidor en donde es transformada en una señal de corriente continua constante.

4.6.3.1.3. Velocidad

4.6.3.1.3.1. Vertederos. Para la medición del caudal en canales abiertos se utilizan vertederos de formas variadas que provocan una diferencia de alturas del líquido en el canal entre la zona anterior del vertedero y su punto más bajo. El vertedero debe formar un ángulo recto con la dirección del caudal y el canal aguas arriba debe ser recto como mínimo en una distancia de 10 veces la anchura. La diferencia de alturas debe medirse en un punto aguas arriba lo suficientemente alejado como para no ser influido por la curva de bajada de la superficie del agua.

4.6.3.1.3.2. Turbinas. Consisten en un rotor que gira al paso del fluido con una velocidad directamente proporcional al caudal. Existen dos tipos de convertidores para captar la velocidad de la turbina, tipo reluctancia e inductivo.

Figura #58. Medidor de caudal de turbina

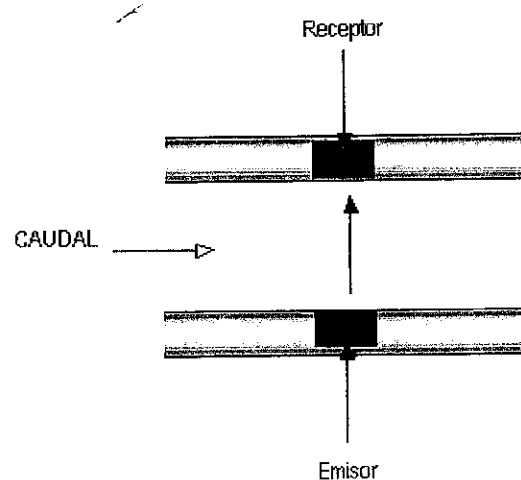


En el de reluctancia la velocidad viene determinada por el paso de las palas individuales de la turbina a través del campo magnético creado por un imán permanente montado en una bobina exterior. El paso de cada pala varía la reluctancia del circuito magnético y cambia el flujo induciendo en la bobina una corriente alterna que es proporcional al giro de la turbina.

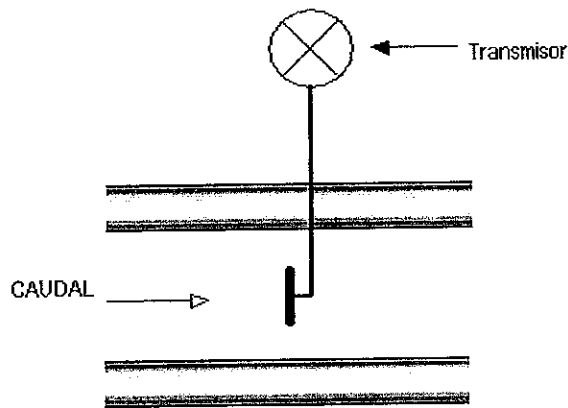
En el tipo inductivo el rotor lleva incorporado un imán permanente y el campo magnético giratorio que se origina induce una corriente alterna en una bobina exterior que es proporcional al giro de la turbina.

4.6.3.1.3.3. Transductores ultrasónicos. Miden el caudal por diferencia de velocidades del sonido al propagarse en el sentido del flujo del fluido y en el sentido contrario. El principio del ultrasónico es ubicar un emisor de un lado de la tubería y un receptor del lado contrario y así percibir las ondas ultrasónicas.

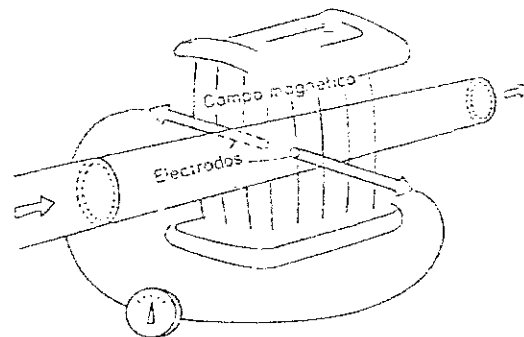
Figura #59. Transductor ultrasónico



4.6.3.1.4. Fuerza (Medidor de placa). Consiste en una placa instalada directamente en el centro de la tubería y sometida al empuje del fluido. La fuerza originada es proporcional a la energía cinética del fluido y depende del área anular entre las paredes de la tubería y la placa. La placa está conectada a un transmisor neumático de equilibrio de fuerzas o a un transductor eléctrico de galgas extensométricas. El caudal es proporcional a la raíz cuadrada de la fuerza de impacto del fluido sobre la placa y por lo tanto, a la raíz cuadrada de la señal transmitida.

Figura #60. Medidor de placa

4.6.3.1.5. Tensión inducida (Medidor magnético). Estos funcionan bajo el principio de la ley de Faraday que establece que la tensión inducida a través de cualquier conductor al moverse perpendicularmente a través de un campo magnético es proporcional a la velocidad del conductor. En este caso el conductor es el fluido que genera una señal de tensión que es captada por dos electrodos rasantes con la superficie interior del tubo y diametralmente opuestos. Esta señal pasa por un convertidor que genera una señal de salida proporcional al caudal.

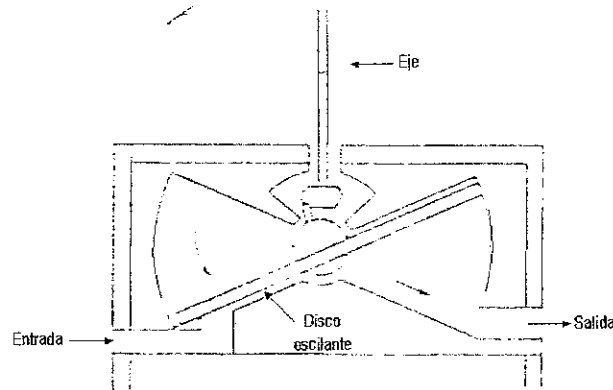
Figura #61. Medidor magnético

4.6.3.1.6. Desplazamiento positivo. Los medidores de este tipo miden el caudal en volumen contando o integrando volúmenes separados del líquido. Las partes mecánicas del instrumento se mueven

aprovechando la energía del fluido y dan lugar a una pérdida de carga. Existen cuatro tipos que se describen a continuación:

4.6.3.1.6.1. Medidor de disco oscilante. El instrumento dispone de una cámara circular con un disco plano móvil dotado de una ranura en la que está intercalada una placa fija. Esta placa separa la entrada de la salida e impide el giro del disco durante el paso del fluido. Cuando pasa el fluido el disco toma un movimiento de sube y baja alternativamente, el cual se transmite mediante su eje a un tren de engranes.

Figura #62. Medidor de disco oscilante



4.6.3.1.6.2. Medidor de pistón oscilante. El instrumento se compone de una cámara cilíndrica con una placa divisora que separa los orificios de entrada y de salida. Dentro de esta cámara se encuentra un pistón cilíndrico que oscila en un movimiento circular el cual transmite su movimiento a un tren de engranajes.

4.6.3.1.6.3. Medidor de pistón alternativo. Este es el medidor de pistón convencional que tiene un desplazamiento ascendente y descendente y transmite su movimiento a un tren de engranes.

4.6.3.1.6.4. Medidor rotativo. Este tipo de instrumento tiene partes rotativas que giran excéntricamente rozando con las paredes de una cámara circular y transportan el líquido en forma incremental de la

entrada a la salida. Los medidores rotativos más utilizados son: los cicloidales, los de dos rotores (birrotores) y los ovaes.

Los medidores de desplazamiento positivo pueden tener acoplados varios tipos de transductores:

4.6.3.1.6.4.1. Transductor de impulsos por microruptor eléctrico o neumático. El eje del medidor acciona un interruptor por medio de una leva y este está conectado a un contador electromecánico de baja velocidad.

4.6.3.1.6.4.2. Transductor de impulsos por sensor magnético. Utiliza un rotor con pequeños imanes embebidos con él y un captador magnético situado en el exterior de la caja del rotor. Al girar el rotor los pequeños imanes que contiene cortan el flujo del captador generando un tren de ondas solenoidales de impulsos que es amplificado y acondicionado obteniéndose así impulsos de ondas aptos para circuitos en controladores.

4.6.3.1.6.4.3. Transductor de impulsos por disco ranurado. Éste posee un embobinado primario que al girar el disco ranurado accionado por el medidor de caudal, interrumpe el flujo magnético y da como resultado otra onda en el embobinado secundario. Esta onda es rectificadas en el detector y enviada al acondicionador donde se obtiene una onda de salida proporcional al caudal.

4.6.3.1.6.4.4. Generador tacométrico. Genera una señal D.C. de 0-100mV proporcional al caudal. Consiste en un generador de corriente directa con estator de imán permanente y rotor bobinado.

4.6.3.1.6.4.5. Transductor de impulsos fotoeléctricos. Genera una onda que varía de 0 a 10 V. Consiste en una lámpara de filamento, un disco con sectores alternativamente opacos y translúcidos y una fotocélula. La variación en la intensidad de la luz que se produce en la

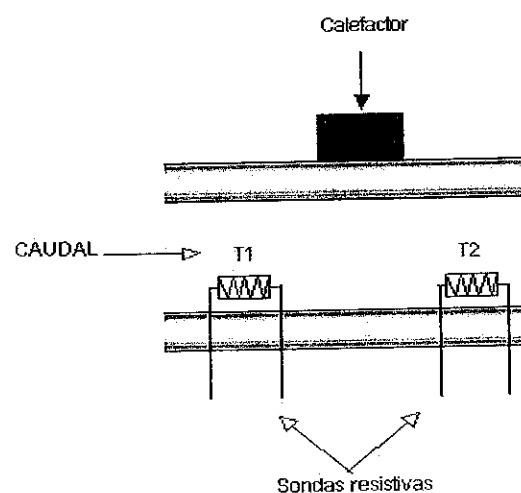
fotocélula cambia la resistencia en la tensión de salida produciendo impulsos a cada paso de zonas de opaca a translúcidas del disco. Estos impulsos son amplificados e integrados.

4.6.3.1.6.4.6. Torbellino. Se basa en la determinación de la frecuencia por torbellino producido por una hélice estática situada dentro de la tubería por donde pasa el fluido. La frecuencia del torbellino es proporcional al caudal volumétrico.

4.6.3.2. Medidores másicos. Se basa en la determinación de la frecuencia por torbellino producido por una hélice estática situada dentro de la tubería por donde pasa el fluido. La frecuencia del torbellino es proporcional al caudal volumétrico.

4.6.3.2.1. Medidores térmicos de caudal. Estos funcionan mediante la elevación de temperatura del fluido en su paso por un cuerpo caliente. Este medidor consta de una fuente eléctrica de alimentación de precisión que proporciona un calor constante al punto medio del tubo por el cual circula el caudal. En puntos equidistantes de la fuente de calor se colocan sondas de resistencia para medir la temperatura en dos puntos diferentes. Esta diferencia de temperatura es proporcional a la masa que circula a través del tubo.

Figura #63. Medidor térmico de caudal

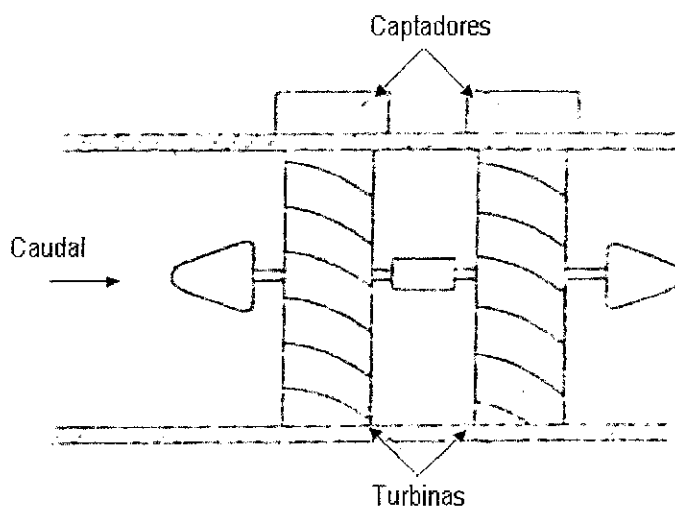


4.6.3.2.2. Medidor de momento angular. Estos se basan en el principio de la conservación del momento angular de los fluidos. Si al fluido se le aplica un momento angular y se mantiene constante la velocidad angular, la medición del par producido permitirá determinar el caudal masa. Existen dos tipos, medidor axial de una turbina y medidor axial de dos turbinas.

4.6.3.2.3. Medidor axial de una turbina. Consiste en un rotor radial con canales de paso del fluido que gira a una velocidad constante por medio de un acoplamiento magnético con un motor síncrono, aplicando al fluido un momento angular. La turbina es frenada por un resorte y su posición angular es proporcional al par dando la medida de caudal masa.

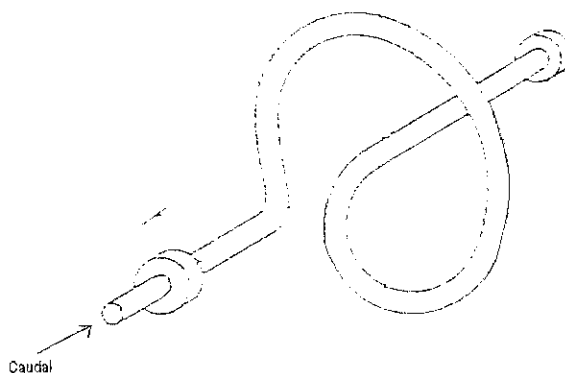
4.6.3.2.4. Medidor axial de doble turbina. Contiene dos turbinas montadas en el mismo eje enlazadas con un dispositivo de torsión calibrado. Las palas de las turbinas son de ángulos distintos y tienden a girar a velocidades angulares diferentes. Cada turbina tiene un captador que da un impulso por cada vuelta. El impulso de la turbina anterior abre un circuito y el de la posterior lo cierra. Durante el tiempo de apertura se excita un oscilador y el número de oscilaciones indica el desfase angular entre las dos turbinas. El ángulo da el valor del par, el cual a su vez es proporcional a la medida de caudal masa.

Figura #64. Medidor axial de doble turbina



4.6.3.2.5. **Medidor giroscópico.** Consiste en un tubo de forma de espiral que es sometido a una vibración y el fluido al pasar por el tubo da lugar a un momento de precisión que es captado por un elemento sensible. Este momento es directamente proporcional a la medida de caudal masa.

Figura #65. Medidor giroscópico



4.6.3.2.6. **Medidor de presión diferencial.** Éste se basa en el bombeo de parte del caudal del fluido de un segmento de un bucle a otro formándose una diferencia de presiones que es directamente proporcional al caudal masa.

4.6.4. Nivel

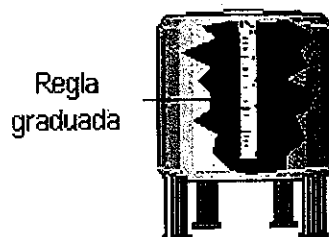
4.6.4.1. **Medidores de nivel de líquidos.** Los medidores de nivel de líquidos trabajan midiendo ya sea directamente la altura del líquido sobre una línea de referencia, presión hidrostática, desplazamiento producido en un flotador por el propio líquido o por características eléctrica del líquido.

4.6.4.1.1. Instrumentos de medida directa

4.6.4.1.1.1. **Medidor de sonda.** Consiste en una varilla, regla graduada o cinta de la longitud conveniente para introducirla

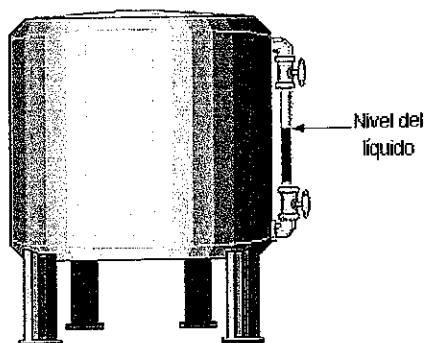
dentro del depósito. La determinación del nivel se efectúa por lectura directa de la longitud mojada por el líquido.

Figura #66. Medidor de regla graduada



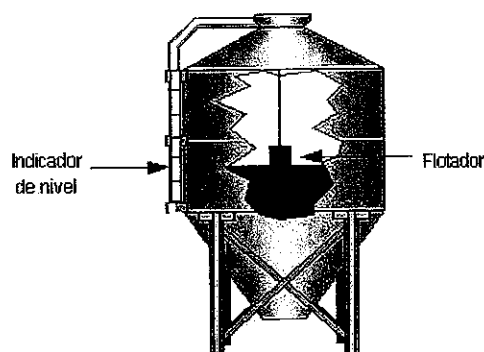
4.6.4.1.1.2. Nivel de cristal. Consiste en un tubo de vidrio o plástico con sus extremos conectados a bloques metálicos que están unidos al tanque generalmente mediante tres válvulas, dos de cierre de seguridad en los extremos del tubo para impedir el escape del líquido en caso de rotura del tubo y una de purga.

Figura #67. Nivel de cristal



4.6.4.1.1.3. Instrumentos de flotador. Consisten en un flotador situado en el líquido a medir y conectado al exterior del tanque indicando directamente el nivel. La conexión puede ser directa, magnética o hidráulica.

Figura #68. Instrumento de flotador



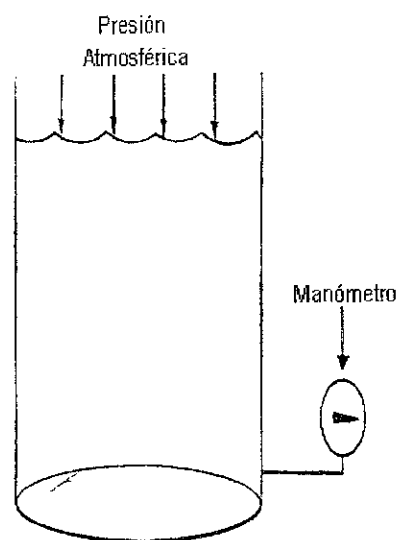
La conexión directa está unida por un cable que desliza en un juego de poleas a un indicador exterior que señala sobre una escala graduada.

La conexión magnética desliza exteriormente a lo largo de un tubo guía sellado, situado verticalmente en el interior del tanque. Dentro del tubo una pieza magnética sigue el flotador en su movimiento y mediante un cable y un juego de poleas arrastra el indicador de un instrumento situado en la parte superior del tanque, este instrumento puede ser un transmisor neumático o eléctrico.

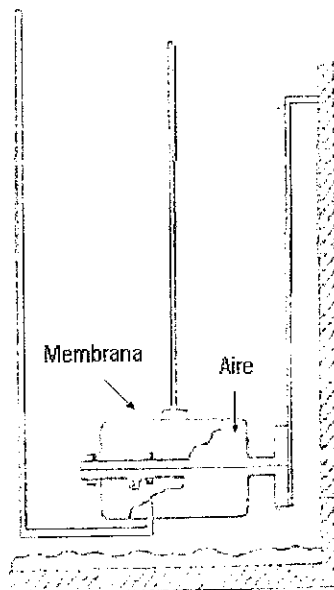
La conexión hidráulica actúa sobre un fuelle de tal modo que varía la presión de un circuito hidráulico y señala a distancia en el receptor el nivel correspondiente.

4.6.4.1.2. Presión hidrostática

4.6.4.1.2.1. Medidor manométrico. Consiste en un manómetro conectado directamente a la parte inferior del tanque, en donde este mide la presión debida a la altura del líquido. Este tipo de medición únicamente se utiliza para tanques abiertos.

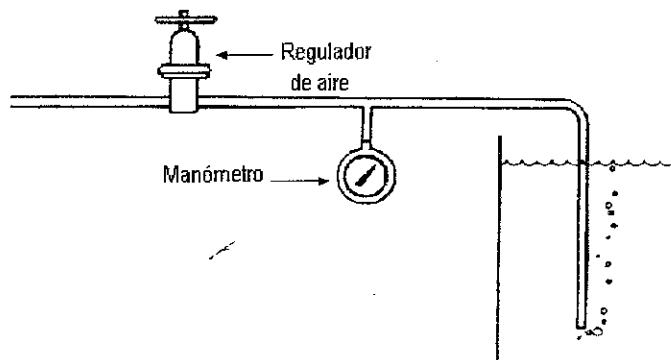
Figura #69. Medidor manométrico

4.6.4.1.2.2. Medidor de membrana. Utiliza una membrana conectada con un tubo al instrumento receptor. La fuerza ejercida por la columna de líquido sobre el área de la membrana comprime el aire interno a una presión igual a la ejercida por la columna del líquido.

Figura #70. Medidor de membrana

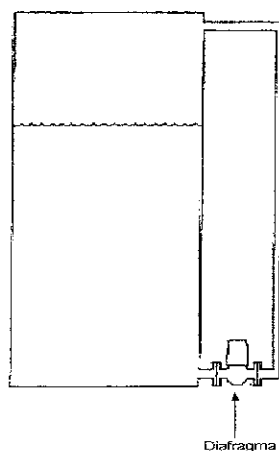
4.6.4.1.2.3. Medidor tipo burbujeo. Emplea un tubo sumergido en el líquido que hace burbujear aire mediante una alimentación regulada de aire. La presión del aire en la tubería equivale a la presión hidrostática ejercida por la columna del líquido, es decir el nivel.

Figura #71. Medidor tipo burbujeo



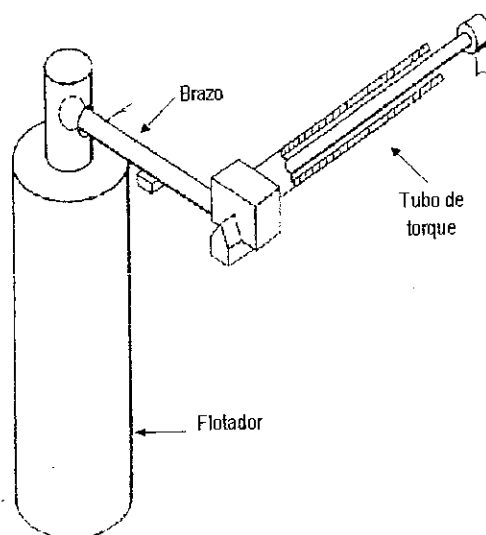
4.6.4.1.2.4. Medidor de presión diferencial. Consiste en un diafragma en contacto con el líquido del tanque, que mide la presión hidrostática en un punto del fondo del tanque. En un tanque abierto esta presión es proporcional a la altura del líquido en ese punto y a su peso específico. En el caso de un tanque cerrado y bajo presión, hay que corregir la indicación del aparato para la presión ejercida sobre el líquido debiendo señalar que la lectura será muy poco precisa, si la presión es grande; para esto se suele conectar un tubo en la parte superior del tanque y medir la diferencia de presiones entre la toma inferior y la superior utilizando transmisores de presión diferencial de diafragma.

Figura #72. Medidor de presión diferencial en un tanque cerrado



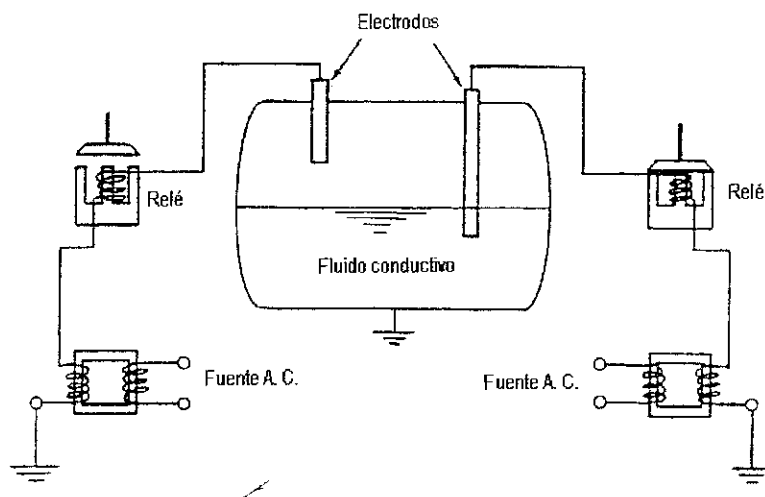
4.6.4.1.3. Instrumento de desplazamiento. Consiste en un flotador parcialmente sumergido en el líquido y conectado mediante un brazo a un tubo de torsión unido rígidamente al tanque. Dentro del tubo y unido a su extremo libre se encuentra una varilla que transmite el movimiento de giro a un transmisor exterior al tanque. El ángulo de rotación es directamente proporcional a la fuerza aplicada, es decir, al momento ejercido por el flotador.

Figura #73. Instrumento de desplazamiento

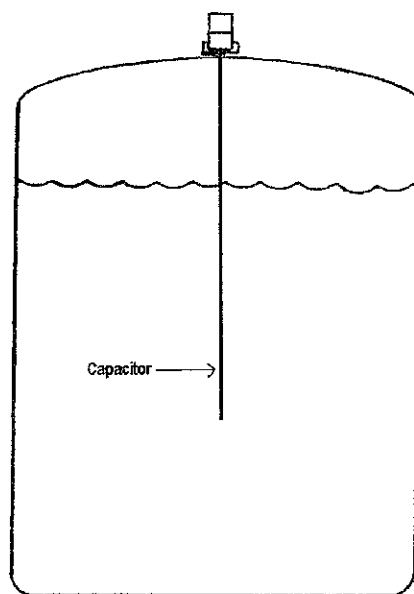


4.6.4.1.4. Instrumentos basados en las características eléctricas del líquido.

4.6.4.1.4.1. Medidor de nivel conductivo. Consiste en uno o varios electrodos y un relé eléctrico o electrónico que es excitado cuando el líquido moja a dichos electrodos. El líquido debe ser lo suficientemente conductor como para excitar el circuito electrónico. Cuando el líquido moja los electrodos se cierra el circuito y circula una corriente del orden de los 2 mA. El instrumento se emplea como alarma de control de nivel alto o bajo, utiliza relés eléctricos para líquidos con buena conductividad y relés electrónicos para líquidos con baja conductividad.

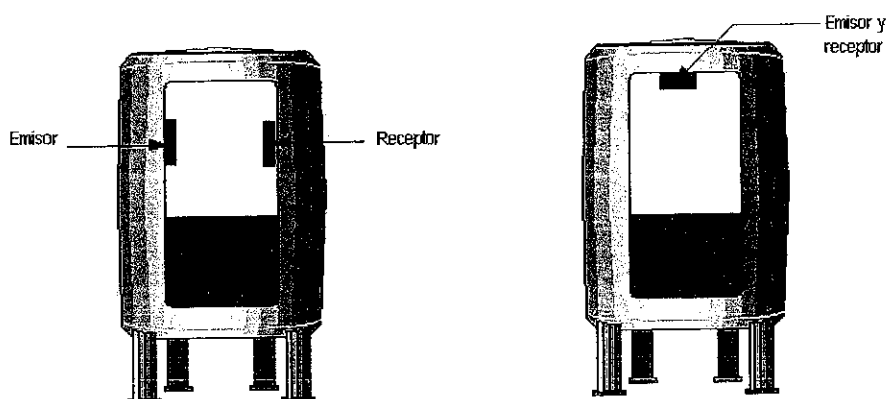
Figura #74. Medidor de nivel conductivo

4.6.4.1.4.2. Medidor de capacidad. Éste mide la capacidad del capacitor formado por el electrodo sumergido en el líquido y las paredes del tanque. La capacidad del conjunto depende linealmente al nivel del líquido.

Figura #75. Medidor de capacidad

4.6.4.1.4.3. Sistema ultrasónico. Se basa en la emisión de un impulso ultrasónico a una superficie reflectante y la recepción del eco del mismo en un receptor. El retardo en la captación del eco depende del nivel del tanque.

Figura #76. Ultrasónico



4.6.4.1.4.4. Sistema por rayos gama. Consiste en un emisor de rayos gamma montado verticalmente en un lado del tanque y con un contador Geiger que transforma la radiación gamma recibida en una señal eléctrica de corriente continua. Como la transmisión de los rayos es inversamente proporcional a la masa del líquido en el tanque, la radiación captada por el receptor es inversamente proporcional al nivel del líquido ya que el material absorbe parte de la energía cinética.

4.6.4.2. Medidores de nivel de sólidos

4.6.4.2.1. Detectores de nivel de punto fijo. Proporcionan una medida en uno o más puntos fijos determinados.

4.6.4.2.1.1. Detector de diafragma. Consiste en una membrana flexible que puede entrar en contacto con el producto dentro del tanque y que contiene en su interior un conjunto de palancas con

contrapeso que se apoyan sobre un microrruptor. Cuando el nivel del sólido alcanza el diafragma lo fuerza venciendo el contrapeso y actuando sobre el microrruptor; que puede ser mecánico o de mercurio, acciona una alarma o actúa sobre un transportador asociado al depósito.

4.6.4.2.1.2. Cono suspendido. Consiste en un microrruptor montado dentro de un cabezal de goma de la que está suspendida una varilla que termina en un cono. Cuando el nivel de sólidos alcanza el cono, el interruptor es excitado. El cabezal de goma permite una flexibilidad en la posición del cono gracias a la cual el aparato puede actuar como alarma de alto o de bajo nivel.

4.6.4.2.1.3. Varilla flexible. Consiste en una varilla de acero conectada a un diafragma de latón donde está contenido un interruptor. Cuando los sólidos presionan el interruptor se cierra y funciona como una alarma.

4.6.4.2.1.4. Medidor conductivo. Consiste en un electrodo dispuesto en el interior de unas placas puestas a tierra y con el circuito abierto. Cuando los sólidos alcanzan el aparato, se cierra el circuito y la pequeña corriente originada es amplificada actuando sobre un relé de alarma. Los sólidos deben de poseer una conductividad eléctrica apreciable para poder excitar el circuito.

4.6.4.2.1.5. Paletas rotativas. Consiste en un eje vertical, dotado de paletas, que gira continuamente a baja velocidad accionado por un motor sincrónico. Cuando el sólido llega a las paletas, las inmoviliza y el soporte del motor y el juego de engranajes empieza a girar en sentido contrario.

4.6.4.2.2. Detectores de nivel continuos

4.6.4.2.2.1. Medidor de peso móvil. Consiste en un pequeño peso móvil sostenido por un cable desde la parte superior del silo mediante poleas. Un motor y un programador situados en el exterior establecen un

ciclo de trabajo del peso. Este baja suavemente en el interior del depósito hasta que choca con el sólido; en ese instante el cable se afloja y un detector invierte el sentido del movimiento del peso con lo que éste asciende hasta la parte superior del depósito donde para y repite el ciclo nuevamente. Un indicador exterior señala el punto donde el peso ha invertido su movimiento, indicando así el nivel.

4.6.4.2.2.2. Medidor de báscula. Mide el nivel de sólidos indirectamente a través del peso del sólido junto con el peso del depósito. Como el peso del depósito es conocido, es fácil conocer el peso del sólido y por lo tanto el nivel.

4.6.4.2.2.3. Medidor capacitivo. Es parecido al medidor capacitivo de líquidos con la diferencia que tiene más posibilidades de error por la adherencia de sólidos que se puede presentar, por lo que la varilla está aislada.

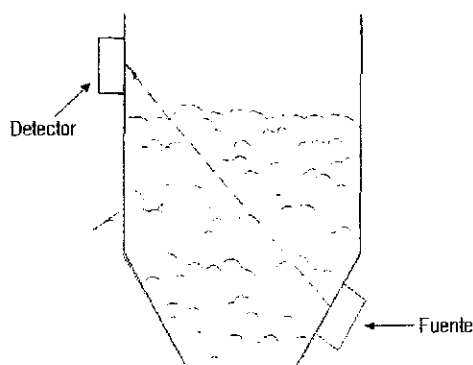
4.6.4.2.2.4. Medidor de presión diferencial. Consiste en dos orificios de purga de aire situados por debajo y por encima del depósito. Un instrumento transmisor neumático o electrónico mide la presión diferencial posterior de los dos orificios que depende del nivel del sólido.

4.6.4.2.2.5. Medidor de presión ultrasónico. Consiste en un emisor de ultrasonidos que envía un haz horizontal a un receptor colocado al otro lado del depósito. Si el nivel de sólidos está más bajo que el haz, el sistema entra en oscilación enclavando un relé. Cuando los sólidos interceptan el haz, el sistema deja de oscilar y el relé se desenclava actuando sobre una alarma o sobre la maquinaria de descarga. Si se coloca el haz en dirección vertical, el instrumento puede actuar como indicación de nivel continuo midiendo el tiempo de tránsito de impulso ultrasónico, entre la fuente emisora, la superficie del producto en donde se refleja y el receptor que está ubicado en la propia fuente.

4.6.4.2.2.6. Medidor de radiación. Consiste en una fuente radiactiva de rayos gamma, puesta en la parte inferior del exterior

del tanque, que emite su radiación a través del sólido siendo captada por un detector en la parte superior del exterior del tanque opuesta a la fuente. El grado de radiación recibida depende del espesor de sólidos que se encuentra entre la fuente y el receptor. Si estas son colocadas en un plano horizontal pueden trabajar como un detector discontinuo de todo o nada.

Figura #77. Medidor de radiación



4.6.5. Otras variables

4.6.5.1. Vibración. Acelerómetros, sensores capacitivos.

4.6.5.2. Índice de refracción. Reflectancia, transmisión.

4.6.5.3. Viscosidad/consistencia. Rotativo, flotador, vibración capilar.

4.6.5.4. Densidad. Columna líquida, desplazamiento, vibratorio, radiactivo, refracción.

4.6.5.5. Composición química. Cromatógrafo, conductímetro, espectrofotómetro infrarrojo, analizador de oxígeno, iones, pH, polarización.

4.6.5.6. Humedad. Electrólisis, Karl Fisher, punto de rocío, capacitivo, conductividad, cabello.

4.7. Controladores

Los controladores comparan la variable controlada (temperatura, nivel, presión, etc.) con un valor deseado conocido como punto de control y envía una señal al elemento final de control el cual ejerce una acción correctiva de acuerdo con la desviación.

Los controladores más utilizados son los Controladores Digitales, Controladores Lógicos Programables (PLC's) y los Sistemas de Control Distribuido (DCS) y por último los Sistemas Híbridos, los cuales se definen a continuación:

4.7.1. Controladores digitales. En la mayoría de procesos industriales se requiere controlar numerosas variables para producir un producto final de calidad. Los controladores digitales poseen microprocesadores que les permite controlar variables múltiples al mismo tiempo.

Estos controladores poseen memoria para almacenar datos, una unidad lógica algorítmica para calcular funciones matemáticas, aceptan entradas múltiples, contienen algoritmos de control pre programados, problemas de diagnóstico, tuning automático y comunicación con otros controladores digitales y computadoras.

4.7.2. PLC's. Los controladores lógicos programables difieren de los controladores digitales en que son capaces de manejar funciones discretas

múltiples. Los PLC's han hecho una contribución significativa para los logros del alto nivel de confiabilidad, calidad y eficiencia en el control industrial.

Un PLC como su nombre lo indica es programable, el cual ofrece una flexibilidad para realizar cambios en el control de algoritmos sin tener que volver a cablear los circuitos. La limitación que tienen los PLC's es que únicamente son capaces de manejar controles discretos (ON-OFF).

4.7.3. DCS. A medida que el número de lazos de control aumenta en los diferentes procesos de las fábricas, se llegó a la necesidad de tener un sistema más seguro y eficiente.

Un sistema de control distribuido es una colección de microprocesadores basados en módulos que trabajan juntos con un sistema de comunicación para controlar y monitorear operaciones de procesos. El DCS es capaz de manejar controles análogos y posee sistemas redundantes.

Redundancia. El término redundancia consiste en la duplicación de ciertos puntos de control del proceso, siendo este respaldo para cualquier operación. Es utilizado solo en partes críticas y de alta prioridad debido al costo que representa duplicar cualquier tipo de control.

Este sistema tiene la ventaja de poder compartir información con otros dispositivos digitales así como computadoras, analizadores, PLC's y se puede integrar a sistemas ya establecidos.

El DCS permite un lenguaje de programación combinado, de texto estructurado, bloques funcionales, diagramas de escaleras y bloques secuenciales. Todo esto brinda una gran variedad de control de variados y complejos procesos en un diseño y tiempo mínimo.

4.7.4. Sistemas híbridos. En la actualidad los controladores tienden a implementar en un solo controlador sistemas que manejen

controles digitales y análogos; éste es el caso de los sistemas híbridos, los cuales son una combinación de PLC y DCS en un solo controlador.

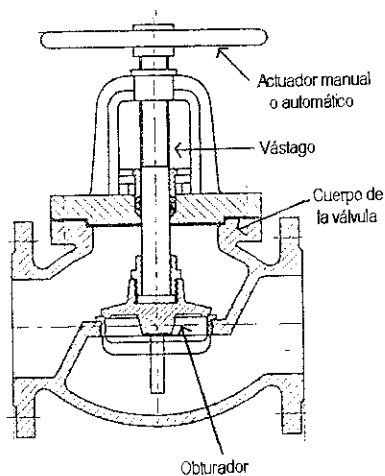
4.8. Elemento final de control

El elemento final de control recibe una señal del controlador y modifica el caudal del fluido o agente de control dependiendo de lo que requiera el proceso. Entre los más utilizados tenemos los siguientes:

4.8.1. Válvulas ON/OFF. Este tipo de válvulas están abiertas o cerradas completamente, no tiene posición intermedia (no son de regulación).

4.8.2. Válvulas de control. Tienen capacidad de regulación y son accionadas bajo un servomotor ya sea electrónico o neumático. Existen una gran variedad de tipos de válvulas de control, entre las más utilizadas están: válvula de globo, válvula de tres vías, válvula de bola, válvula de mariposa, entre otras.

Figura #78. Válvula



Entre los accesorios más utilizados para el funcionamiento de la válvula tenemos los siguientes:

4.8.2.1. Servomotores. Los servomotores son los actuadores de las válvulas que reciben una señal para regular dicha válvula. Dependiendo del tipo de señal que reciben estos se pueden clasificar en: neumáticos, electrónicos e hidráulicos, siendo los neumáticos los más utilizados.

4.8.2.2. Posicionadores. En una válvula de control existen fuerzas de desequilibrio que influyen en la posición del vástago de la válvula y hacen que el control sea errático e incluso inestable. Estas fuerzas pueden compensarse usando un posicionador, el cual compara la señal de entrada con la posición del vástago y si ésta no es correcta envía una señal para eliminar el error y así la posición del vástago sea igual o proporcional a la señal recibida.

4.8.2.3. Microrruptores de final de carrera. Estos permiten la señalización a distancia en el panel de control de la apertura, cierre o del paso por una o varias posiciones determinadas del obturador de la válvula. Pueden ser neumáticos o electrónicos.

4.8.3. Variadores de velocidad. Accionamientos de motores eléctricos cuya función, como su nombre lo indica, es la variación de velocidad del motor para aumentar o disminuir el flujo de cualquier agente a controlar.

4.8.4. Dampers. Elementos reguladores de flujo de aire.

4.8.5. Sistemas eléctricos. Se utilizan reles para disparo de seguridad, arranque de equipos eléctricos, motores eléctricos, bombas, pistones, etc.

5. AUTOMATIZACIÓN DE UNA CALDERA DE BAGAZO

A continuación se describe el sistema de automatización a implementar en una caldera de bagazo, especificando el control a utilizar en cada una de las partes de la caldera descritas en el capítulo 2.

5.1. Datos de caldera

Los datos de la caldera se especifican en el cuadro #5, los cuales son valores promedios de calderas que se utilizan en la Industria Azucarera Guatemalteca.

Cuadro #5. Datos de la caldera

DATO	VALOR
Tipo de caldera	Acuatubular
Número de domos	2, superior e inferior
Presión de operación	600 psiG
Capacidad	150,000 Lbs/Hora
Presión en la entrada de agua	800 psiG
Temperatura de vapor saturado	486.21 °F
Temperatura de vapor sobrecalentado	850 °F
Agua de alimentación	150,000 Lbs/Hora
Presión en el hogar	- 0.5" de agua
Temperatura de los gases de combustión en la salida del hogar	1400 °F
Temperatura de los gases en la salida del precalentador de aire	900 °F

Temperatura de los gases en la salida del economizador	600 °F
Presión de los gases de combustión en la salida del hogar	-1.1" de agua
Presión de los gases en la salida del precalentador de aire	-5.12" de agua
Presión de los gases en la salida del economizador	- 10.6" de agua
Diámetro de tubería salida de vapor	10 pulgadas, cédula 120, acero al carbón
Diámetro interior del domo superior	30 pulgadas
Diámetro de tubería entrada de agua	4 pulgadas, cédula 80, acero al carbón

5.2. Sistema de automatización

Hace unas décadas los métodos de operación de la caldera eran completamente manuales, pero con la evolución de la tecnología y la automatización industrial, la operación de las calderas se ha optimizado creando una operación más eficiente.

El sistema de automatización a implementar en la caldera será un Sistema de Control Distribuido (DCS) ya que ésta necesita de un control análogo. Todas las variables del proceso a controlar necesitan ser reguladas, lo cual sería imposible mediante un control discreto (ON/OFF).

El DCS recibirá señales de varios elementos primarios ubicados en distintos puntos de la caldera y realizará el control enviando señales a distintos elementos finales de control. A continuación se describe en cada punto de la caldera el sistema de control a utilizar.

5.2.1. Alimentadores de bagazo. La alimentación de combustible (bagazo) a la caldera debe de ser regulada y así mantener la cantidad óptima

para la combustión dependiendo de la demanda. La demanda de la caldera se determina con la presión de salida del vapor.

Los alimentadores de bagazo se controlan mediante un lazo de retroalimentación, el cual consta de los siguientes elementos:

Cuadro #6. Elementos para control de alimentadores de bagazo

Acción	Instrumento
Medición	Transmisor de presión manométrica en la salida de vapor en el domo superior.
Decisión	DCS
Acción	Motor eléctrico accionado por un variador de velocidad.

En este lazo el transmisor de presión mide la presión en la salida del vapor, el cual manda una señal al controlador y este compara el valor de la presión con el punto de control y dependiendo del error este manda una señal al variador de velocidad para que alimente mayor o menor cantidad de combustible a la caldera.

Para calcular el transmisor de presión en la salida de vapor del domo únicamente se necesita saber la presión de operación de la caldera, que en este caso se tiene una caldera de 600 psiG. Todo equipo industrial ya sea electrónico, eléctrico, hidráulico, neumático, mecánico, etc. no deben de trabajar a un 100% de su capacidad para no reducir su tiempo de vida normal, es por esto que los equipos deben de trabajar entre un 75-80% de su capacidad.

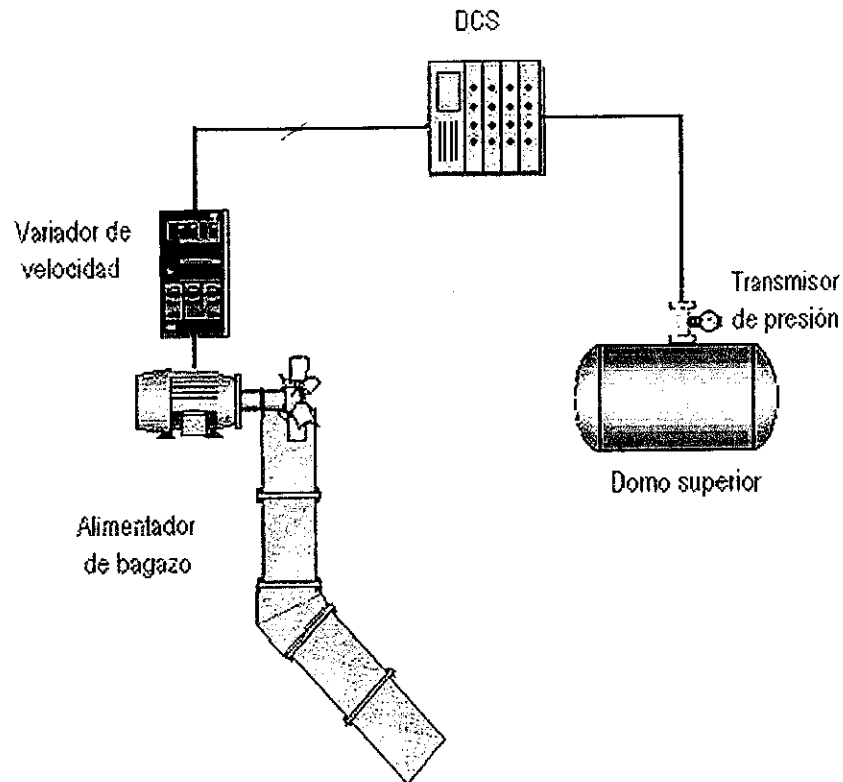
El transmisor de presión a escoger en la salida de vapor del domo superior debe tener un rango de trabajo en el que el 75% de este rango equivalga a la presión de operación de la caldera.

Presión de operación = 600 psiG que equivalen al 75%

$$\Rightarrow \frac{600 \text{ psiG}}{75\%} \times 100\% = 800 \text{ psiG}$$

Por lo tanto el 100% de operación del transmisor de presión debe de ser de 800 psiG, escogemos entonces un transmisor de presión con un rango de 0-800 psiG.

Figura #79. Lazo de control para alimentadores de bagazo

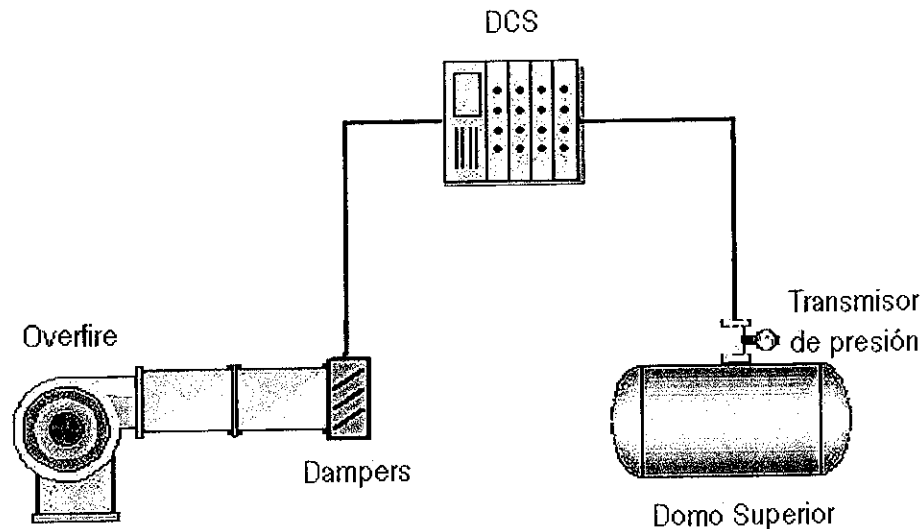


5.2.2. Over Fire. El over fire debe ser regulado para que la distribución del bagazo en la caldera sea eficiente. El over fire esta directamente relacionado con la alimentación de bagazo a la caldera, es por esto que este debe controlarse según sea la demanda de la caldera. Este control se logra mediante un lazo de retroalimentación con los siguientes elementos:

Cuadro #7. Elementos para control de over fire

Acción	Instrumento
Medición	Transmisor de presión manométrica en la salida del vapor en el domo superior.
Decisión	DCS
Acción	Dampers

El transmisor de presión en la salida del domo superior envía la señal al controlador, el cual regula la posición de los dampers según sea la demanda de la caldera. El transmisor a utilizar es el mismo transmisor de presión para los alimentadores de bagazo, o sea un transmisor con un rango de 0-800 psiG.

Figura #80. Lazo de control para over fire

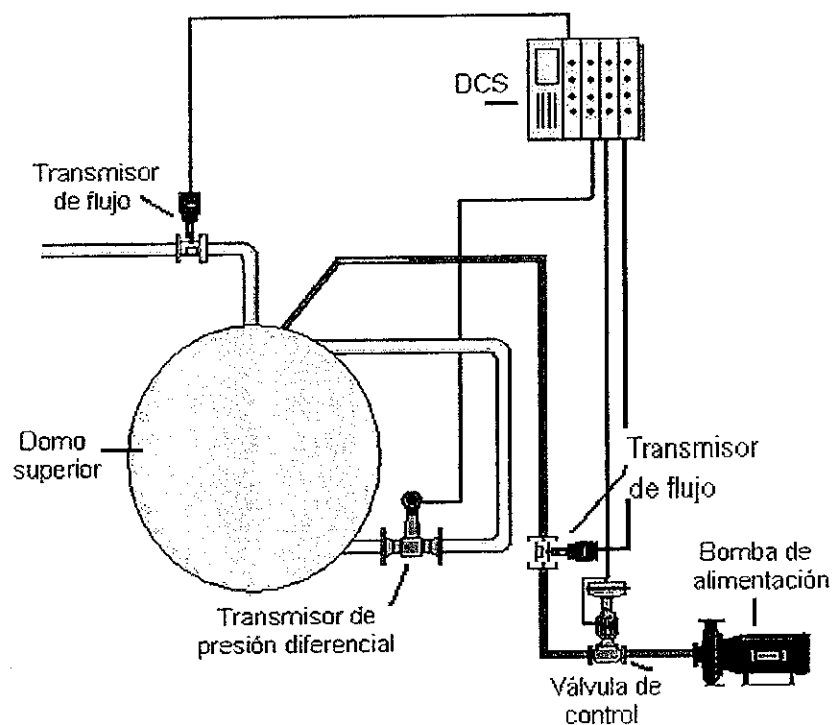
5.2.3. Nivel del domo superior. El nivel de la caldera es el punto más crítico a automatizar, es por esto que se monitorea la variable de nivel con dos instrumentos exactamente iguales, que trabajan independientemente aplicando aquí el término redundancia por seguridad de la caldera.

El lazo de control que se utiliza para controlar el nivel de los domos es un lazo de cascada con retroalimentación, con los siguientes elementos:

Cuadro #8. Elementos para control de nivel

Acción	Instrumento
Medición	<p>Transmisor de nivel de presión diferencial en el domo superior.</p> <p>Transmisor flujo vapor de presión diferencial con placa-orificio en la salida de vapor.</p> <p>Transmisor flujo agua de presión diferencial con placa-orificio en la alimentación de agua.</p>
Decisión	DCS
Acción	Válvula de control en la entrada del agua de alimentación de la caldera.

Figura #81. Lazo de control de nivel



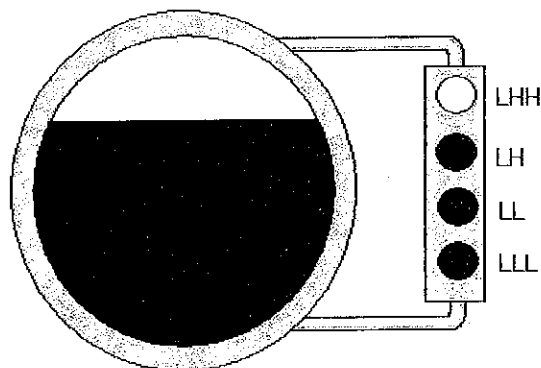
El lazo primario lo constituye el transmisor de nivel y es retroalimentado por la relación flujo de agua/vapor que debe de mantenerse en un valor preestablecido y cualquier cambio modificará el punto de control del lazo secundario, el transmisor de flujo de agua.

El transmisor de nivel mide el nivel del domo superior y el controlador retroalimentado, lo compara con el punto de control y dependiendo del error este modifica el punto de control del lazo secundario (flujo agua). El transmisor de flujo de agua manda una señal al controlador secundario y dependiendo del error este manda una señal a la válvula de control que se abrirá o cerrará dependiendo de la medición de nivel del domo superior.

Debido a que éste es el punto más crítico de la caldera se utilizan dos mediciones extras a las mediciones utilizadas para el control, siendo estas la visual y la de seguridad. La medición visual se realiza mediante un medidor de nivel de cristal. Para la medición de seguridad se utiliza un medidor de nivel conductivo que consta de cuatro niveles:

- Nivel Alto Alto (LHH),
- Nivel Alto (LH),
- Nivel Bajo (LL) y
- Nivel Bajo Bajo (LLL)

Figura #82. Nivel de seguridad



Para cada nivel se tiene un electrodo, el cual está ubicado a diferentes alturas del domo. Cuando el agua entra en contacto con el electrodo se cierra un circuito que acciona una señal de luz para indicar el nivel visualmente. Por otro lado, en el nivel LL se tiene el circuito de seguridad que al no tener presencia de agua abre un circuito que dispara la caldera. En el caso de que se cierre el circuito del nivel LHH también se acciona un circuito que dispara la caldera por exceso de agua.

Los transmisores de nivel de presión diferencial se escogen mediante rangos de columna de agua que dependen de la diferencia de presión entre el punto alto y bajo del domo. En este caso se toma esta diferencia de presión como el diámetro del domo (30"), por lo que se escoge un transmisor de nivel que contenga un rango de 0-30 pulgadas de columna de agua, como por ejemplo un transmisor de 10-100" de columna de agua.

A continuación se realiza el cálculo para seleccionar la placa-orificio para ambos transmisores de flujo (agua y vapor). Para esto se empleará la ecuación de Bernoulli en dos puntos diferentes, el punto 1 antes de la placa orificio y el punto 2 en la placa orificio.

Para este cálculo se utiliza una diferencia de presión de 15 psi, la cual es una diferencia de presión permisible para el dimensionamiento de medidores de flujo.

5.2.3.1. Flujo de vapor

$$M = 150,000 \text{ Lbs./Hora}$$

$$P = 600 \text{ psi}$$

$$T = 850 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$v = 1.250016 \text{ pies}^3/\text{lb}$$

$$\text{Diámetro de la tubería: } 10''$$

Cálculo de caudal:

$$Q = Mv = (150,000) \times (1.250016)$$

$$Q = 187,502.4 \text{ pies}^3/\text{hora}$$

Cálculo de velocidad 1:

$$Q = A_1 V_1 \Rightarrow V_1 = Q/A_1 = (187,502.4) / [(\pi/4) \times (10/12)^2]$$

$$V_1 = 343,779.08 \text{ pies/hora} = 95.49 \text{ pies/s} = 1146 \text{ pulg/s}$$

Ecuación de Bernoulli:

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} - h_L = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

como $z_1 = z_2$

$$\frac{P_1 - P_2}{\gamma} - h_L = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g}$$

como $V_1^2 = V_2^2 \times (A_2/A_1)^2$

$$V_2^2 - V_2^2 \times (A_2/A_1)^2 = 2g \times \{ [(P_1 - P_2)/\gamma] - h_L \}$$

$$V_2^2 \times [1 - (A_2/A_1)^2] = 2g \times \{ [(P_1 - P_2)/\gamma] - h_L \}$$

$$V_2 = \sqrt{ [(2g \times \{ [(P_1 - P_2)/\gamma] - h_L \}) / [1 - (A_2/A_1)^2]] }$$

Eliminando h_L e introduciendo una constante C , que es el coeficiente de descarga para una placa-orificio tenemos,

$$V_2 = C \times \sqrt{ [(2g \times \{ [(P_1 - P_2)/\gamma] \}) / [1 - (A_2/A_1)^2]] }$$

De donde C se calcula utilizando el Número de Reynolds (N_R)

$$N_R = \frac{V \times D}{\mu \times v}$$

Cálculo para μ :

$$\ln \mu = A + B/T + CT + DT^2$$

de donde las constantes A, B, C, D para el vapor son:

$$A = -24.71$$

$$B = 4209$$

$$C = 0.04527$$

$$D = -3.37 \times 10^{-5}$$

$$T = 850^\circ\text{F} = 727.6 \text{ K}$$

$$\ln \mu = -24.71 + (4209/727.6) + (0.04527 \times 727.6) + (-3.37 \times 10^{-5} \times 727.6^2)$$

$$\ln \mu = -3.8276$$

$$\mu = e^{-3.8276}$$

$$\mu = 0.0217614 \text{ centipoises (cp)}$$

$$\mu = 4.544963 \times 10^{-3} \text{ Lbs-seg/pie}^2$$

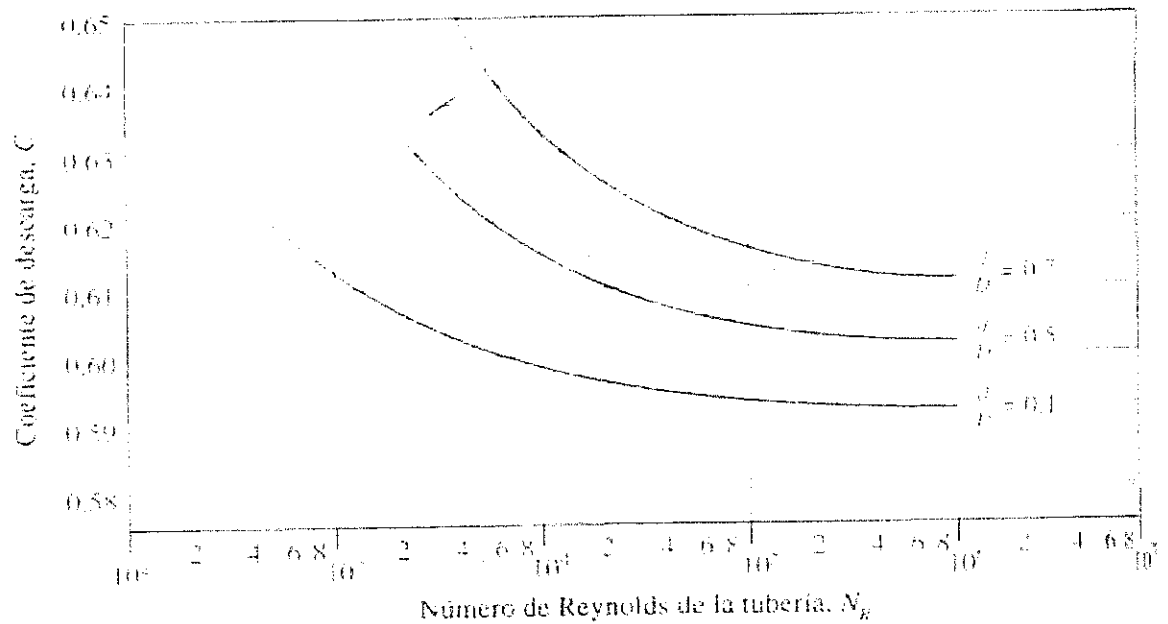
$$N_R = \frac{(95.49) \times (10/12)}{(4.544963 \times 10^{-3}) \times (1.250016)}$$

$$N_R = 1.4 \times 10^4$$

de figura #83, $C = 0.62$

Para seleccionar la curva a utilizar para seleccionar el valor de C , se utilizó como referencia un software para cálculo de medidores de flujo (FE-Sizer).

Figura #83. Coeficiente de descarga para placa-orificio



Cálculo de velocidad 2:

$$\Rightarrow V_2 = (0.62) \times \sqrt{[(2) \times (32.2) \times (12) \times (12^3) \times (15) \times (1.250016)] / [1 - (6/10)^2]}$$

$$V_2 = 3878.02 \text{ pulg/s}$$

Cálculo de diámetro de placa:

$$A_1 \times V_1 = A_2 \times V_2$$

$$D_1^2 \times V_1 = D_2^2 \times V_2$$

$$D_2 = \sqrt{(V_1/V_2)} \times D_1 = \sqrt{(1146/3878.02)} \times 10$$

$$D_2 = 5.44''$$

Por lo tanto, se utiliza una placa con un diámetro de orificio de 5.5''

5.2.3.2. Flujo de agua

$$M = 150,000 \text{ Lbs./Hora}$$

$$P = 800 \text{ psi}$$

$$T = 210 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$v = 0.0167 \text{ pies}^3/\text{lb}$$

$$\text{Diámetro de la tubería: } 4''$$

Cálculo de caudal:

$$Q = Mv = (150,000) \times (0.0167)$$

$$Q = 2,505 \text{ pies}^3/\text{hora}$$

Cálculo de velocidad 1:

$$Q = A_1 V_1 \Rightarrow V_1 = Q/A_1 = (2,505) / [(\pi/4) \times (4/12)^2]$$

$$V_1 = 28,705.18 \text{ pies/hora} = 7.9737 \text{ pies/s} = 95.68 \text{ pulg/s}$$

Ecuación de Bernoulli:

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} - h_L = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

como $z_1 = z_2$

$$\frac{P_1 - P_2 - h_L}{\gamma} = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g}$$

como $V_1^2 = V_2^2 \times (A_2/A_1)^2$

$$V_2^2 - V_2^2 \times (A_2/A_1)^2 = 2g \times \{ [(P_1 - P_2)/\gamma] - h_L \}$$

$$V_2^2 \times [1 - (A_2/A_1)^2] = 2g \times \{ [(P_1 - P_2)/\gamma] - h_L \}$$

$$V_2 = \sqrt{[(2g \times \{ [(P_1 - P_2)/\gamma] - h_L \}) / [1 - (A_2/A_1)^2]]}$$

Eliminando h_L e introduciendo una constante C , que es el coeficiente de descarga para una placa-orificio tenemos,

$$V_2 = C \times \sqrt{[(2g \times \{ [(P_1 - P_2)/\gamma] \}) / [1 - (A_2/A_1)^2]]}$$

De donde C se calcula utilizando el Número de Reynolds (N_R)

$$N_R = \frac{V \times D}{\mu \times \nu}$$

Cálculo para μ :

$$\ln \mu = A + B/T + CT + DT^2$$

de donde las constantes A , B , C , D para el vapor son:

$$A = -24.71$$

$$B = 4209$$

$$C = 0.04527$$

$$D = -3.37 \times 10^{-5}$$

$$T = 210 \text{ } ^\circ\text{F} = 372 \text{ K}$$

$$\ln \mu = -24.71 + (4209/372) + (0.04527 \times 372) + (-3.37 \times 10^{-5} \times 372^2)$$

$$\ln \mu = -1.2186$$

$$\mu = e^{-1.2186}$$

$$\mu = 0.295648 \text{ centipoises (cp)}$$

$$\mu = 1.9866 \times 10^{-4} \text{ Lbs-seg/pie}^2$$

$$N_R = \frac{(7.9737) \times (4/12)}{(1.9866 \times 10^{-4}) \times (0.0167)}$$

$$N_R = 8.01 \times 10^5$$

de figura #83, $C = 0.602$

Para seleccionar la curva a utilizar para seleccionar el valor de C , se utilizó como referencia un software para cálculo de medidores de flujo (FE-Sizer).

Cálculo de velocidad 2:

$$\Rightarrow V_2 = (0.602) \times \sqrt{[(2) \times (32.2) \times (12) \times (12^3) \times (15) \times (0.0167)] / [1 - (2/4)^2]}$$

$$V_2 = 402.04 \text{ pulg/s}$$

Cálculo de diámetro de placa:

$$A_1 \times V_1 = A_2 \times V_2$$

$$D_1^2 \times V_1 = D_2^2 \times V_2$$

$$D_2 = \sqrt{(V_1/V_2)} \times D_1 = \sqrt{(95.68/402.04)} \times 4$$

$$D_2 = 1.95''$$

Por lo tanto utilizamos una placa con un diámetro de orificio de 2''

5.2.4. Tiro forzado. El tiro forzado debe de ser controlado para que la alimentación de aire a la caldera sea óptima y así formar una combustión eficiente. La cantidad de aire que debe ingresar a la caldera depende de la demanda de la misma.

El aire que ingresa a la caldera es controlado por medio de un lazo de control de retroalimentación con los siguientes elementos:

Tabla #9. Elementos para control del tiro forzado

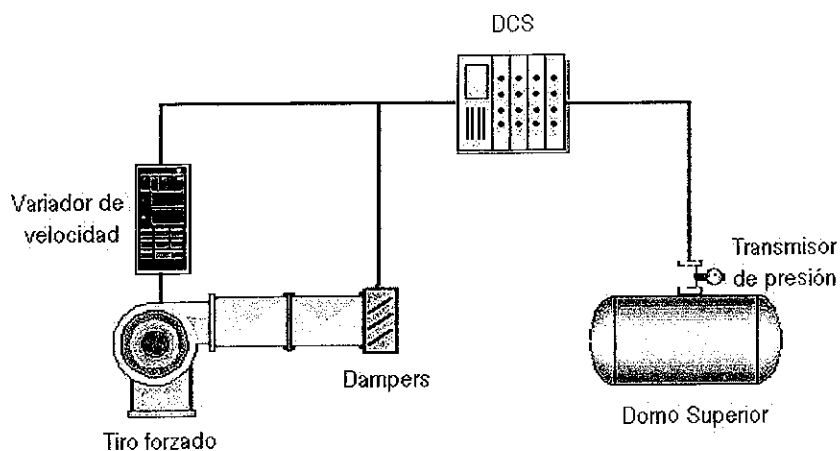
Acción	Instrumento
Medición	Transmisor de presión manométrica en la salida del vapor en el domo superior.
Decisión	DCS
Acción	Ventiladores regulados por variadores de velocidad y dampers.

Tanto el tiro forzado como el tiro inducido utilizan dampers y variadores de velocidad como elementos finales de control. El utilizar dampers y variadores de

velocidad se debe a que los variadores de velocidad únicamente pueden reducir la velocidad de los motores que impulsan los ventiladores a un 30% de su capacidad. Por lo tanto para demandas bajas de la caldera en las cuales la velocidad del motor es menor que el 30% se utilizan los dampers para regular la cantidad de aire. Cuando la demanda requiere velocidades mayores al 30% los dampers están completamente abiertos y los variadores de velocidad son los que regulan el flujo de aire.

El transmisor de presión en la salida de vapor en el domo superior mide la variable de proceso y envía una señal al controlador (DCS), el cual compara la variable con el punto de control, y envía una señal al variador de velocidad o a los dampers para que regulen la entrada de aire. Si la presión de vapor está por debajo del punto de control la caldera necesita quemar más combustible para elevar la presión y por lo tanto mayor cantidad de aire. Aquí se utiliza el mismo transmisor de presión que en los alimentadores de bagazo, o sea un transmisor manométrico de presión con un rango de 0-800 psiG.

Figura #84. Lazo de control para tiro forzado



5.2.5. Tiro inducido. El tiro inducido debe ser controlado para que los gases de combustión desalojen el hogar de la caldera en el tiempo adecuado. Si los gases de combustión desalojan la caldera muy rápido, estos no transfieren el calor

necesario al agua de la caldera para mantener la presión de trabajo de la misma. Si los gases de combustión desalojan la caldera muy lento pueden llegar a ahogar la caldera; lo cual significa que si existe una gran cantidad de gases dentro del hogar de la caldera no permiten que se realice la combustión debido a que no existe la presencia de oxígeno en el hogar.

La salida de los gases de combustión se regula dependiendo de la presión en el hogar de la caldera, la cual debe ser levemente negativa (vacío). El control del tiro inducido se realiza por medio de un lazo de control de retroalimentación con los siguientes elementos:

Tabla #10. Elementos para control del tiro inducido

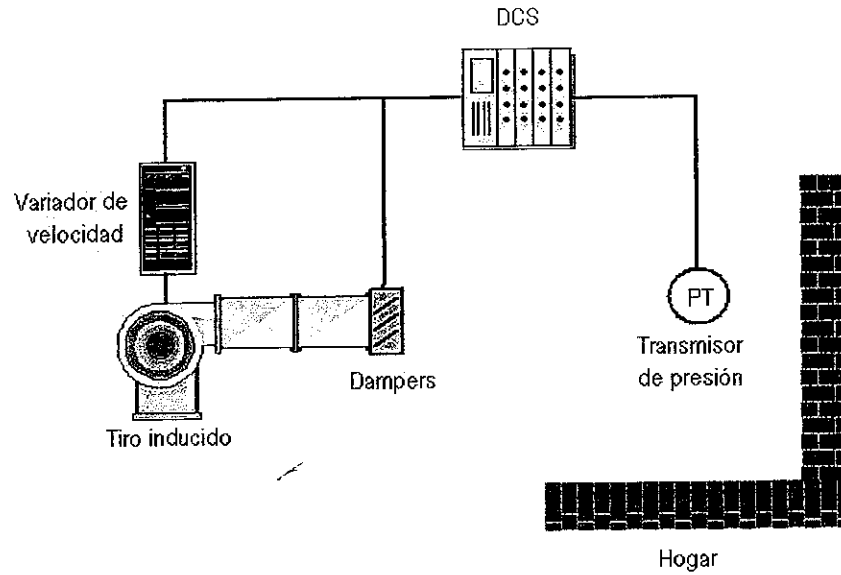
Acción	Instrumento
Medición	Transmisor de presión diferencial en el hogar de la caldera.
Decisión	DCS
Acción	Ventiladores regulados por variadores de velocidad y dampers.

El transmisor de presión en el hogar mide la variable de proceso y envía una señal al controlador (DCS), el cual compara el valor de la variable con el punto de control y dependiendo del error, envía una señal para disminuir o aumentar el flujo de los gases de escape por medio de los dampers o variadores de velocidad.

El tiro inducido extrae los gases de combustión del hogar, creando así vacío en el mismo, por lo que la presión en el hogar es una medida extremadamente pequeña.

Para calcular el transmisor de presión en el hogar se necesita saber la presión de operación en el hogar, la cual es de $-0.5''$ de agua, rango de 0-160 mbar.

Figura #85. Lazo de control para tiro inducido



5.2.6. Economizador y precalentador. Tanto en el economizador como en el precalentador se realizan medidas de presión y temperatura antes y después de cada uno para llevar un control en cuanto a la eficiencia de la caldera.

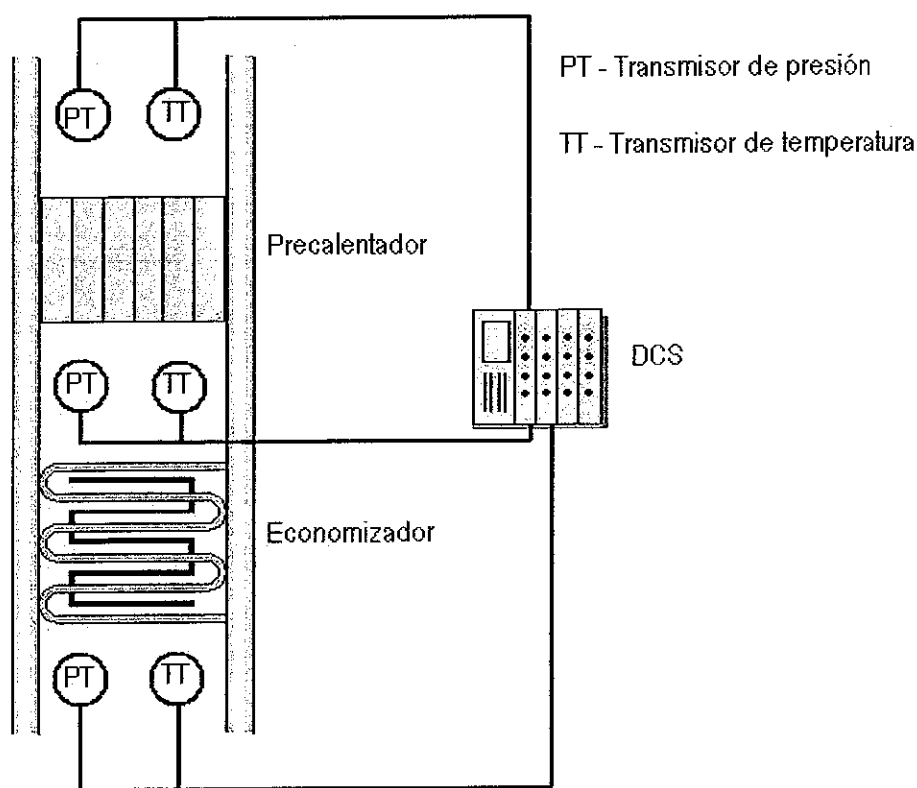
El control que se lleva en ambos casos es un control abierto en el que únicamente se toman medidas de presión y temperatura por medio de transmisores de presión y temperatura, los cuales llevan una señal al controlador (DCS) y este únicamente realiza los cálculos para grabar, graficar o crear históricos de la eficiencia de la caldera. Los elementos que se utilizan para el control del economizador y precalentador son los siguientes:

Cuadro #11. Elementos para control de economizador y precalentador

Acción	Instrumento
Medición	3 transmisores de presión diferencial: uno antes del economizador, otro en la salida del economizador (que equivale a la entrada del

	<p>precalentador) y por último otro en la salida del precalentador.</p> <p>3 transmisores de temperatura: uno antes del economizador, otro en la salida del economizador (que equivale a la entrada del precalentador) y por último otro en la salida del precalentador.</p>
Decisión	DCS
Acción	No aplica.

Figura #86. Lazo de control para economizador y precalentador



Los transmisores de presión diferencial a utilizar en los tres casos deben de tener un rango de mediciones que se encuentre entre -0.15 a 0 pulgadas de agua, por ejemplo un transmisor con un rango de -32 a 32" de agua.

5.2.6.1. Punto 1 (antes del precalentador de aire). El transmisor de temperatura a utilizar será una termocopla que depende de la temperatura. Debido a que la temperatura antes del precalentador de aire es de 1400 °F (760 °C) se utiliza una termocopla tipo K, según cuadro #4.

5.2.6.2. Punto 2 (después del precalentador de aire). El transmisor de temperatura a utilizar será una termocopla que depende de la temperatura. Debido a que la temperatura después del precalentador de aire es de 900 °F (482.22 °C) se utiliza una termocopla tipo K, según cuadro #4.

5.2.6.3. Punto 3 (después del economizador). El transmisor de temperatura a utilizar será una termocopla que depende de la temperatura. Debido a que la temperatura después del economizador es de 600 °F (315.56 °C) se utiliza una termocopla tipo J, según cuadro #4.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Las calderas son parte vital en un Ingenio Azucarero para su funcionamiento, ya que producen vapor para generar energía eléctrica y accionar diferente maquinaria y equipos en distintas áreas del Ingenio.
2. La automatización industrial provee los medios para el control de procesos industriales asegurando que los productos finales cumplan con estándares de calidad.
3. La optimización de una caldera de bagazo en un Ingenio Azucarero se logra mediante la automatización de la misma.
4. La automatización de una caldera de bagazo se debe realizar mediante un Sistema de Control Distribuido (DCS) para poder llevar un control análogo.
5. El nivel del domo superior es el punto más crítico a controlar en una caldera, es por esto que se deben utilizar varios sistemas de control para asegurarse que la caldera contenga el nivel de agua adecuado.
6. La operación de la caldera posee diferentes variables a controlar, las cuales se deben de automatizar para llevar un control sobre ellas.
7. Siendo la caldera una parte vital del Ingenio se debe automatizar al 100% las variables a controlar para así poder mejorar la eficiencia de la misma.
8. Cada variable de la caldera debe ser estudiada profundamente para que se escoja el equipo adecuado a implementar.

9. Este trabajo servirá de base para la implementación de un sistema de automatización en una caldera de bagazo en un Ingenio Azucarero.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Avallone, Eugene; T. Baumeister. 1995. *Manual del Ingeniero Mecánico*. Tomo I. Novena Edición. México. Editorial McGraw-Hill. 203 pp.
- Cengel, Yunus; M. Boles. 2000. *Termodinámica*. Tomo I. Segunda Edición. México. Editorial McGraw-Hill. 448 pp.
- Cengel, Yunus; M. Boles. 2000. *Termodinámica*. Tomo II. Segunda Edición. México. Editorial McGraw-Hill. 866 pp.
- Creus, Antonio. 1993. *Instrumentación Industrial*. Segunda Edición. México. Publicaciones Marcombo, S.A. 631 pp.
- Chen, James. 2000. *Manual del azúcar de caña*. Tercera reimpresión. México. Editorial Limusa, S. A. 1199 pp.
- Folletos de Instrumentación ISA (Instrumentation, System and Automation Society).
- Hugot, E. 1986. *Handbook of cane sugar engineering*. Tercera edición. Holanda. Elsevier Science Publishers B. V. 1165 pp.
- Mott, Robert. 1996. *Mecánica de fluidos aplicada*. Cuarta Edición. México. Editorial Prentice-Hall. 580 pp.

- Rosales, Robert C. 1998. *Manual del Ingeniero de Planta*. Tomo II. Segunda Edición. México. Editorial McGraw-Hill. 155 pp.
- Software FE-Sizer.
- www.fao.org
- <http://homepages.mty.itesm.mx>
- www.incae.ac.cr
- www.isa.org
- www.mooreproducts.com
- <http://monedagt.terra.com>
- www.rree.gob.sv
- www.sapiens.itgo.com
- www.sermatec.com.br

