

**IDENTIFICACIÓN Y RECOMENDACIONES PARA LA SOLUCIÓN DE
DEFICIENCIAS EN EL SISTEMA DE BOMBAS DEL INGENIO PROVIDENCIA
S.A.**

ALEJANDRO CLAVIJO VALBUENA

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE ENERGÉTICA Y MECÁNICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI
2008**

**IDENTIFICACIÓN Y RECOMENDACIONES PARA LA SOLUCIÓN DE
DEFICIENCIAS EN EL SISTEMA DE BOMBAS DEL INGENIO PROVIDENCIA
S.A.**

ALEJANDRO CLAVIJO VALBUENA

**Pasantía para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

**Director
NÉSTOR ARTURO PINCAY GORDILLO
Ingeniero mecánico
Especialista en diseño de maquinaria y equipo agroindustrial
Especialista en ciencias térmicas
Maestría en ingeniería mecánica con énfasis en energía**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE ENERGÉTICA Y MECÁNICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI
2008**

Nota de aceptación:

Aprobado por el Comité de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Autónoma de Occidente para optar al título de Ingeniero Mecánico

**NÉSTOR ARTURO PINCAY
GORDILLO
Jurado**

**NÉSTOR ARTURO PINCAY
GORDILLO
Director**

Santiago de Cali, 17 de Diciembre de 2008

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de grado primeramente a Dios que siempre está con migo y en segundo lugar a mi familia y a todas las personas que me colaboraron para poder llevar a buen término el presente trabajo de grado.

CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	18
INTRODUCCIÓN	19
1. MARCO TEORICO	20
1.1 MECANICA DE FLUIDOS	20
1.1.1 Conceptos fundamentales	20
1.1.1.1 Unidades	20
1.1.2 Propiedades de los fluidos	20
1.1.2.1 Definición de fluido	20
1.1.2.2 Densidad	21
1.1.2.3 Peso especifico	21
1.1.2.4 Viscosidad Dinámica	21
1.1.2.5 Viscosidad Cinemática	22
1.1.2.6 Presión	22
1.1.2.7 Presión como altura equivalente	22
1.1.2.8 Presión atmosférica	23
1.1.3 Hidrodinámica	25
1.1.3.1 fuerzas que actúan en un fluido	25
1.1.3.2 Ecuaciones diferenciales del movimiento de un fluido ideal	26
1.1.3.3 Ecuaciones de Euler	28

1.1.3.4 Ecuación de Bernoulli para el fluido ideal	32
1.1.4 Clasificación de las energías de un fluido	35
1.1.4.1 Ecuación de Bernoulli generalizada	35
1.1.4.2 Resistencia de los fluidos	36
1.1.4.3 Régimen laminar de un fluido	36
1.1.4.4 Régimen turbulento de un fluido	36
1.1.4.5 Número A dimensional de Reynolds	36
1.1.4.6 Pérdidas de superficie	37
1.1.4.7 Pérdidas de forma	39
1.2 MAQUINAS HIDRÁULICAS	39
1.2.1 Bombas	40
1.2.1.1 Partes constituyentes de una bomba roto dinámica	41
1.2.1.2 Tipos de bombas	42
1.2.1.3 Altura útil de una bomba	43
1.2.1.4 Pérdidas energéticas de una bomba	45
1.2.1.5 Rendimiento	45
1.2.1.6 NPSH requerida de la bomba	46
1.2.1.7 NPSH disponible de operación	46
1.2.1.8 Cavitación	47
1.2.1.9 Potencia requerida	47
1.2.1.10 Curvas características de las bombas	48
1.2.1.11 Curva de operación del sistema	49
1.2.1.12 Punto de operación de una bomba en un sistema	50

1.2.1.13 Velocidad variable en sistemas de bombeo	50
1.3 EL PROCESO DEL AZÚCAR	54
1.3.1 Cultivo de la caña	54
1.3.2 Molienda	54
1.3.3 Clarificación	55
1.3.4 Evaporación	55
1.3.5 Clarificación de la meladura	55
1.3.6 Filtración de la cachaza	55
1.3.7 Compostaje	55
1.3.8 Cristalización	55
1.3.9 Centrifugación	56
1.3.10 Secado	56
2. METODOLOGÍA DE TRABAJO	59
2.1 EVALUACIÓN	59
2.1.1 Identificación del objetivo del sistema dentro del proceso de producción	59
2.1.2 Recolección de datos de campo	60
2.1.2.1 Bomba	60
2.1.2.2 Motor	60
2.1.2.3 Acople Bomba – Motor	60
2.1.2.4 Condiciones del fluido de trabajo	60
2.1.2.5 Características de operación	60

2.1.3 Cálculos teóricos de operación	60
2.1.4 Recurso computacional	61
2.1.5 Simulación	61
2.2.6 Ejemplo	61
3. RESULTADOS	72
3.1 EVALUACION	72
3.1.1 Bomba Tromel	72
3.1.2 Bomba Báscula de Jugo	76
3.1.3 Bomba Tanque Encalado	80
3.1.4 Bomba jugo clarificado	85
3.1.5 Bomba Tanque Meladura no Clarificada	89
3.1.6 Bomba Tanque Meladura Clarificada	93
3.1.7 Bomba Recuperación Aguas Dulces	97
3.1.8 Bomba Mosto - Destilería	100
3.2. PROYECTOS	104
3.2.1. Sulfatación en caliente	104
3.2.1.1 Bascula de Jugo (1)	106
3.2.1.2. Tanque Jugo Encalado (1)	108
3.2.1.3. Bascula de jugo (2)	110
3.2.1.4. Tanque encalado (2)	111
3.2.2. Clarificación meladura de cuarto efecto	115
3.2.2.1. Sistema Tanque meladura Clarificada a 5 efecto- (Evaporadores)	117

3.2.2.2. Sistema Tanque Buffer (meladura clarificada)	120
3.2.2.3. Sistema Tanque sello	123
4. CONCLUSIONES	127
4.1 EVALUACION	127
4.1.1. Bomba Tromel	127
4.1.2. Bomba Báscula de Jugo	127
4.1.3. Bomba Tanque Encalado	127
4.1.4. Bomba jugo clarificado	128
4.1.5. Bomba Tanque Meladura no Clarificada	128
4.1.6. Bomba Tanque Meladura Clarificada	128
4.1.7. Bomba Recuperación Aguas Dulces	129
4.1.8. Bomba Mosto – Destilería	129
4.2 PROYECTOS	129
4.2.1. Sulfatación en caliente	129
4.2.1.1. Bascula de Jugo (2)	129
4.2.1.2. Tanque encalado (2)	130
4.2.2. Clarificación meladura de cuarto efecto	130
4.2.2.1. Sistema Tanque meladura Clarifica a 5 efecto-(Evaporadores)	130
4.2.2.2. Sistema Tanque Buffer (meladura clarificada)	130
4.2.2.3. Sistema Tanque sello	131
5. RECOMENDACIONES	132

5.1 EVALUACION	132
5.1.1. Bomba Tromel	132
5.1.2. Bomba Báscula de Jugo	132
5.1.3. Bomba Tanque Encalado	132
5.1.4. Bomba jugo clarificado	133
5.1.5. Bomba Tanque Meladura no Clarificada	133
5.1.6. Bomba Tanque Meladura Clarificada	133
5.1.7. Bomba Recuperación Aguas Dulces	134
5.1.8. Bomba Mosto – Destilería	134
5.2 PROYECTOS	134
5.2.1. Sulfatación en caliente	134
5.2.1.1. Bascula de Jugo (2)	134
5.2.1.2. Tanque encalado (2)	135
5.2.2. Clarificación meladura de cuarto efecto	135
5.2.2.1. Sistema Tanque meladura Clarifica a 5 efecto-(Evaporadores)	135
5.2.2.2. Sistema Tanque Buffer (meladura clarificada)	135
5.2.2.3. Sistema Tanque sello	136
BIBLIOGRAFÍA	137
ANEXOS	138

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Magnitudes y unidades fundamentales en el sistema internacional	20
Tabla 2. Ecuaciones de aceleración	27
Tabla 3. Ecuaciones de Euler sintetizadas	32
Tabla 4. Ecuaciones de Euler	32
Tabla 5. Descripción figura No. 19	58
Tabla 6. Diagrama de flujo de la metodología de trabajo	59
Tabla 7. Listado de accesorios a la succión (Sistema Bascula de Jugo)	67
Tabla 8. Listado de accesorios a la descarga (Sistema Bascula de jugo)	70
Tabla 9. Configuración válvulas figura No. 43	105
Tabla 10. Datos obtenidos comportamiento, Proyecto sulfatación en caliente (sistema tanque jugo encalado- Variador de Velocidad)	112
Tabla 11. Configuración válvulas figura No. 51	116

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Demostración altura equivalente	22
Figura 2. Dibujo esquemático, demostración presión atmosférica	23
Figura 3. Demostración fuerzas internas de un fluido, presión	26
Figura 4. Deducción de las ecuaciones de Euler	28
Figura 5. Demostración geométrica para la ecuación de Bernoulli	33
Figura 6. Representación grafica de la ecuación de Bernoulli generalizada, Energías	35
Figura 7. Representación grafica de los regímenes que presenta un fluido	36
Figura 8. Identificación del régimen de un fluido por su número A dimensional de Reynolds	37
Figura 9. Clasificación de las maquinas de fluidos	40
Figura 10. Bomba centrífuga, disposición, esquema y perspectiva	42
Figura11. Diagrama esquemático de un sistema de bombeo con Succión positiva	44
Figura 12. Curva característica de una bomba centrifuga	49
Figura 13. Curva de operación de un sistema de bombeo	49
Figura 14. Punto de operación de una bomba en un sistema de bombeo para un gasto constante	50
Figura 15. Comportamiento de la curva de operación, con válvula de control	51
Figura 16. Variador de velocidad en un sistema de bombeo	52

Figura 17. Variador de velocidad en un sistema de bombeo	52
Figura 18. Curva característica, Variador de velocidad en un sistema de bombeo	53
Figura 19. Diagrama de flujo del proceso del azúcar y sus derivados, ubicación de bombas críticas en el sistema	57
Figura 20. Foto del conjunto Bomba –Motor, sistema Bomba Tromel	72
Figura 21 .Curva de operación Sistema Tromel	74
Figura 22. Curva NPSH (d) Vs. Temperatura, Sistema Tromel	74
Figura 23. Foto del conjunto Bomba – Motor, sistema Báscula de Jugo	76
Figura 24. Curva de operación Sistema Báscula de Jugo	78
Figura 25. Curva NPSH (d) Vs. Temperatura, Sistema Báscula de Jugo	78
Figura 26. Foto del conjunto Bomba –Motor, sistema Tanque de Jugo Encalado	80
Figura 27. Dibujo esquemático de los Intercambiadores de calor, piro tubulares, primarios y secundarios, en paralelo y en serie	82
Figura 28 .Curva de Operación Sistema Tanque encalado	83
Figura 29. Curva NPSH (d) Vs. Temperatura, Sistema Tanque Encalado	83
Figura 30. Diagrama esquemático de un intercambiador de calor piro tubular	86
Figura 31. Curva de Operación Sistema Jugo Clarificado	87
Figura 32. Curva NPSH (d) Vs. Temperatura, Sistema Jugo Clarificado	87
Figura 33. Diagrama esquemático de un intercambiador de calor piro tubular	90

Figura 34. Curva de Operación Sistema Meladura No Clarificada	91
Figura 35. Curva NPSH (d) Vs. Temperatura, Sistema Meladura No Clarificada	91
Figura 36. Curva de Operación Sistema Meladura Clarificada	94
Figura 37. Curva NPSH (d) Vs. Temperatura, Sistema Meladura Clarificada	95
Figura 38. Representación de disipadores de calor en forma de aletas	96
Figura 39. Curva de Operación Sistema Recuperación Aguas Dulces	98
Figura 40. Curva NPSH (d) Vs. Temperatura, sistema Recuperación Aguas Dulces	99
Figura 41. Curva de Operación Sistema Mosto – Destilería	102
Figura 42. Curva NPSH (d) Vs. Temperatura, Sistema Mosto Destilería	103
Figura 43. Dibujo Esquemático, Proyecto Supresión del Calentamiento de la Meladura	105
Figura 44. Curva de Operación Sistema Báscula de Jugo, Proyecto Sulfatación en Caliente	107
Figura 45. Curva de Operación NPSH (D), Báscula de Jugo, Proyecto Sulfatación en Caliente	107
Figura 46. Curva de Operación Sistema Tanque Jugo Encalado, Proyecto Sulfatación en Caliente	109
Figura 47. Curva de Operación NPSH (D), Tanque Jugo Encalado, Proyecto Sulfatación en Caliente	109
Figura 48. Dibujo esquemático de la medición del porcentaje de nivel del Tanque de Jugo Encalado	113
Figura 49. Dibujo esquemático de la medición de los Amperios de entrada	113

Figura 50. Grafico de barras, datos obtenidos Proyecto Sulfatación en Caliente	114
Figura 51. Proyecto Clarificación Meladura de Cuarto Efecto	116
Figura 52. Curva de Operación Sistema Meladura Clarificada, Proyecto Clarificación Meladura De Cuarto Efecto	118
Figura 53. Curva de operación NPSH (d) Sistema Meladura Clarificada, Proyecto Clarificación Meladura de Cuarto Efecto	119
Figura 54. Curva de Operación Sistema Tanque Buffer, Proyecto Clarificación Meladura de Cuarto Efecto	121
Figura 55. Curva de NPSH (d), Sistema Tanque Buffer, Proyecto Clarificación Meladura de Cuarto Efecto	121
Figura 56. Curva de Operación Sistema Tanque Sello, Proyecto Clarificación Meladura de Cuarto Efecto	124
Figura 57. Curva de NPSH (d), Sistema Tanque Sello, Proyecto Clarificación Meladura de Cuarto Efecto	124
Figura 58. Representación de disipadores de calor en forma de aletas circulares para disminuir la temperatura de un fluido en un conducto.	134

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. Características de Superficie	138
ANEXO B. Características de forma, Contracción Brusca	139
ANEXO C. Características de forma, Unión en confluencia	140
ANEXO D. Características de forma, Contracción suave a 45°	141
ANEXO E. Características de forma, Contracción suave a 60° y 20°	142
ANEXO F. Características de forma, Ensanchamientos bruscos y suaves	143
ANEXO G. Características de forma, Uniones Tes en divergencia	144
ANEXO H. Características de forma, Codo a 90°	145
ANEXO I. Características de forma, Curva a 45°	146
ANEXO J. Características de forma, Codos por piezas	147
ANEXO K. Características de forma, Válvula de compuerta	148
ANEXO L. Características de forma, Válvula de mariposa	149
ANEXO M. Características de forma, Válvula de bola	150
ANEXO N. Viscosidad cinemática según temperatura del fluido y grado Brix	151
ANEXO Ñ. Presión de saturación del agua según Temperatura	152
ANEXO O. Presión atmosférica según altitud	154
ANEXO P. Densidad según grado Brix	155

ANEXO Q. Curvas Características, Bomba Wilfley A7 10 x 10	156
ANEXO R. Curvas Características, Bomba Wilfley HD 8 x 6	157
ANEXO S. Curvas Características, Bomba Wilfley HD 10 x 6	158
ANEXO T. Curvas Características, Bomba Worthington 5LR 15	159
ANEXO U. Curvas Características, Bomba Worthington 4LR 14	160
ANEXO V. Curvas Características, Bomba Aurora HC – 4C	161
ANEXO W. Curvas Características, Bomba Worthington 3CN- 104	162
ANEXO X. Curvas Características, Bomba Durco STD - A70	163
ANEXO Y. Curvas Características, Bomba Wilfley A7 6 x 4	164

RESUMEN

El Trabajo de Grado que se presenta a continuación, trata temas de actualidad y de gran importancia para las labores de ingeniería Mecánica en la industria. Más específicamente en el área de la industria azucarera del Valle del Cauca. Es importante tener en cuenta temas como mecánica de fluidos, máquinas hidráulicas, entre otros. En la industria azucarera debido a su gran extensión en el contexto de las plantas físicas que la componen, es de gran importancia el control de las eficiencias en los sistemas de bombeo, debido a su gran gasto energético. Para este efecto es necesario identificar áreas en donde se estén produciendo pérdidas energéticas, en función de la eficiencia de las Bombas de la fábrica. Y por medio de cálculos realizados en medios electrónicos (Software), lograr la identificación rápida efectiva de las posibles pérdidas energéticas.

INTRODUCCIÓN

A continuación se presenta el Trabajo de Grado llamado: "IDENTIFICACIÓN Y RECOMENDACIONES PARA LA SOLUCIÓN DE DEFICIENCIAS EN EL SISTEMA DE BOMBAS DEL INGENIO PROVIDENCIA S.A.". se identificaron en el Ingenio Providencia S.A. los sistemas de Bombeo más relevantes para su análisis energético, mas precisamente por medio de una hoja de cálculo en Software Excel ®, Microsoft ®, se tomaron los datos de campo de los sistemas en cuestión, se realizó la curva de operación de cada sistema de bombeo y se transpuso con la curva característica de cada bomba; obteniendo con todo esto el punto de operación de la bomba, en donde encontramos datos claves para evaluar, si las condiciones actuales de la bomba se encuentran en un estado eficiente. En dado caso que el sistema de bombeo presente deficiencias, se presentaron recomendaciones para aumentar la eficiencia del mismo.

1. MARCO TEORICO

1.1 MECÁNICA DE FLUIDOS

1.1.1 Conceptos fundamentales. Es muy importante tener bien definidos los conceptos básicos y profundos referentes a la Mecánica de Fluidos, para tal efecto se relacionan los conceptos que serán utilizados en el presente trabajo.

1.1.1.1 Unidades

Tabla 1. Magnitudes y unidades fundamentales en el sistema internacional*

Magnitud fundamental	Unidad fundamental		Dimensión
	Nombre	Símbolo	Magnitud
Masa	kilogramo	Kg	M
Longitud	metro	m	L
Tiempo	segundo	s	T
Temperatura	Kelvin	K	

1.1.2 Propiedades de los fluidos

1.1.2.1 Definición de fluido. Un fluido es cualquier sustancia que no puede mantener una deformación. Es decir, aquella materia que ofrece poca, o nula resistencia a las fuerzas tangenciales, o cortantes, que se le aplican. Esta descripción tiene que ver con la forma en que un material responde a las fuerzas externas, y se aplica tanto a líquidos como a gases. La capacidad de fluir hace que el fluido sea incapaz de soportar un esfuerzo cortante.

En términos muy generales, a las sustancias que presentan una resistencia muy pequeña, o nula, a ser deformados se les conoce como fluidos newtonianos, en tanto que, a las sustancias que presentan mayor resistencia se les llaman fluidos no newtonianos. Como un fluido es completamente deformable, toma la forma del recipiente que lo contiene. El recipiente ejerce una fuerza sobre el fluido, que es normal a la superficie, ya que cualquier componente tangencial ejercería una fuerza cortante sobre él y éste respondería deformándose hasta que desapareciera dicha fuerza.

* Claudio Mataix; MECANICA DE FLUIDOS Y MAQUINAS HIDRAULICAS, Alfaomega, 2005. p. 6.

1.1.2.2 Densidad. Densidad es una magnitud referida a la cantidad de masa contenida en un determinado volumen, y puede utilizarse en términos absolutos o relativos.

- Densidad absoluta

La densidad absoluta o densidad normal, expresa la masa por unidad de volumen. Cuando no se hace ninguna aclaración al respecto, el término «densidad» suele entenderse en el sentido de densidad absoluta. La densidad es una propiedad intensiva de la materia producto de dos propiedades extensivas e intensivas.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad : \quad [\rho] = [M][L]^{-3}$$

- Densidad Relativa

La densidad relativa o aparente expresa la relación entre la densidad de una sustancia y la densidad del agua, resultando una magnitud A dimensional.

$$\rho_r = \frac{\rho_{fluido}}{\rho_{agua}} \quad : \quad [\rho_r] = [M][L]^{-3}[M]^{-1}[L]^3 = 1$$

1.1.2.3 Peso específico. El peso específico de una sustancia se define como su peso por unidad de volumen. Se calcula al dividir el peso de la sustancia entre el volumen que ésta ocupa

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad : \quad [\gamma] = [M][L]^{-2}[T]^{-2}$$

Como:

$$W = mg$$

Entonces:

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g \quad : \quad [\gamma] = [M][L]^{-3}[L] [T]^{-2} = [M][L]^{-2} [T]^{-2}$$

1.1.2.4 Viscosidad Dinámica. Es aquella propiedad de un fluido que ejerce una resistencia a la deformación por esfuerzos cortantes dependiendo de la presión y la temperatura.

$$\eta = \frac{N s}{m^2} = \frac{\left(\frac{(kg)(m)}{s^2}\right) s}{m^2} = \frac{kg}{m s} \quad : \quad [\eta] = [F][T][L]^{-2} = [M][L][T]^{-2}[T][L]^{-2}$$

$$= [M][L]^{-1}[T]^{-1}$$

1.1.2.5 Viscosidad Cinemática. Relación entre la viscosidad dinámica y al densidad del fluido. Esta propiedad es de mucha importancia porque se aprecia en la práctica la fuerte influencia de la temperatura, hacia las propiedades de un fluido esto es por la densidad como variable dependiente de la temperatura.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} = \left(\frac{\left(\frac{N s}{m^2}\right)}{\frac{kg}{m^3}}\right) = \left(\frac{\left(\frac{(kg)(m)}{s^2}\right) s}{m^2} \frac{m^3}{kg}\right) = \frac{m^2}{s} \quad : \quad [\nu] = [L]^2[T]^{-1}$$

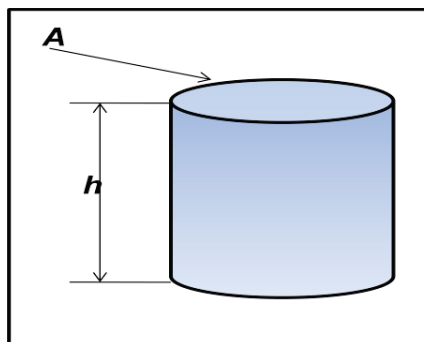
1.1.2.6 Presión. Fuerza ejercida debido a la acción de la gravedad en una unidad de masa por unidad de área.

$$P = \frac{W}{A} = \frac{N}{m^2} = \frac{\left(\frac{(kg)(m)}{s^2}\right)}{m^2} = \frac{kg}{m s^2} \quad : \quad [P] = [F][L]^{-2} = [M][L][T]^{-2}[L]^{-2}$$

$$= [M][T]^{-2}[L]^{-1}$$

1.1.2.7 Presión como altura equivalente. En la práctica se expresa con frecuencia la presión en altura equivalente de columna de un líquido determinado, pudiendo ser agua o mercurio, dependiendo de su densidad para una medición de presión o vacío convenientemente. A continuación se demuestra cómo se obtiene la altura equivalente, en la figura No. 1 se observa un cilindro de un fluido cuales quiera de donde se conoce su altura h y su área A .

Figura 1. Demostración Altura Equivalente



$$V = A h = (\text{Area})(\text{Altura}) = m^3$$

$$\rho = \frac{m}{V} \rightarrow m = \rho V$$

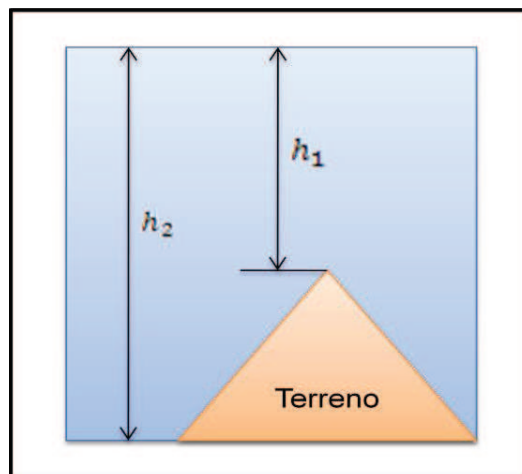
$$P = \frac{W}{A} = \frac{m g}{A} = \frac{\rho V g}{A} = \frac{\rho A h g}{A} = \rho h g$$

$$[P] = [M][L][T]^{-2}[L]^{-2} = [M][T]^{-2}[L]^{-1}$$

1.1.2.8 Presión atmosférica. Se denomina atmósfera a la capa de aire, constituida por una mezcla homogénea de gases que rodea al planeta. Su peso, origina sobre todos los cuerpos sumergidos en ella, una presión. Se podría hacer la analogía de un buzo a medida que desciende su cuerpo sufre una presión debido a la columna de agua por encima de él y entre mas se sumerge mayor será esta, análogamente tomando el aire como un fluido también a mayor altura de columna de este fluido que en el caso del planeta tierra se consideraría una zona geográfica donde se encuentra al nivel del mar, debido a que allí se encuentra la unión de dos grandes fluidos que es el aire y el agua.

Así como habíamos calculado la equivalencia de presión como altura equivalente en el mismo orden de razones a mayor altura del fluido, que este caso, sería el aire, mayor sería la presión en el punto de medición. En la figura No. 2 se observa un diagrama esquemático de lo que sería el planeta en donde existe un terreno elevado, el cual nos sirve para la demostración por su diferencia de altura.

Figura 2. Dibujo esquemático, demostración presión atmosférica



Sabemos:

$$P = \rho g h \rightarrow h = \frac{P}{\rho g}$$

$$h_1 = \frac{P_1}{\rho g_1} \quad ; \quad h_2 = \frac{P_2}{\rho g_2} *$$

$$h_1 < h_2$$

$$\frac{P_1}{\rho g_1} < \frac{P_2}{\rho g_2}$$

$$\frac{P_1}{g_1} < \frac{P_2}{g_2}$$

Según esto, concluimos que la presión es mayor a mayor altura de columna de aire y que la gravedad es mayor a medida que nos acercamos al centro de la tierra, pero para esto a continuación, se demuestra por medio de la Ley de Gravitación universal de "Isaac Newton"

$$F = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

Siendo:

$$d_1 = h_1 \quad ; \quad d_2 = h_2$$

$$g_1 = G \frac{m_1 m_2}{d_1^2} \quad ; \quad g_2 = G \frac{m_1 m_2}{d_2^2}$$

$$d_1 = \sqrt{\frac{g_1}{G m_1 m_2}} \quad ; \quad d_2 = \sqrt{\frac{g_2}{G m_1 m_2}}$$

$$d_1 > d_2$$

* Para esta demostración se toma la densidad en cualquier punto de la atmosfera igual, aunque esto en la realidad, no es válido, debido a que la densidad varía en función de la temperatura y de los elementos que componen atmósfera, la cual varía a medida que ascendemos hasta el espacio.

$$\sqrt{\frac{g_1}{G m_1 m_2}} > \sqrt{\frac{g_2}{G m_1 m_2}}$$

Donde:

m_1 = la masa del planeta tierra

m_2 = la masa de cualquier partícula independiente

G = La constante de Gravitación universal

Cancelamos términos iguales:

$$\frac{1}{g_1} > \frac{1}{g_2}$$

$g_2 > g_1$

Se pretendió profundizar en estos conceptos, debido, a que es de importancia tener en cuenta las condiciones de operación de un sistema en referencia a la altitud donde se trabaja.

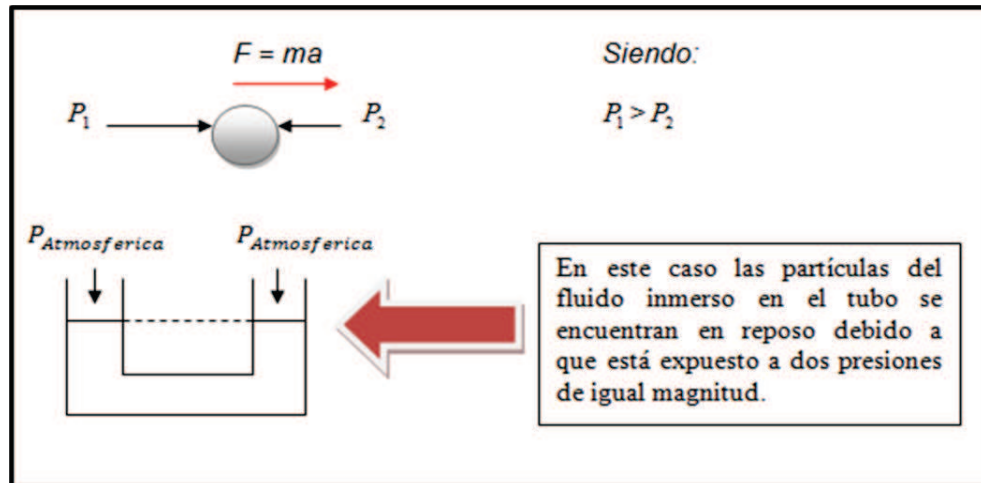
1.1.3 Hidrodinámica

1.1.3.1 Fuerzas Que Actúan En Un Fluido. Las fuerzas que actúan sobre un fluido son de dos clases; fuerzas externas y fuerzas internas

- Fuerzas externas
- Fuerza de gravedad (*Ley De Gravitación Universal. De Isaac Newton*)
- Fuerzas internas

Fuerza debida a un diferencial de presiones: En un diferencial de presiones se puede definir con la segunda ley de Newton que habla de que un cuerpo tiende a un estado de reposo, en consecuencia a esto, una partícula enfrentada a una situación de dos o más presiones diferentes, la partícula se dirigirá en dirección a la resultante de menor presión hasta encontrar su estado de reposo con una aceleración directamente proporcional a la sumatoria de presiones ejercidas.

Figura 3. Demostración fuerzas internas de un fluido, Presión



- Fuerza de viscosidad: Es nula en un fluido ideal.
- Fuerza de elasticidad: La fuerza de elasticidad no es tomada en cuenta en fluidos incompresibles.
- Tensión superficial: A continuación se deducirán las ecuaciones de Euler pero para tal efecto se necesitan tener ciertas consideraciones, las cuales son:

Fluido ideal

- Régimen permanente
- Solo actúan sobre el fluido la fuerza de gravedad y la fuerza debida al diferencial de presiones

1.1.3.2 Ecuaciones diferenciales del movimiento de un fluido ideal

- Aceleración

La aceleración se define como la derivada de la velocidad:

$$a = \frac{dV}{dt}$$

En general, la velocidad es función de la posición y del tiempo, esto es:

$$V = f(x, y, z, t).$$

La velocidad se puede descomponer en:

$$V = u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k}.$$

La derivada de la velocidad se puede escribir como:

$$dV = \frac{\partial V}{\partial x} dx + \frac{\partial V}{\partial y} dy + \frac{\partial V}{\partial z} dz + \frac{\partial V}{\partial t} dt$$

Luego:

$$a = \frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial V}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial V}{\partial z} \frac{dz}{dt} + \frac{\partial V}{\partial t}$$

Como se ha seguido a una partícula específica se tiene:

$$\frac{dx}{dt} = u \quad ; \quad \frac{dy}{dt} = v \quad ; \quad \frac{dz}{dt} = w$$

Luego,

$$\frac{dV}{dt} = u \frac{\partial V}{\partial x} + v \frac{\partial V}{\partial y} + w \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial V}{\partial t}$$

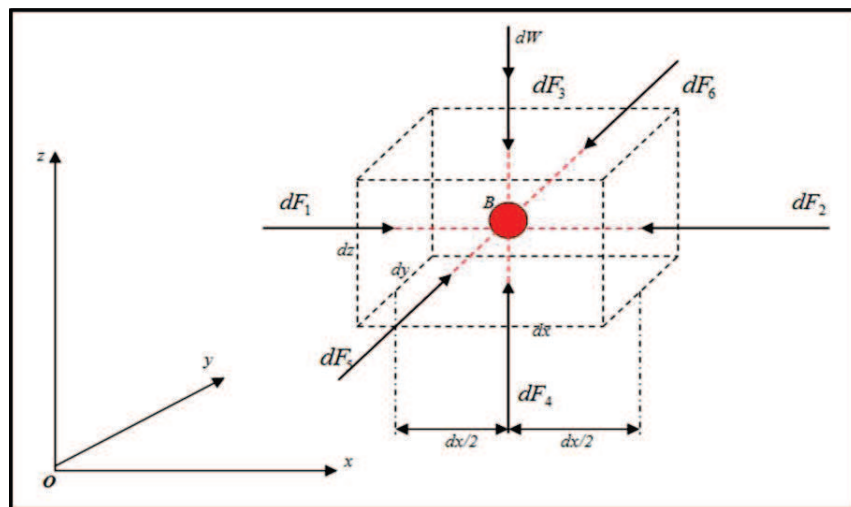
Las ecuaciones de componentes escalares para las coordenadas rectangulares son:

Tabla 2. Ecuaciones Aceleración

$\frac{dV_x}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}$
$\frac{dV_y}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}$
$\frac{dV_z}{dt} = \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z}$

1.1.3.3 Ecuaciones de Euler. Ahora se hallaran las ecuaciones de Euler para tal efecto se seguirá considerando un fluido ideal en régimen permanente, donde actúa la fuerza de gravedad y la fuerza por diferencial de presión. Consideremos un punto cualesquiera llamándolo B en el centro de un paralelepípedo rectangular de lados dx , dy , dz . En un eje de coordenadas cartesianas $O-(x, y, z)$.

Figura 4. Deducción de las ecuaciones de Euler



Las siguientes son las presiones ejercidas por el fluido al paralelepípedo aislado

$$P_1 = F_1 A_1 ; \quad P_2 = F_2 A_2 ; \quad P_3 = F_3 A_3 ; \quad P_4 = F_4 A_4 ; \quad P_5 = F_5 A_5 ; \quad P_6 = F_6 A_6$$

$$P = \frac{F}{A} \rightarrow F = PA$$

$$dF_1 = \left(P - \left(\frac{\partial P}{\partial X} \right) \left(\frac{dx}{2} \right) \right) dydz ; \quad dF_2 = \left(P + \left(\frac{\partial P}{\partial X} \right) \left(\frac{dx}{2} \right) \right) dydz$$

$$dW = dm(g) \quad ; \quad \rho = \frac{m}{V} \rightarrow m = \rho V \quad ; \quad dm = \rho(dx dy dz)$$

$$dW = \rho(dx dy dz)g$$

Realizamos la sumatoria de fuerzas en cada eje de coordenadas:

$$\sum F = ma \quad ; \quad d \sum F = dm \left(\frac{dV}{dt} \right)$$

$$d \sum F = \rho(dx dy dz) \left(\frac{dV}{dt} \right)$$

$$d \sum F_x = \rho(dx dy dz) \left(\frac{dV_x}{dt} \right)$$

$$dF_1 - dF_2 = \rho(dx dy dz) \left(\frac{dV_x}{dt} \right)$$

$$\left[P - \frac{\partial P}{\partial X} \left(\frac{dx}{2} \right) \right] dy dz - \left[P + \frac{\partial P}{\partial X} \left(\frac{dx}{2} \right) \right] dy dz = \rho(dx dy dz) \left(\frac{dV_x}{dt} \right)$$

$$\left[P dy dz - \frac{\partial P}{\partial X} \left(\frac{dx dy dz}{2} \right) \right] - \left[P dy dz + \frac{\partial P}{\partial X} \left(\frac{dx dy dz}{2} \right) \right] = \rho(dx dy dz) \left(\frac{dV_x}{dt} \right)$$

$$(P dy dz) - \left(\frac{\partial P}{\partial X} \left(\frac{dx dy dz}{2} \right) \right) - (P dy dz) - \left(\frac{\partial P}{\partial X} \left(\frac{dx dy dz}{2} \right) \right) = \rho(dx dy dz) \left(\frac{dV_x}{dt} \right)$$

Dividimos los dos lados de la igualdad por: $dm = \rho(dx dy dz)$

$$\begin{aligned} & \left(\frac{P dy dz}{\rho(dx dy dz)} \right) - \left(\frac{\partial P}{\partial X} \left(\frac{dx dy dz}{2} \right) \left(\frac{1}{\rho(dx dy dz)} \right) \right) - \left(\frac{P dy dz}{\rho(dx dy dz)} \right) - \left(\frac{\partial P}{\partial X} \left(\frac{dx dy dz}{2} \right) \left(\frac{1}{\rho(dx dy dz)} \right) \right) \\ & = \left(\frac{\rho(dx dy dz)}{\rho(dx dy dz)} \right) \left(\frac{dV_x}{dt} \right) \end{aligned}$$

Simplificamos:

$$\left(\frac{P}{\rho dx} \right) - \left(\frac{\partial P}{\partial X} \left(\frac{1}{2\rho} \right) \right) - \left(\frac{P}{\rho dx} \right) - \left(\frac{\partial P}{\partial X} \left(\frac{1}{2\rho} \right) \right) = \left(\frac{dV_x}{dt} \right)$$

$$-\frac{\partial P}{\partial X} \left(\frac{1}{2\rho} \right) - \frac{\partial P}{\partial X} \left(\frac{1}{2\rho} \right) = \left(\frac{dV_x}{dt} \right)$$

$$-\left(\frac{\partial P}{\partial X}\right)\left(\frac{1}{\rho}\right) = \left(\frac{dV_x}{dt}\right)$$

$$d \sum F_y = \rho(dx dy dz) \left(\frac{dV_y}{dt}\right)$$

$$dF_5 - dF_6 = \rho(dx dy dz) \left(\frac{dV_y}{dt}\right)$$

$$\left[P - \frac{\partial P}{\partial Y} \left(\frac{dy}{2}\right) \right] dx dz - \left[P + \frac{\partial P}{\partial Y} \left(\frac{dy}{2}\right) \right] dx dz = \rho(dx dy dz) \left(\frac{dV_y}{dt}\right)$$

$$\left[P dx dz - \frac{\partial P}{\partial Y} \left(\frac{dx dy dz}{2}\right) \right] - \left[P dx dz + \frac{\partial P}{\partial Y} \left(\frac{dx dy dz}{2}\right) \right] = \rho(dx dy dz) \left(\frac{dV_y}{dt}\right)$$

$$(P dx dz) - \left(\frac{\partial P}{\partial Y} \left(\frac{dx dy dz}{2}\right)\right) - (P dx dz) - \left(\frac{\partial P}{\partial Y} \left(\frac{dx dy dz}{2}\right)\right) = \rho(dx dy dz) \left(\frac{dV_y}{dt}\right)$$

Dividimos los dos lados de la igualdad por: $dm = \rho(dx dy dz)$

$$\left(\frac{P dx dz}{\rho(dx dy dz)}\right) - \left(\frac{\partial P}{\partial Y} \left(\frac{dx dy dz}{2}\right) \left(\frac{1}{\rho(dx dy dz)}\right)\right) - \left(\frac{P dx dz}{\rho(dx dy dz)}\right) - \left(\frac{\partial P}{\partial Y} \left(\frac{dx dy dz}{2}\right) \left(\frac{1}{\rho(dx dy dz)}\right)\right) =$$

$$\left(\frac{\rho(dx dy dz)}{\rho(dx dy dz)}\right) \left(\frac{dV_y}{dt}\right)$$

Simplificamos:

$$\left(\frac{P}{\rho dy}\right) - \left(\frac{\partial P}{\partial Y} \left(\frac{1}{2\rho}\right)\right) - \left(\frac{P}{\rho dy}\right) - \left(\frac{\partial P}{\partial Y} \left(\frac{1}{2\rho}\right)\right) = \left(\frac{dV_y}{dt}\right)$$

$$-\frac{\partial P}{\partial Y} \left(\frac{1}{2\rho}\right) - \frac{\partial P}{\partial Y} \left(\frac{1}{2\rho}\right) = \left(\frac{dV_y}{dt}\right)$$

$$-\left(\frac{\partial P}{\partial Y}\right) \left(\frac{1}{\rho}\right) = \left(\frac{dV_y}{dt}\right)$$

$$d \sum F_z = \rho(dx dy dz) \left(\frac{dV_z}{dt} \right)$$

Para este eje en particular también actúa una fuerza externa que es el peso por acción de la gravedad (dW)

$$dF_3 - dF_4 - dW = \rho(dx dy dz) \left(\frac{dV_z}{dt} \right)$$

$$\left[P - \frac{\partial P}{\partial Z} \left(\frac{dz}{2} \right) \right] dx dy - \left[P + \frac{\partial P}{\partial Z} \left(\frac{dz}{2} \right) \right] dx dy - [\rho(dx dy dz) g] = \rho(dx dy dz) \left(\frac{dV_z}{dt} \right)$$

$$\left[P dx dy - \frac{\partial P}{\partial Z} \left(\frac{dx dy dz}{2} \right) \right] - \left[P dx dy + \frac{\partial P}{\partial Z} \left(\frac{dx dy dz}{2} \right) \right] - [\rho(dx dy dz) g] = \rho(dx dy dz) \left(\frac{dV_z}{dt} \right)$$

$$(P dx dy) - \left(\frac{\partial P}{\partial Z} \left(\frac{dx dy dz}{2} \right) \right) - (P dx dy) - \left(\frac{\partial P}{\partial Z} \left(\frac{dx dy dz}{2} \right) \right) - [\rho(dx dy dz) g] = \rho(dx dy dz) \left(\frac{dV_z}{dt} \right)$$

Dividimos los dos lados de la igualdad por: $dm = \rho(dx dy dz)$

$$\left(\frac{P dx dy}{\rho(dx dy dz)} \right) - \left(\frac{\partial P}{\partial Z} \left(\frac{dx dy dz}{2} \right) \left(\frac{1}{\rho(dx dy dz)} \right) \right) - \left(\frac{P dx dy}{\rho(dx dy dz)} \right) - \left(\frac{\partial P}{\partial Z} \left(\frac{dx dy dz}{2} \right) \left(\frac{1}{\rho(dx dy dz)} \right) \right) -$$

$$\left(\frac{\rho(dx dy dz) g}{\rho(dx dy dz)} \right) = \rho(dx dy dz) \left(\frac{dV_z}{dt} \right)$$

Simplificamos:

$$\left(\frac{P}{\rho dz} \right) - \left(\frac{\partial P}{\partial Z} \left(\frac{1}{2\rho} \right) \right) - \left(\frac{P}{\rho dz} \right) - \left(\frac{\partial P}{\partial Z} \left(\frac{1}{2\rho} \right) \right) - g = \left(\frac{dV_z}{dt} \right)$$

$$-\frac{\partial P}{\partial Z} \left(\frac{1}{2\rho} \right) - \frac{\partial P}{\partial Y} \left(\frac{1}{2\rho} \right) - g = \left(\frac{dV_y}{dt} \right)$$

$$-\left(\frac{\partial P}{\partial Z} \right) \left(\frac{1}{\rho} \right) - g = \left(\frac{dV_z}{dt} \right)$$

Como resultado nos general nos queda:

Tabla 3. Ecuaciones de Euler sintetizadas

$$\begin{aligned} -\left(\frac{\partial P}{\partial X}\right)\left(\frac{1}{\rho}\right) &= \left(\frac{dV_x}{dt}\right) \\ -\left(\frac{\partial P}{\partial Y}\right)\left(\frac{1}{\rho}\right) &= \left(\frac{dV_y}{dt}\right) \\ -\left(\frac{\partial P}{\partial Z}\right)\left(\frac{1}{\rho}\right) - g &= \left(\frac{dV_z}{dt}\right) \end{aligned}$$

Y teniendo las ecuaciones Euler para la aceleración, reemplazamos en las ecuaciones anteriores

Tabla 4. Ecuaciones de Euler

$$\begin{aligned} -\left(\frac{\partial P}{\partial X}\right)\left(\frac{1}{\rho}\right) &= \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial X} + v \frac{\partial u}{\partial Y} + w \frac{\partial u}{\partial Z} \\ -\left(\frac{\partial P}{\partial Y}\right)\left(\frac{1}{\rho}\right) &= \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial X} + v \frac{\partial v}{\partial Y} + w \frac{\partial v}{\partial Z} \\ -\left(\frac{\partial P}{\partial Z}\right)\left(\frac{1}{\rho}\right) - g &= \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial X} + v \frac{\partial w}{\partial Y} + w \frac{\partial w}{\partial Z} \end{aligned}$$

1.1.3.4 Ecuación de Bernoulli para el fluido ideal. Tenemos ya las ecuaciones de Euler para un fluido ideal en régimen permanente.

Ahora cada ecuación la multiplicamos por la diferencial de su eje en el espacio (dx, dy, dz):

$$\begin{aligned} dx \left[-\left(\frac{\partial P}{\partial X}\right)\left(\frac{1}{\rho}\right) \right] &= \left(\frac{dV_x}{dt}\right) dx \\ dy \left[-\left(\frac{\partial P}{\partial Y}\right)\left(\frac{1}{\rho}\right) \right] &= \left(\frac{dV_y}{dt}\right) dy \\ dz \left[-g - \left(\frac{\partial P}{\partial Z}\right)\left(\frac{1}{\rho}\right) \right] &= \left(\frac{dV_z}{dt}\right) dz \end{aligned}$$

Ahora sumamos los miembros de las tres ecuaciones para que nos quede una

sola:

$$\begin{aligned} dx \left[-\left(\frac{\partial P}{\partial X}\right) \left(\frac{1}{\rho}\right) \right] + dy \left[-\left(\frac{\partial P}{\partial Y}\right) \left(\frac{1}{\rho}\right) \right] + dz \left[-g - \left(\frac{\partial P}{\partial Z}\right) \left(\frac{1}{\rho}\right) \right] \\ = \left(\frac{dV_x}{dt}\right) dx + \left(\frac{dV_y}{dt}\right) dy + \left(\frac{dV_z}{dt}\right) dz \end{aligned}$$

Dado:

$$\frac{dx}{dt} = V_x \quad ; \quad \frac{dy}{dt} = V_y \quad ; \quad \frac{dz}{dt} = V_z$$

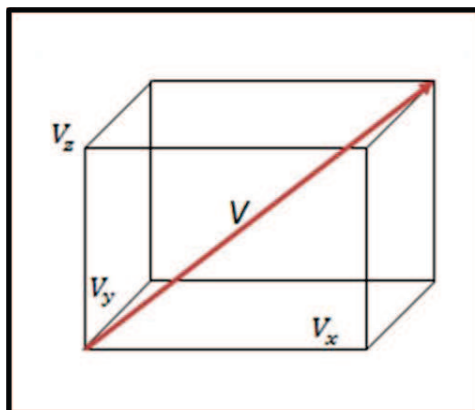
Entonces:

$$dx \left[-\left(\frac{\partial P}{\partial X}\right) \left(\frac{1}{\rho}\right) \right] + dy \left[-\left(\frac{\partial P}{\partial Y}\right) \left(\frac{1}{\rho}\right) \right] + dz \left[-g - \left(\frac{\partial P}{\partial Z}\right) \left(\frac{1}{\rho}\right) \right] = dV_x V_x + dV_y V_y + dV_z V_z$$

$$dx \left[-\left(\frac{\partial P}{\partial X}\right) \left(\frac{1}{\rho}\right) \right] + dy \left[-\left(\frac{\partial P}{\partial Y}\right) \left(\frac{1}{\rho}\right) \right] + dz \left[-g - \left(\frac{\partial P}{\partial Z}\right) \left(\frac{1}{\rho}\right) \right] = \frac{1}{2} d(V_x^2 + V_y^2 + V_z^2)$$

El cuadrado de la diagonal de un paralelepípedo es igual a la suma de los cuadrados de sus aristas

Figura 5. Demostración geométrica para la ecuación de Bernoulli



$$V^2 = V_x^2 + V_y^2 + V_z^2$$

Por tanto:

$$dx \left[- \left(\frac{\partial P}{\partial X} \right) \left(\frac{1}{\rho} \right) \right] + dy \left[- \left(\frac{\partial P}{\partial Y} \right) \left(\frac{1}{\rho} \right) \right] + dz \left[-g - \left(\frac{\partial P}{\partial Z} \right) \left(\frac{1}{\rho} \right) \right] = \frac{1}{2} d(V^2)$$

Factorizamos:

$$-g dz - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\partial P}{\partial Z} \right) = \frac{1}{2} d(V^2)$$

Debido a que el régimen es permanente la presión no está en función del tiempo por lo tanto:

$$dP = \frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\partial P}{\partial Z}$$

Al final la ecuación queda:

$$-g dz - \frac{dP}{\rho} = \frac{1}{2} d(V^2)$$

Agrupamos:

$$g dz + \frac{dP}{\rho} + \frac{1}{2} d(V^2) = 0$$

Ahora integramos dos puntos cualesquiera de la trayectoria del fluido ideal incompresible en régimen permanente, teniendo como constante la gravedad (g) y la densidad (ρ)

$$\int_2^1 \left(g dz + \frac{dP}{\rho} + \frac{1}{2} d(V^2) \right) dt = g z_1 + \frac{P_1}{\rho} + \frac{1}{2} V_1^2 - g z_2 + \frac{P_2}{\rho} + \frac{1}{2} V_2^2$$

Ya que los puntos 1 y 2 pertenecen a la línea del fluido entonces:

$$\int_2^1 \left(g dz + \frac{dP}{\rho} + \frac{1}{2} d(V^2) \right) dt = g z_1 + \frac{P_1}{\rho} + \frac{1}{2} V_1^2 - g z_2 + \frac{P_2}{\rho} + \frac{1}{2} V_2^2$$

$$g z_1 + \frac{P_1}{\rho} + \frac{1}{2} V_1^2 = g z_2 + \frac{P_2}{\rho} + \frac{1}{2} V_2^2$$

1.1.4 Clasificación de las energías de un fluido. Energía es la capacidad de un cuerpo de realizar un trabajo mecánico

$$[E] = [F][L] = [M][L]^{-3}[T]^{-2}[L] = [M][L]^{-2}[T]^{-2}$$

$$1 \text{ Joule} = 1 \text{ Newton} * \text{Metro} = 1 \left(\frac{\text{kilogramo metro}^2}{\text{segundo}^2} \right)$$

En Mecánica de Fluidos la mayoría de los libros prefieren utilizar la energía específica la cual conocemos como:

$$[e] = \frac{[E]}{[M]} = [L]^2[T]^{-2}$$

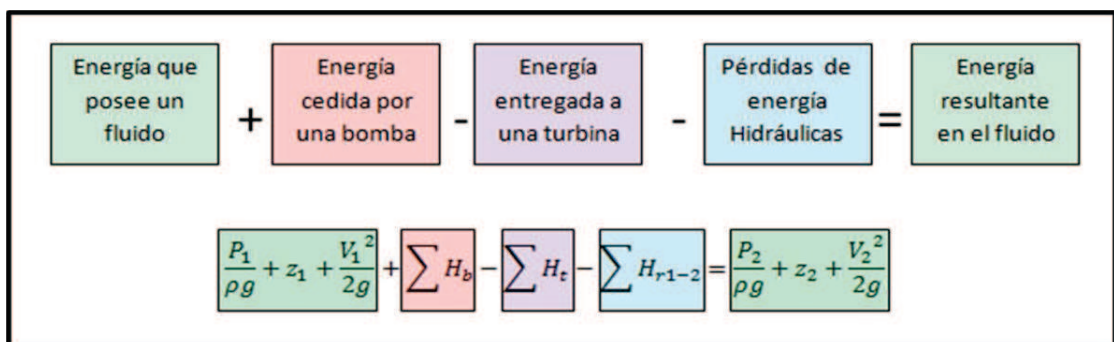
Entonces la energía específica que una bomba entrega a un fluido se define como la energía por cada unidad de masa del fluido que pasa por ella:

$$1 e = 1 \frac{J}{kg} = 1 \frac{m^2}{s^2}$$

1.1.4.1 Ecuación de Bernoulli generalizada. Realizando un balance de energía entre dos puntos de posición, de un hilo de corriente y asumiendo un fluido ideal incompresible en régimen permanente, tenemos:

(Energía que posee un fluido) + (Energía cedida por una bomba) – (Energía entregada a una turbina) – (Energía perdida por características de forma y superficie) = (Energía resultante en el fluido)

Figura 6. Representación grafica de la ecuación de Bernoulli generalizada, energías.

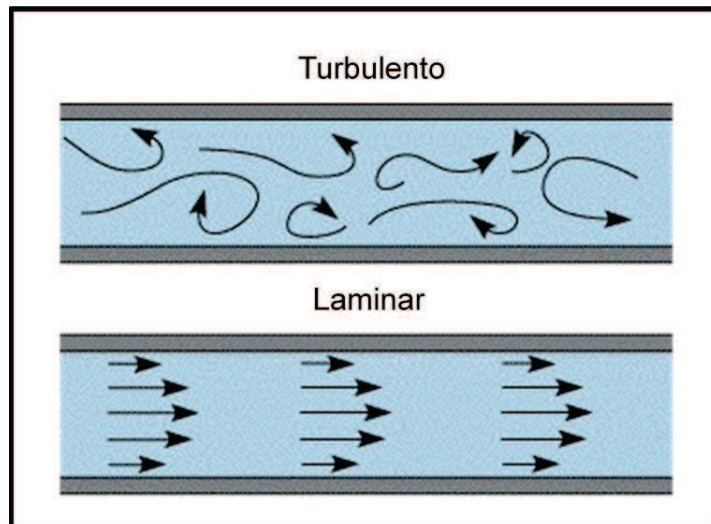


1.1.4.2 Resistencia de los fluidos. Hasta ahora se había asumido un fluido ideal (viscosidad = 0) e incompresible, pero para el análisis reales de fluido es importante considerar la viscosidad de un fluido para tal efecto se relacionaran aspectos relevantes concernientes a la resistencia de los fluidos.

1.1.4.3 Régimen laminar de un fluido. Se llama régimen laminar, al tipo de movimiento de un fluido cuando éste es perfectamente ordenado, estratificado, de manera que el fluido se mueve en láminas paralelas sin entremezclarse si la corriente tiene lugar entre dos planos paralelos, o en capas cilíndricas coaxiales como, por ejemplo la glicerina en un tubo de sección circular. Las capas no se mezclan entre sí. El mecanismo de transporte es exclusivamente molecular.

1.1.4.4 Régimen turbulento de un fluido. Se llama régimen turbulento, al movimiento de un fluido que se da en forma caótica, en que las partículas se mueven desordenadamente y las trayectorias de las partículas se encuentran formando pequeños remolinos aperiódicos, como por ejemplo el agua en un canal de gran pendiente. Debido a esto, la trayectoria de una partícula se puede predecir hasta una cierta escala, a partir de la cual la trayectoria de la misma es impredecible, más precisamente caótica.

Figura 7. Representación grafica de los regímenes que presenta un fluido



1.1.4.5 Número A dimensional de Reynolds. El número de Reynolds es un número A dimensional utilizado en mecánica de fluidos, para caracterizar el movimiento de un fluido.

Como todo número A dimensional es un cociente, una comparación. En este caso es la relación entre los términos convectivos y los términos viscosos de las ecuaciones de Navier-Stokes que gobiernan el movimiento de los fluidos. El número de Reynolds permite predecir el carácter turbulento o laminar en ciertos casos. Así por ejemplo en conductos si el número de Reynolds es menor de 2000 el flujo será laminar y si es mayor de 4000 el flujo será turbulento, si se encuentra en medio se conoce como flujo transicional y su comportamiento no puede ser modelado. El mecanismo y muchas de las razones por las cuales un flujo es laminar o turbulento es todavía hoy objeto de especulación.

$$Re = \frac{V D}{\nu}$$

Donde:

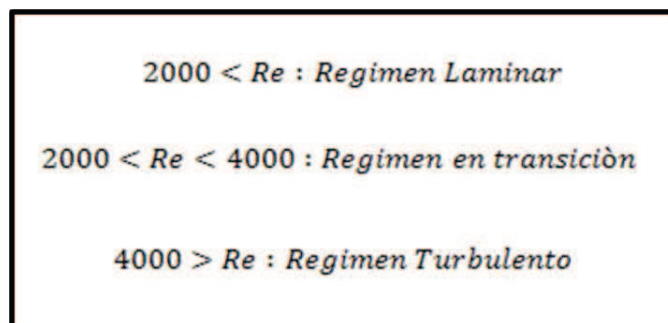
Re: Número de Reynolds

V : Velocidad media del fluido

D : Diámetro nominal de la tubería

ν : Viscosidad cinemática

Figura 8. Identificación del régimen de un fluido por su número A dimensional de Reynolds



1.1.4.6 Pérdidas de superficie. También llamadas pérdidas primarias, son aquellas relacionadas íntimamente con el material de la tubería o conducto que transporta el fluido, el acabado en la superficie de contacto de esta con el fluido es un factor medible y crítico dependiendo de variables como el régimen del fluido, longitud de la tubería, etc.

- Ecuación de Darcy Weisbach: esta ecuación nos sirve para calcular la carga de pérdida primaria y se expresa:

$$H_{rp} = \lambda \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{V^2}{2g} \right)$$

Donde:

H_{rp} : Pérdida de carga primaria

λ : Coeficiente de pérdida de carga primaria

L : Longitud de la tubería

D : Diámetro de la tubería

V : Velocidad media del fluido

- Régimen turbulento

$$\lambda = f(v, V, D, k)$$

$$\lambda = f\left(Re, \frac{k}{D}\right)$$

Donde:

k : Coeficiente de rugosidad Absoluta del material de una tubería

- Ecuación de Colebrook - White: esta ecuación nos sirve para encontrar el coeficiente de pérdida primaria λ para regímenes transición y turbulentos.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log_{10} \left(\frac{k/D}{3,7} + \frac{2,51}{R\sqrt{\lambda}} \right)$$

Nota: para el cálculo del coeficiente de rugosidad absoluta del material de la tubería, es usado ampliamente tablas que hace relación al material de la tubería.*

- Para régimen laminar

$$\lambda = 0$$

* Ver anexo1, pág. 132

- Ecuación de Poiseuille

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

1.1.4.7 Pérdidas de forma. También llamadas pérdidas secundarias son aquellas relacionadas íntimamente como su nombre lo indica de la forma del ducto en que se transporta el fluido, esto es cuando por efecto de accesorios como válvulas, codos, medidores de presión, etc., el fluido presenta resistencia en proporción al cambio brusco del ducto (tubería).

Ecuación fundamental de las pérdidas secundarias:

$$H_{rs} = \zeta \left(\frac{V^2}{2g} \right)$$

Donde:

ζ : Coeficiente de pérdida secundaria

Nota: para el cálculo de los coeficientes de pérdida secundaria es usado ampliamente tablas que hacen referencia a los accesorios que pueda tener un sistema.*

1.2 MAQUINAS HIDRÁULICAS

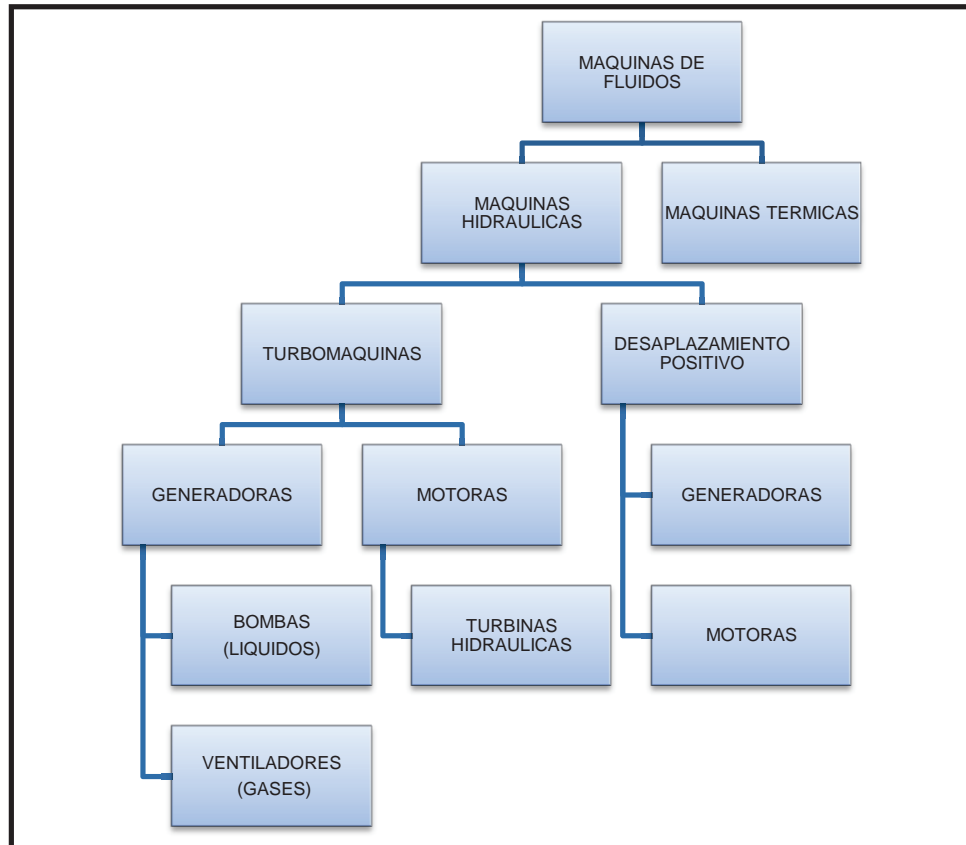
Podemos definir una máquina como un elemento de transformación de energía, esto es que la máquina recibe una forma de energía y entrega otras formas de energía, por ejemplo un motor eléctrico recibe energía eléctrica y esta la transforma en energía mecánica mas otra forma de energía como calor, la eficiencia de dicho motor está definida por el porcentaje de energía entregada – energía mecánica- en relación con la recibida- energía eléctrica-, como antes se menciono el motor eléctrico no solo entrega energía mecánica, si no, que también entrega energía en forma de calor, esta porción de energía es la que se puede decir que se pierde al medio y no es restituida. Cabe añadir que la energía no se crea ni se destruye solo se transforma**.

* Ver anexo 2, pág. 133-144

** Primera Ley de la termodinámica.

Para nuestro caso las maquinas que nos interesan son las maquinas de fluido y específicamente, maquinas hidráulicas, a continuación cuadro general de la distribución de las maquinas de fluido.

Figura 9. Clacificacion de las maquinas de fluidos



1.2.1 Bombas. Una bomba es una máquina que recibe energía mecánica y la transforma en energía hidráulica la cual es entregada al fluido que la atraviesa. Las bombas se clasifican en bombas roto dinámicas y bombas de desplazamiento positivo.

- Bombas roto dinámicas, en las que el principio de funcionamiento está basado en el intercambio de cantidad de movimiento entre la máquina y el fluido, aplicando la hidrodinámica. En este tipo de bombas hay uno o varios rodets con álabes que giran generando un campo de presiones en el fluido. En este tipo de máquinas el flujo del fluido es continuo. Estas turbo

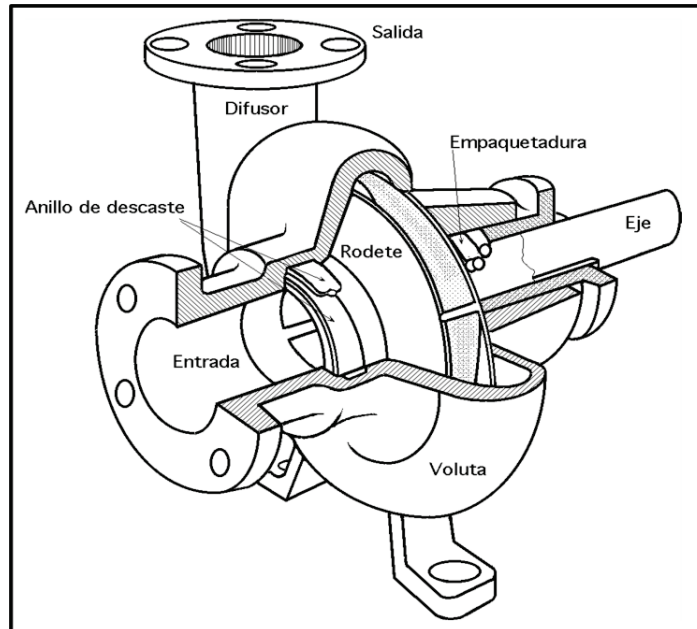
máquinas hidráulicas generadoras pueden subdividirse en:

- Bombas Radiales o centrífugas, cuando el movimiento del fluido sigue una trayectoria perpendicular al eje del rodete impulsor.
- Bombas Axiales, cuando el fluido pasa por los canales de los álabes siguiendo una trayectoria contenida en un cilindro.
- Bombas Diagonales o helico centrífugas, cuando la trayectoria del fluido se realiza en otra dirección entre las anteriores, es decir, en un cono coaxial con el eje del rodete.

1.2.1.1 Partes constituyentes de una bomba roto dinámica.

- Rodete, elemento que gira por medio de una energía mecánica el cual consta de unos alabes determinados, los cuales por su disposición entregan al fluido que ingresa a la bomba energía cinética y energía de presión.
- Corona directriz, similar al rodete con la diferencia que esta se encuentra estática, también realiza contacto directo con el fluido que atraviesa la bomba convirtiendo la energía cinética que el fluido ya posee por acción del rodete en energía de presión, todo lo anterior debido a la disposición geométrica de los alabes.
- Caracol o voluta, elemento que contiene al rodete y a la corona directriz es el encargado también de recoger la energía cinética que ha adquirido el fluido por medio del rodete y convertirla en energía de presión.
- Tubo difusor, último elemento en contacto con el fluido en cuestión, de forma cónica, es el encargado de conducir el fluido fuera de la bomba y por su disposición geométrica cónica recoge la energía cinética que lleva el fluido y la transforma en energía de presión.

Figura 10. Bomba centrífuga, disposición, esquema y perspectiva*



1.2.1.2 Tipos de bombas. Bomba de carcasa seccionada, son aquellas que se encuentran divididas por un plano horizontal, esto es muy beneficioso a la hora de reparaciones debido a que no es tocada la alineación del rodete.

- Bomba monobloc, son aquellas constituidas por el grupo bomba motor, en general son pequeñas y son utilizadas para desplazarlas fácilmente, el acople del motor con la bomba es directo.
- Bomba de doble aspiración, son aquellas donde el fluido ingresa a la bomba por dos partes extremas y así mismo ingresan al rodete.
- Bomba axial, son aquellas como su nombre lo indica en donde la dirección de entrada del fluido a la bomba es la misma dirección de salida de la bomba, en otras palabras el fluido ingresa paralelo al eje de impulsión y sale de la misma forma.

* Fernández Díez, Pedro. BOMBAS CENTRÍFUGAS Y VOLUMÉTRICAS, Departamento De Ingeniería Eléctrica Y Energética Universidad De Cantabria. p. 3.

- Bomba horizontal de múltiples escalonamientos, estas bombas son constituidas por dos o más rodetes los cuales aumentan considerablemente la altura útil de la bomba un ejemplo es considerar dos bombas puestas en serie.
- Bomba vertical de múltiples escalonamientos, como la horizontal poseen dos o más rodetes en serie y su disposición es vertical.
- Bomba de pozo profundo, como su nombre lo indica es utilizada en pozos, en donde la bomba es sumergida en el pozo y el otro se encuentra en la parte exterior, el acople por lo general es directo por medio de un eje largo.
- Grupo moto-bomba sumergible, este tipo de bomba también es utilizada en pozos con la gran diferencia que el motor también se sumerge en pozo.

1.2.1.3 Altura útil de una bomba. Como sabemos según Bernoulli:

$$\frac{P_1}{\rho g} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + \sum H_b - \sum H_t - \sum H_{r1-2} = \frac{P_2}{\rho g} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

Debido a que no tenemos turbinas absorbiendo la energía:

$$\frac{P_1}{\rho g} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + \sum H_b - \sum H_{r1-2} = \frac{P_2}{\rho g} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

Despejando la energía que brinda la bomba:

$$H_b = \left(\frac{P_2}{\rho g} - \frac{P_1}{\rho g} \right) + (z_2 - z_1) + \left(\frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} \right) + \sum H_{r1-2}$$

Donde:

P_1 : Presión en el recipiente de succión

Recipiente cerrado: Presión Manométrica ($P_1 = P_{\text{Manometrica}}$)

Recipiente abierto: Presión Atmosférica ($P_1 = P_{\text{Atmosferica}}$)

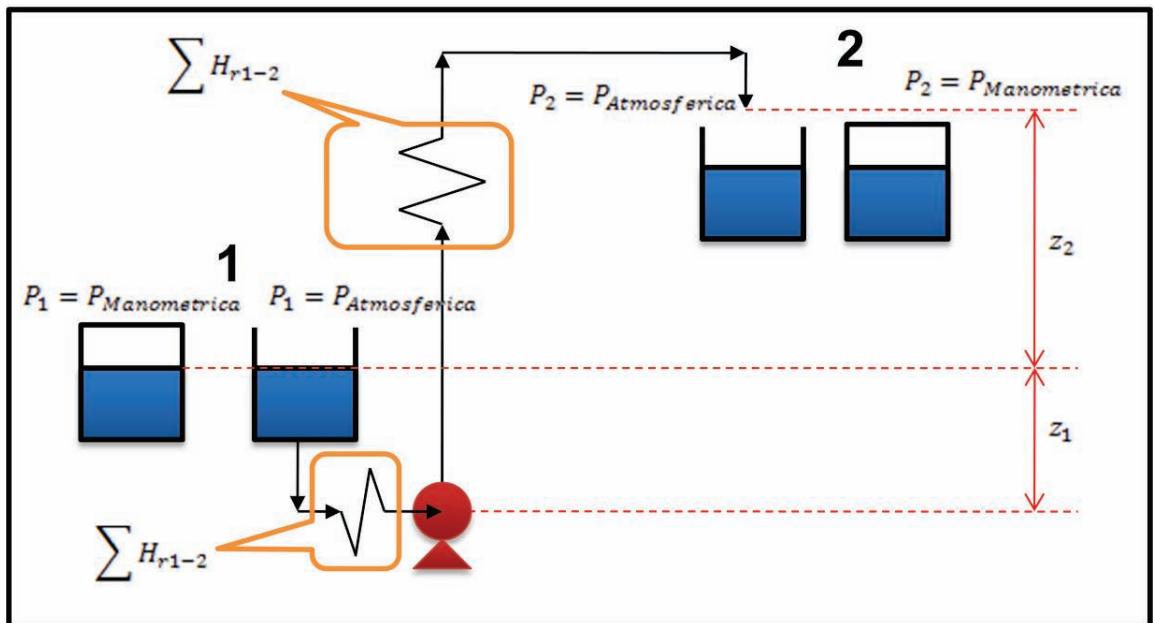
P_2 : Presión en el recipiente de descarga

Recipiente cerrado: Presión Manométrica ($P_2 = P_{\text{Manometrica}}$)

Recipiente abierto: Presión Atmosférica ($P_2 = P_{\text{Atmosferica}}$)

- z_1 : Altura estática de succión (teniendo referencia la altura de la bomba)
- z_2 : Altura estática de descarga (teniendo referencia la altura de la bomba)
- V_1 : Velocidad del fluido en el recipiente de succión ($V_1 \cong 0$)
- V_2 : Velocidad del fluido en el recipiente de descarga ($V_2 \cong 0$)
- $\sum H_{r1-2}$: Sumatoria de pérdidas de superficie y forma

Figura 11. Diagrama esquemático de un sistema de bombeo con succión positiva



- Succión positiva: cuando el depósito de succión se encuentra por encima del nivel de la bomba
- Succión negativa: cuando el depósito de succión se encuentra por debajo del nivel de la bomba.

La ecuación de la altura útil de una bomba en función de la conservación de la energía para un sistema de bombeo nos queda así:

$$H_b = \left(\frac{P_2}{\rho g} - \frac{P_1}{\rho g} \right) + (z_2 - z_1) + H_{rp(1-2)} + H_{rs(1-2)}$$

$$H_b = \left(\frac{P_2}{\rho g} - \frac{P_1}{\rho g} \right) + (z_2 - z_1) + \lambda \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{V^2}{2g} \right) + \sum \zeta \left(\frac{V^2}{2g} \right)$$

En el caso de que los recipientes de succión y descarga estén abiertos al medio tenemos:

$$H_b = (z_2 - z_1) + \left[\lambda \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{V^2}{2g} \right) \right]_{Succión} + \left[\lambda \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{V^2}{2g} \right) \right]_{Descarga} + \sum \zeta \left(\frac{V^2}{2g} \right)$$

1.2.1.4 Pérdidas energéticas de una bomba. Las pérdidas de una bomba son la sumatoria de las pérdidas mecánicas, volumétricas e hidráulicas.

- Pérdidas mecánicas. Son aquellas presentadas por la fricción de partes mecánicas de la bomba como son en los sellos, en el posible rozamiento del impulsor con la carcasa o caracol, etc.
- Pérdidas volumétricas. Son aquellas que agrupan todas las formas de pérdida del fluido en el proceso las cuales pueden ser de dos tipos; externas e internas, las primeras cuando existen fugas del fluido de trabajo fuera de la bomba ya sea por entre los sellos de la bomba y las segundas por el recirculamiento del fluido dentro de la bomba, siendo estas muy pequeñas y en conformidad a la forma o diseño de la bomba.
- Pérdidas hidráulicas. Estas pérdidas se refieren a las pérdidas de energía del fluido dentro de la bomba, pueden ser de dos tipos de forma y de superficie, las primeras tratan del desprendimiento de la capa límite del fluido en contacto con la configuración geométrica de la bomba y las segundas por el rozamiento del fluido con las superficies internas de la bomba, dependiendo directamente del acabado de la superficie de contacto con el fluido, cabe añadir que una bomba que sufra de cavitación es propensa a sufrir de pérdidas hidráulicas debido al desgaste de las superficies internas de la bomba.

1.2.1.5 Rendimiento. Se hace referencia a todas las pérdidas de una bomba cuantificable de forma de eficiencia y como las pérdidas también están constituidas por el rendimiento mecánico, rendimiento volumétrico y rendimiento hidráulico. El rendimiento total o eficiencia total de la bomba viene dada por el

producto de los rendimientos, mecánico, volumétrico e hidráulico. es muy útil para el cálculo de la potencia requerida por una bomba para realizar un trabajo

1.2.1.6 NPSH requerida de la bomba. Es una característica propia de la bomba, se define como la energía necesaria para llenar la parte de aspiración y vencer las pérdidas por rozamiento y aumentar la velocidad. En definitiva es la energía del líquido que una bomba necesita para funcionar satisfactoriamente. Su valor puede determinarse tanto por prueba como por cálculo.

Para una bomba centrífuga el NPSH requerido es la cantidad de energía necesaria, expresada en metros columna de líquido para:

- Vencer las pérdidas de carga desde la abertura de admisión (entrada) a los álabes del impulsor.
- Crear la velocidad deseada de corriente a los álabes, ya que es necesaria una velocidad mínima.

1.2.1.7 NPSH disponible de operación. Es una característica del sistema y se define como la energía que tiene un líquido en la toma de aspiración de la bomba (independientemente del tipo de esta) por encima de la energía del líquido debida a su presión de vapor. La NPSH disponible puede ser calculada u obtenida tomando lecturas de prueba en el lado de aspiración de la bomba. Para su cálculo es necesario considerar tanto la energía potencial como la cinética y la de presión.

$$NPSH(d) = \frac{P_a - P_s}{\gamma} \pm H_s - \sum H_{rs} - \sum H_{rp}$$

Donde:

P_a : Presión Atmosférica*

P_s : Presión de Saturación del fluido**

H_s : Altura de Succión (puede ser negativa o positiva)

Podemos concluir que el NPSH (disponible), debe ser mayor al NPSH (requerido) por el fabricante de la bomba

$$NPSH_{Disponible} > NPSH_{Requerido}$$

* Ver Anexo O, pág. 154.

** Ver Anexo Ñ, pág. 152-153.

Lo anterior para garantizar el correcto funcionamiento energético de la bomba y además para prevenir el deterioro de la misma por motivo del fenómeno de la cavitación.

1.2.1.8 Cavitación. La cavitación o aspiración en vacío es un efecto hidrodinámico que se produce cuando el agua o cualquier otro fluido en estado líquido pasa a gran velocidad por una arista afilada, produciendo una descompresión del fluido. Puede ocurrir que se alcance la presión de vapor del líquido de tal forma que las moléculas que lo componen cambian inmediatamente a estado de vapor, formándose burbujas o, más correctamente, cavidades. Las burbujas formadas viajan a zonas de mayor presión e implotan (el vapor regresa al estado líquido de manera súbita, «aplastándose» bruscamente las burbujas) produciendo una estela de gas y un arranque de metal de la superficie en la que origina este fenómeno.

La implosión causa ondas de presión que viajan en el líquido. Estas pueden disiparse en la corriente del líquido o pueden chocar con una superficie. Si la zona donde chocan las ondas de presión es la misma, el material tiende a debilitarse metalúrgicamente y se inicia una erosión que, además de dañar la superficie, provoca que ésta se convierta en una zona de mayor pérdida de presión y por ende de mayor foco de formación de burbujas de vapor. Si las burbujas de vapor se encuentran cerca o en contacto con una pared sólida cuando implosionan, las fuerzas ejercidas por el líquido al aplastar la cavidad dejada por el vapor dan lugar a presiones localizadas muy altas, ocasionando picaduras sobre la superficie sólida.

1.2.1.9 Potencia requerida. La potencia requerida por la bomba para realizar un trabajo definido viene dado por:

$$P = \frac{QH\gamma}{\eta}$$

Donde:

Q: Caudal o flujo volumétrico $\left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)$

H: Altura útil (m)

γ : Peso específico del fluido

$$\left(\gamma = \rho g = \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) = \left(\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{m} \cdot \text{m} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2} \right) = \left(\frac{\text{Pa}}{\text{m}} \right) \right)$$

η : Eficiencia total de la bomba

1.2.1.10 Curvas características de las bombas. El desempeño de una bomba, para una velocidad de rotación del impulsor y viscosidad del líquido dado, involucra tres parámetros básicos:

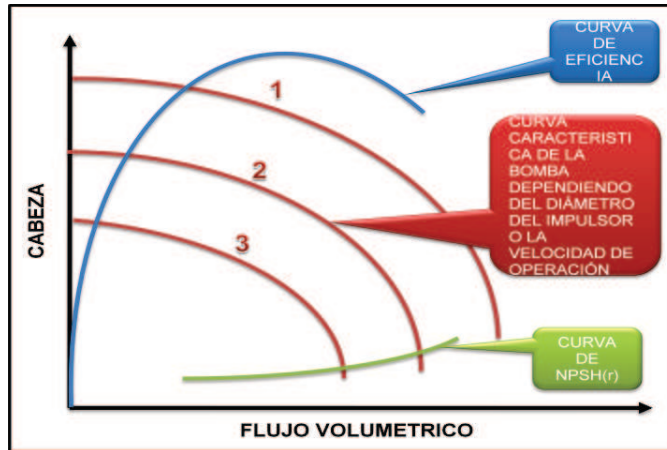
- Capacidad, expresada en unidades de volumen por unidad de tiempo.
- Cabezal total, expresado en unidades de longitud de una columna del líquido a ser bombeado.
- La velocidad a la cual opera la bomba, expresada generalmente en revoluciones por minuto (rpm).

En las curvas características de las bombas aparecen definidas las siguientes condiciones:

- Eficiencia
- Diámetro de operación
- Curvas de cabeza Vs. Caudal
- NPSH(d) (Cabeza positiva de succión requerida)

Ciertas firmas constructoras de bombas también añaden la potencia requerida a estas curvas, además las curvas características de las bombas viene definidas por las consideraciones de diseño de las bombas, así como su clase y forma.

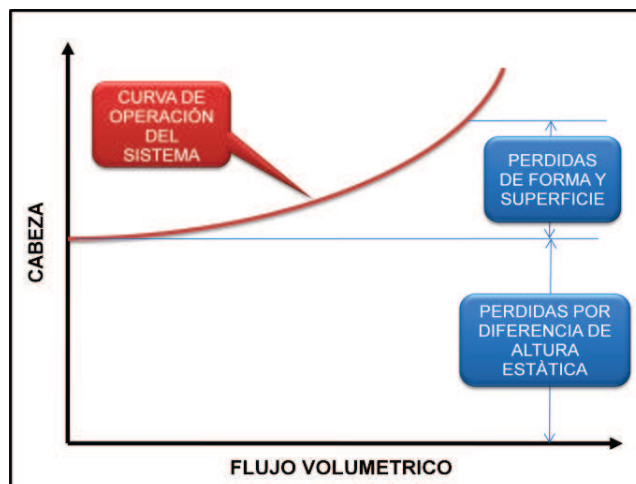
Figura 12. Curva característica de una bomba centrífuga



Por medio de esta curva podemos definir o escoger una bomba para que cumpla con la curva de operación del sistema, la cual está definida por el sistema en el cual va a operara una bomba y consta de la ecuación de energía de operación del sistema

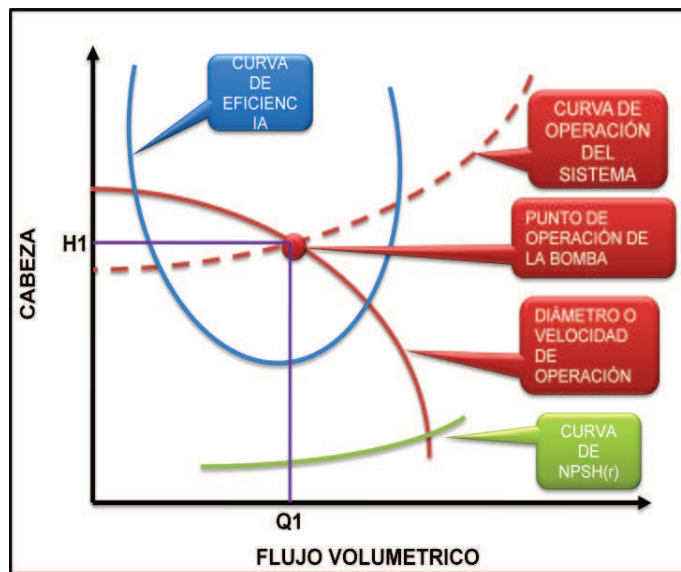
1.2.1.11 Curva de operación del sistema. La curva de operación del sistema viene definida por la grafica de la altura útil de la bomba, logrando una ecuación en función del caudal o flujo volumétrico, con las constantes de diferencia de altura estática entre succión y descarga, más las pérdidas de forma y superficie

Figura 13. Curva de operación de un sistema de bombeo



1.2.1.12 Punto de operación de una bomba en un sistema. El punto de operación se obtiene en la intersección de la curva característica de la bomba correspondiente al diámetro de operación o la velocidad y la curva de operación del sistema. Al trazar una línea horizontal y otra vertical que pase por este punto pueden obtenerse los valores de cabeza, flujo volumétrico (Caudal), eficiencia y el NPSH(r).

Figura 14. Punto de operación de una bomba en un sistema de bombeo para un gasto constante



1.2.1.13 Velocidad variable en sistemas de bombeo. A medida que la electrónica avanza y la generación de energía es cada vez más costosa, se torna rentable y necesario hacer cada vez más eficientes los procesos de producción, es importante una unión estratégica entre las ramas de la mecánica y la electricidad para el control eficiente de la energía, en este caso la energía eléctrica.

- Métodos de regulación del flujo volumétrico. En la actualidad existen tres tipos de regulación del flujo volumétrico en un sistema de bombeo los cuales son
- Regulación del flujo por medio de válvulas de control. Este método es el más utilizado en la actualidad, se puede realizar manual o automáticamente, consiste en la estrangulación de una válvula a la descarga de la bomba, dependiendo del flujo que se necesite, puede encontrarse un medidor de flujo, que indique el caudal necesario y así se

puede tener con certeza el porcentaje de sierra de la válvula, en el caso de válvulas automáticas con mecanismos de servomotores, las válvulas son sincronizadas con mecanismos de medición que pueden ser de nivel del tanque de succión o de un medidor de flujo volumétrico. Los inconvenientes de este método, son, que al alterar la curva de operación del sistema se incrementa la potencia que requiere el sistema esto es por el aumento de la cabeza de operación como se aprecia en la figura 14, a medida que se cierra la válvula de control la curva de operación cambia y así mismo cambia la potencia requerida, también se aprecia que como aumenta la cabeza del sistema también disminuye el caudal y puede haber cierta estabilidad en relación a la potencia recordando que esta última viene dada por:

$$P = \frac{QH\gamma}{\eta}$$

Donde:

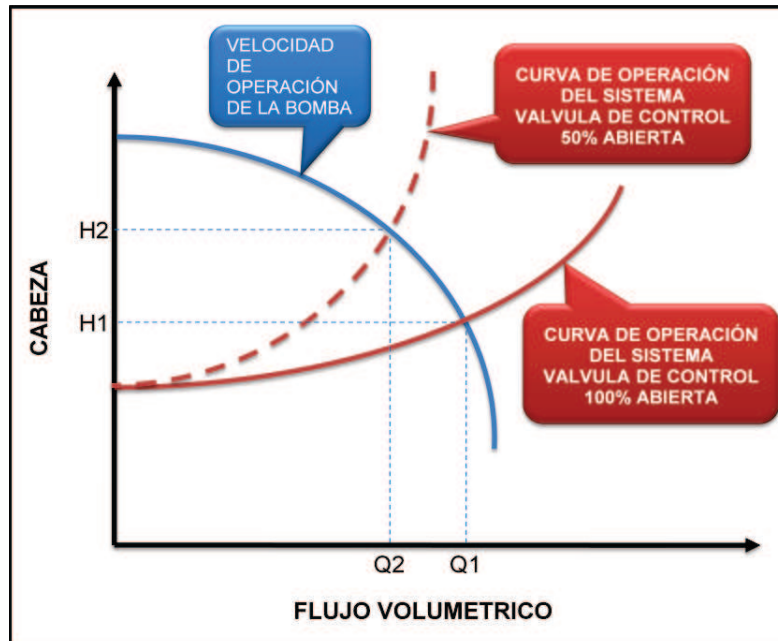
Q: Caudal o flujo volumétrico $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

H: Altura útil (m)

γ : Peso específico del fluido

η : Eficiencia total de la bomba

Figura 15. Comportamiento de la curva de operación, con válvula de control

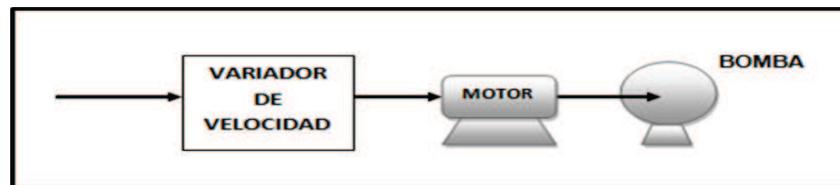


$$P_1 = \frac{Q_1 H_1 \gamma}{\eta} \quad ; \quad P_2 = \frac{Q_2 H_2 \gamma}{\eta}$$

Regulación del flujo por medio de Variadores de velocidad

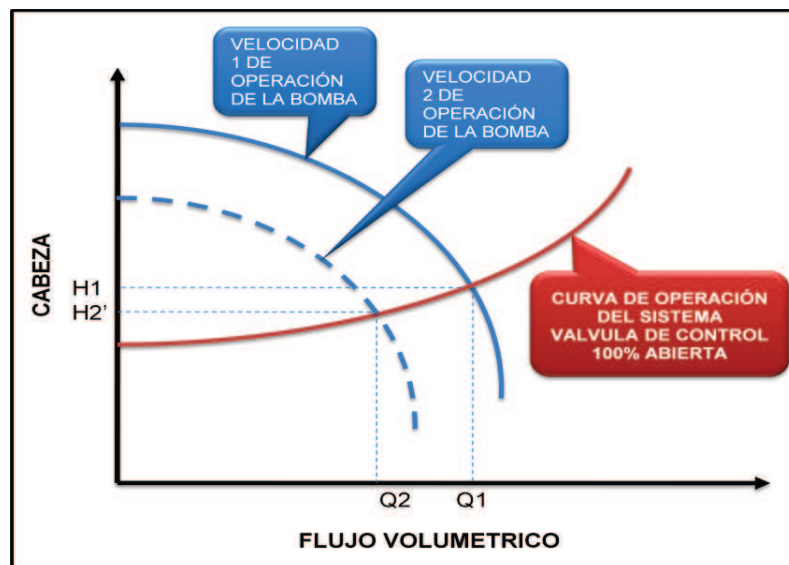
Este método se basa en la modificación de la curva de la bomba por medio de un variador de velocidad que consta de un variador de la frecuencia que le será entregada al motor eléctrico en la figura 15 se observa esquemáticamente el proceso.

Figura 16. Variador de velocidad en un sistema de bombeo



En la figura 16 podemos observar como varía la curva de la bomba al modificar la velocidad y también como variamos el caudal pero esta vez en diferencia con la modificación de la curva de operación por medio del cierre de una válvula, aquí la curva de operación no se modifica lo que nos lleva a una cabeza menor.

Figura 17. Curva característica, Variador de velocidad en un sistema de bombeo



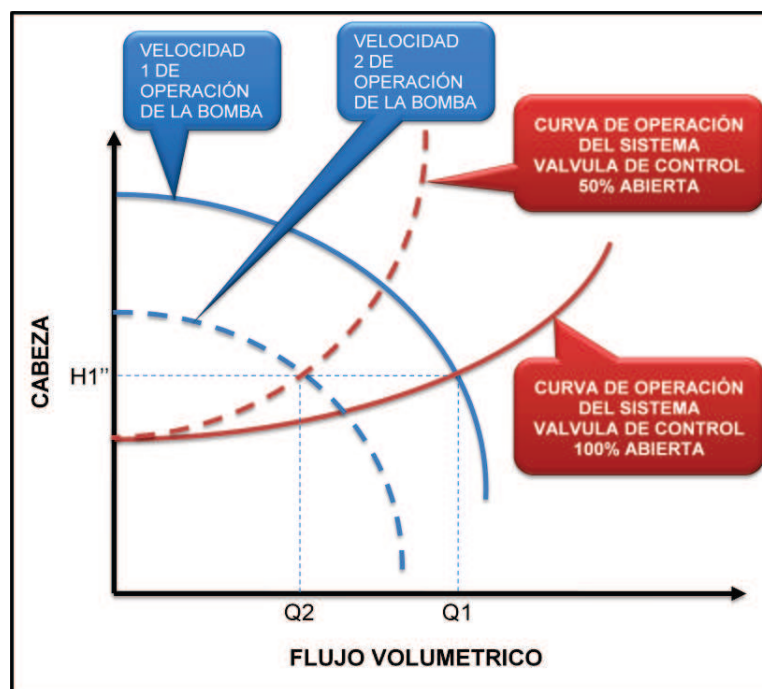
$$P_1 = \frac{Q_1 H_1 \gamma}{\eta} \quad ; \quad P_2' = \frac{Q_2 H_2' \gamma}{\eta}$$

$$P_2' < P_2$$

Regulación del flujo por medio de Variadores de velocidad y válvula de control

En este método se juntan los dos métodos anteriores, es requerido cuando el sistema es utilizado para varios oficios, en donde se debe conservar la cabeza del sistema en cualquier condición de caudal.

Figura 18. Modificación simultanea, variador de velocidad – válvula de control



$$P_1'' = \frac{Q_2 H_1'' \gamma}{\eta}$$

$$P_1'' < P_2' < P_2$$

1.3 EL PROCESO DEL AZÚCAR

1.3.1 Cultivo de la caña. La caña se cultiva en el fértil Valle del Cauca en donde por décadas se ha destacado por su alta calidad reconocida a nivel mundial, primero se prepara el terreno, se nivela y se surca, definiendo así el lugar de la plantación de cada tallo, el cual es de 60cm aproximadamente con dos o tres yemas sanas, seguidamente se procede al riego de germinación el cual se realiza de forma de aspersión o por gravedad, el agua para el riego tiene origen en pozos profundos y es totalmente pura.

Una vez la caña se encuentra a punto para su corte, se procede a esta acción ya sea manualmente o por acción mecánica, para el corte manual se da necesidad de realizar una quema no solo para facilitar el corte sino también para contribuir a la seguridad humana de los corteros.

La caña es transportada al Ingenio por medio de vagones halados por tractores o por tracto mulas, en época de invierno se presenta la dificultada de la entrada de los vehículos a las zonas de corte, y por esta razón el Ingenio posee una estación meteorológica para poder adaptarse lo más que se pueda al cambio ambiental. Una vez llegada la caña al ingenio, la caña es muestreada, analizada y pesada, todo esto para llevar un control de calidad estricto y así poder ofrecer un producto de óptima calidad.

La caña es conducida por una mesa en donde se pica y se desfibra, lo anterior para facilitar el proceso de molienda.

1.3.2 Molienda. El termino molienda dentro de la fabrica del Ingenio providencia se refiere a la cantidad de toneladas por hora que entra al proceso de producción, esto es necesario para ajustar todos los sistemas de la fábrica, porcentajes y niveles.

El Ingenio Providencia posee 6 molinos de 4 mazas y dos rodillos la función de este molino es el de extraer por presión el máximo jugo de caña posible. El resultado del proceso de molienda es un jugo diluido de caña y el bagazo , el primero es pesado para realizar más ajustes al proceso siguiente y el segundo se lleva a las calderas para la producción de energía del Ingenio, parte de este bagazo es usado para la producción de papel por parte de otra empresa. Una vez el jugo diluido de caña es pesado se lleva al Tanque de Bascula de Jugo,

de ahí se conduce al proceso de clarificación de jugo.

1.3.3 Clarificación. El jugo de caña pesado, es sulfatado en la torre de sulfatación en donde por contra flujo el jugo de caña se pone en contacto con el anhídrido sulfuroso. Este proceso es realizado para desinfectar el jugo y a la vez para mejorar el color de el jugo , de color pardo a color rojo claro, un efecto secundario es que se incrementa la acidez del jugo y es preciso neutralizar esto, agregándole lechada de cal hasta tener un PH de 7.0 aproximadamente. Una vez sulfatado y alcalinizado el jugo llega a un tanque llamado Tanque de Jugo Encalado, de ahí se lleva a los calentadores (Intercambiadores de Calor Piro tubulares), después el jugo calentado se conduce a la Torre de Pre Floculación y seguidamente a los Clarificadores en donde el jugo se libra de impurezas y da un restante llamado cachaza, aquí el jugo ya se denomina Jugo Clarificado, una parte es llevada a los evaporadores y otro a la destilería.

1.3.4 Evaporación. La evaporación se realiza por medio de Evaporadores en donde el jugo que llega con una concentración de sacarosa de 15° (BRIX 15°) , se concentra hasta lograr una concentración de sacarosa de 65° BRIX , de aquí en adelante el producto se denomina Meladura No Clarificada y es llevado al Tanque de Meladura No Clarificada.

1.3.5 Clarificación de la meladura. Esta acción es igual a la clarificación de el Jugo Diluido de Caña, se calienta, sulfata, alcaliza, floclula y se clarifica por medio de pequeñas burbujas de aire , las cuales hacen flotar los sólidos , dando como resultado; primero la Cachaza y segundo la Meladura Clarificada, de donde una porción es llevada a la destilería.

1.3.6 Filtración de la cachaza. La cachaza resultante de los clarificadores antes mencionados, se lleva a la estación de filtrado, en donde se le extrae la mayor cantidad de sacarosa posible, de este proceso salen dos productos; uno, la cachaza filtrada, se adiciona cenizas resultantes de la combustión del bagazo en las calderas y es llevada a la planta de compostaje, y dos, es un jugo recuperado el cual es llevado al proceso desde la primera sulfatación.

1.3.7 Compostaje. La planta de compostaje procesa los residuos que son, la cachaza filtrada, cenizas, basuras de patio de caña y vinaza procedente de la destilería, y los transforma en abono industrial de alta calidad.

1.3.8 Cristalización. Siguiendo con el proceso del azúcar, la Meladura Clarificada

es llevada a los Tachos o cristalizadores, en donde se evapora y se concentra la Meladura clarificada, hasta formar unos cristales de azúcar y miel.

1.3.9 Centrifugación. La masa resultante de los Tachos es llevada a las centrifugas en donde por acción de la fuerza centrífuga la miel es separada de los cristales, además en este proceso se añade agua caliente para facilitar la limpieza de los cristales de azúcar, la miel "A" es llevada a unos tanques elevados para repetir el proceso de centrifugación y la miel resultante "B" es llevada a la destilería.

1.3.10 Secado. Los cristales de azúcar resultantes del proceso de centrifugación son llevados a las secadoras en donde se le extrae la humedad que puedan tener, y de aquí, el azúcar es llevado a la zona de empacado, y posterior almacenamiento.

- **Brix.** Porcentaje de sacarosa disuelta en un fluido, por ejemplo para un fluido de grado Brix de 15, se sabe que del total del fluido hay un 15 % de sacarosa.

Figura 19. Diagrama de flujo del proceso del azúcar y sus derivados, hubicación de bombas críticas en el sistema

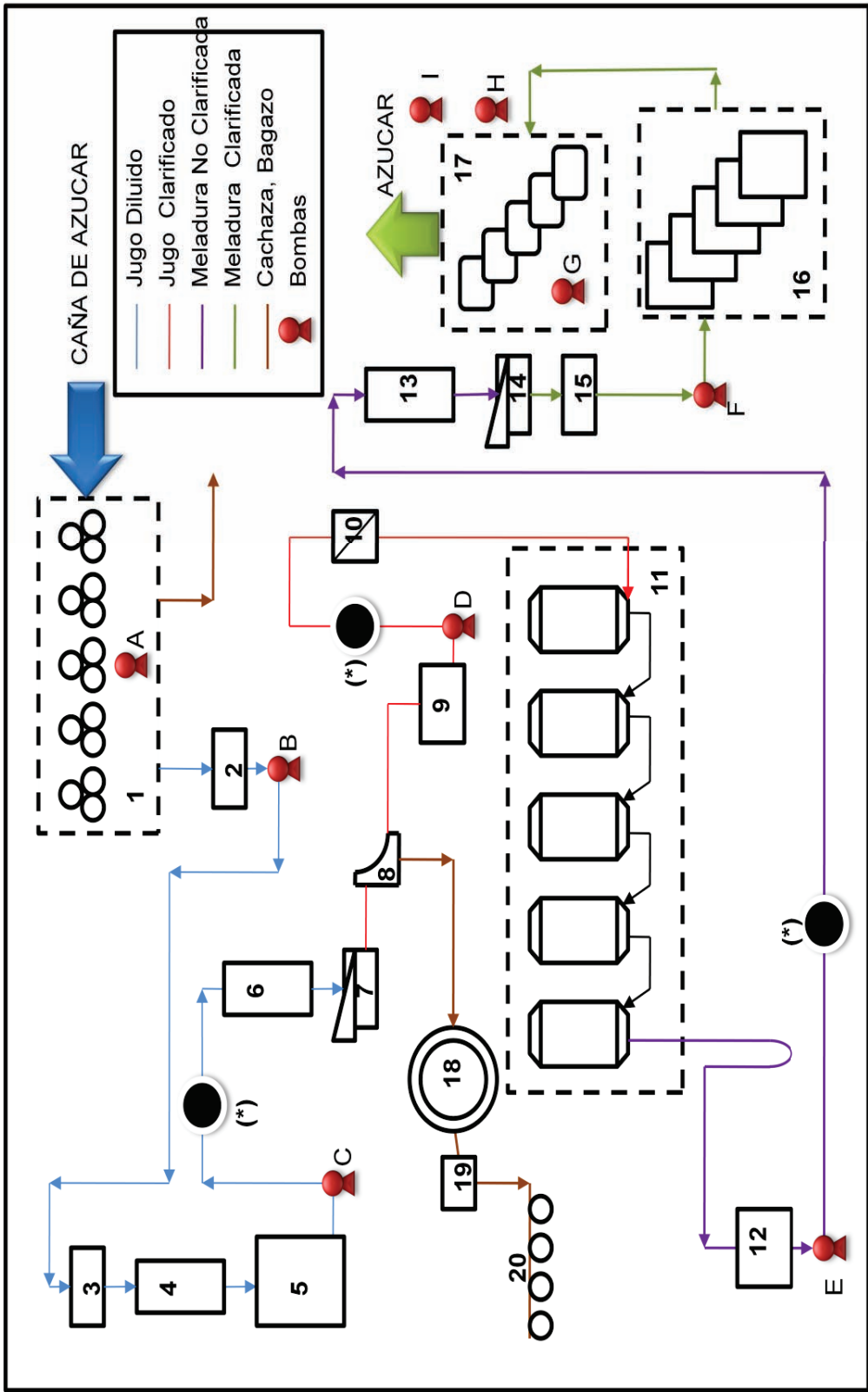


Tabla 5. Descripción figura No. 19

Ítem	Descripción del equipo
1	Molinos
2	Tanque bascula de jugo
3	Tanque recibidor jugo diluido
4	Torre de sulfatación
5	Tanque jugo encalado
6	Torre de pre floculación
7	Clarificador de jugo
8	Cribas
9	Tanque jugo clarificado
10	Calentador de placas
11	Evaporadores
12	Tanque de meladura no clarificada
13	Torre de sulfatación meladura no clarificada
14	Clarificador de meladura
15	Tanque de meladura clarificada
16	Tachos
17	Centrifugas
18	Filtros
19	Filtro prensa
20	Conductor de cachaza
A	Bomba tanque Tromel
B	Bomba bascula de jugo
C	Bomba jugo encalado
D	Bomba jugo clarificado
E	Bomba meladura no clarificada
F	Bomba meladura clarificada
G	Bomba magma
H	Bomba recuperación aguas dulces
I	Bomba mosto - destilería

2. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Se presenta a continuación la metodología de trabajo que consiste en un análisis sistemático de los sistemas de bombeo, determinar posibles pérdidas de energía cuantificables y recomendaciones para disminuirlas; también se presentan proyectos en donde es necesario el cálculo de las condiciones de trabajo, en las que es necesario la selección de la bomba y el motor más apropiados según las condiciones de operación.

Tabla 6. Diagrama de flujo de la metodología de trabajo

Metodología De Trabajo	Evaluación	Identificación	
		Recolección de datos de campo	Bomba
			Motor
			Acople (Bomba - Motor)
			Condiciones del fluido
			Características de operación
			Características de superficie
			Características de forma
		Cálculos teóricos de operación	Curvas de operación del sistema
	Punto de operación de la bomba		
	Conclusiones y recomendaciones		
	Proyectos	Identificación del proyecto a realizar	
		Identificación del diseño de operación	
		Cálculos teóricos de operación	
Selección Bomba - Motor			
Conclusiones y recomendaciones			

2.1 EVALUACIÓN

Esta área de trabajo consiste en realizar un estudio completo a un sistema de bombeo ya instalado y en funcionamiento. La finalidad es la de descubrir factores que incidan en pérdidas energéticas para la empresa y la correspondiente recomendación para subsanarlas en la medida de las posibilidades.

2.1.1 Identificación del objetivo del sistema dentro del proceso de producción. En esta área el trabajo consiste en la recolección de información

acerca de cómo su nombre lo indica ubicar el sistema a analizar, dentro del sistema general de producción de la planta.

2.1.2 Recolección de datos de campo. En esta área de trabajo es necesario tener claro los conceptos de hidrodinámica y maquinas hidráulicas para así saber que elementos son de importancia vital para el análisis energético del sistema.

2.1.2.1 Bomba. Los datos apremiantes de la bomba son:

- Tipo de bomba
- Marca
- Modelo
- Curvas características

2.1.2.2 Motor. Los datos más apremiantes del motor son:

- Tipo de motor
- Marca
- Modelo
- Especificaciones técnicas

2.1.2.3 Acople Bomba – Motor. La tarea en esta área es la de reconocer físicamente el tipo de acople del motor ya sea por medio de poleas o directo; en el primero la relación existente para el cálculo de velocidad y la segunda si la bomba posee un acople amortiguado para el arranque.

2.1.2.4 Condiciones del fluido de trabajo. Esta área consiste en la recolección de datos importantes como son la temperatura y el Brix de fluido que se transporta.

2.1.2.5 Características de operación. En esta área se debe tener muy claros conceptos como hidrostática e hidrodinámica; debido a que se recogerán datos importantes acerca de las tuberías, materiales y accesorios.

2.1.3 Cálculos teóricos de operación. Como en el punto anterior para realizar esta área de trabajo, con la ayuda de la teoría hallaremos datos claves como son:

cabeza de la bomba, NPSH (disponible) y la potencia requerida por la bomba para realizar el trabajo.

2.1.4 Recurso computacional. Debido a la gran cantidad de sistemas de bombeo que posee el Ingenio Providencia S.A. se propone la elaboración de una hoja de cálculo en “Office – Excel”, herramienta muy útil por su sencillez de manipulación y además por motivos de licencia de uso institucional.

2.1.5 Simulación. Una vez que se tiene un modelo matemático, se puede realizar una simulación del sistema de operación de la bomba, como ya se menciono, se utilizará el Software Excel para tal efecto , lo valioso de la simulación es que nos abre ventanas del proceso, esto es, nos muestra como ciertas variables del sistema de operación, pueden influenciar considerablemente el consumo de energía; y así , centramos en un estudio más detallado de esta variable mencionada para entender su comportamiento y modificarlo para nuestro beneficio.

2.2.6 Ejemplo. A continuación se realizara como ejemplo el cálculo teórico del sistema de operación Bascula de Jugo , como se menciono con anterioridad , este proceso no se repetirá manualmente para cada sistema , si no que se utilizara una hoja de cálculo para tal efecto.

- **Cálculo de operación del sistema Báscula de Jugo**

Identificación. El sistema “Bascula de Jugo”, es el que conduce el jugo de caña diluido desde la bascula de jugo hasta el proceso de Sulfatación del mismo*.

Recolección de datos de campo

Bomba

- Bomba centrífuga
- Marca: Wilfley
- Tipo: HD 8 x 6
- Diámetro de succión: 8 pulgadas
- Diámetro de descarga: 6 pulgadas
- Diámetro del impulsor: 22 pulgadas

* Ver figura No. 19, pág. 57

Motor

- Motor eléctrico trifásico
- Marca. Lesson
- Potencia: 75 (HP) Caballos de fuerza
- Velocidad a 60Hz: 1190(rpm) Revoluciones por minuto
- Transmisión: poleas (Motor 14 ½" – Bomba 20 ½ ")
- Velocidad efectiva en la bomba = 840 (rpm) Revoluciones por minuto

Fluido

- Caudal=2000 galones por minuto
- Temperatura del fluido = 30 °C
- Altura sobre el nivel del mar = 1200 metros
- Brix = 15

Succión

- Longitud tubería de succión = 2 metros
- Material tubería de succión * = acero al carbono SCH 40
- Diámetro tubería de succión = 10 pulgadas
- Altura estática de succión = 1,5 metros

Accesorios en la succión **

- 1 codo de 90° radio largo 10"
- 1 válvula de compuerta 10"
- 1 contracción suave (= 45°) (d = 10") (d = 8")
- 1 junta de expansión (neopreno)

Descarga

- Longitud tubería de descarga = 89 metros
- Material tubería de descarga = Acero al carbono SCH 40
- Diámetro tubería de descarga = 10 pulgadas
- Altura estática de descarga = 20 metros

* Ver anexo A, pág. 138.

** Ver anexos del B – M, págs. 139 -150.

Accesorios en la descarga*

- 4 codos de 90° radio largo 10"
- 2 válvulas de compuerta 10"
- 1 expansión suave ($\theta = 45^\circ$) (d = 10") (d = 6")
- 1 válvula de cheque 10"
- 1 manómetro

Cálculos

- Caudal = 2000 gpm = $4,45 \frac{\text{ft.}^3}{\text{s}} = 0,126 \frac{\text{m.}^3}{\text{s}}$
- Temperatura = $30^\circ\text{C} = 30 * \left(\frac{9}{5}\right) + 32 = 86^\circ\text{F}$
- Altura sobre el nivel del mar = 1200 m. = 3933 ft
- Longitud tubería de succión = 2 m. = 6,56ft
- Material tubería de succión → 3 mm. Rugosidad Absoluta
- Diámetro tubería de succión = 10 pulg. = 0.83ft. = 0,254m.
- Altura estática de succión = 1,5 m. = 4,92ft.
- Longitud tubería de descarga = 89 m. = 291,99 ft.
- Material tubería de succión → 3 mm. (Rugosidad Absoluta)
- Diámetro tubería de descarga = 10 pulg. = 0.83 ft. = 0,254 m.
- Altura estática de descarga = 20 m. = 65,61 ft.
- Densidad del fluido** = $62,3307 + (0,2301 * \text{°Brix}) + (0,0011 * (\text{°Brix}^2)) = 62,3307 + (0,2301 * 15) + (0,0011 * (15^2)) = 66,029 \frac{\text{lbm.}}{\text{ft.}^3} = 1057,69 \frac{\text{kg.}}{\text{m.}^3}$
- Viscosidad cinemática*** = $\left(\frac{\text{°Brix} = 15}{\text{Temperatura} = 30^\circ\text{C}}\right) = 1,24 \text{ CentiStokes} = (1,24 \text{ CentiStokes} * 0,00001076391) = 1,33 * 10^{-5} \frac{\text{ft.}^2}{\text{s.}} = 1,24 * 10^{-6} \frac{\text{m.}^2}{\text{s.}}$
- Peso específico = $\gamma = \rho * g = 1057,69 \frac{\text{kg.}}{\text{m.}^3} * 9,81 \frac{\text{m.}}{\text{s.}^2} = 10372,4 \frac{\text{Pa.}}{\text{m.}} = 0,4585 \frac{\text{psia.}}{\text{ft.}}$
- Altura estática total = Altura estática de descarga – Altura estática de succión = 20 m. – 1,5 m. = 18,5 m. = 60,69 ft.

* Ver anexos del B – M, págs. 139-150.

** Ver anexo P, pág. 155.

*** Ver anexo N, pág. 151.

- Presión de saturación * = $(3,8843 * 10^{-4} * (T^{\circ}\text{C})^3 - 5,17 * 10^{-2} * (T^{\circ}\text{C})^2 + 2,3944 * (T^{\circ}\text{C}) - 19,949) = 4,24 \text{ kPa} = 0,616 \text{ Psia}$.
- Presión atmosférica ** = $(6,578 * 10^{-9} * (\text{Alt.})^2 - 5,253 * 10^{-4} * (\text{Alt.}) + 14,69) = 87,72 \text{ kPa} = 12,72 \text{ Psia}$.

Succión

Perdidas de superficie o pérdidas primarias por fricción

Velocidad del fluido en la succión

$$\text{Caudal} = \text{Velocidad} * \text{Area}$$

$$\text{Velocidad} = \frac{\text{Caudal}}{\text{Area}} = \frac{\text{Caudal}}{\frac{\pi}{4} * D^2} = \frac{0,126 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\frac{\pi}{4} * (0,254 \text{ m.})^2} = 2,49 \frac{\text{m.}}{\text{s}}$$

Numero de Reynolds

$$\text{Re} = \frac{V D}{\nu} = \frac{2,49 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0,254 \text{m}}{1,24 * 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 509\,063 \text{ (Adimensional)} \rightarrow \text{Regimen Turbulento}$$

Ecuación de Colebrook - White

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{\frac{k}{D}}{3,7} + \frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} \right)$$

Debido al radical interior de esta ecuación debemos tener un valor inicial para λ y realizar las iteraciones pertinentes

$$\lambda = 0,03 \text{ (Adimensional) Propuesto}$$

Despejamos λ

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{\frac{k}{D}}{3,7} + \frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} \right)$$

* Ver anexo Ñ, pág. 152.

** Ver anexo O, pág. 154.

$$\sqrt{\lambda} = \frac{1}{-2 \log \left(\frac{\frac{k}{D}}{3,7} + \frac{2,51}{\text{Re}\sqrt{\lambda}} \right)}$$

$$(\sqrt{\lambda})^2 = \left(\frac{1}{-2 \log \left(\frac{\frac{k}{D}}{3,7} + \frac{2,51}{\text{Re}\sqrt{\lambda}} \right)} \right)^2$$

$$\lambda = \left(\frac{1}{-2 \log \left(\frac{\frac{k}{D}}{3,7} + \frac{2,51}{\text{Re}\sqrt{\lambda}} \right)} \right)^2$$

Primera iteración:

Remplazamos λ por el valor propuesto = 0,03 (A dimensional)

$$\lambda = \left(\frac{1}{-2 \log \left(\frac{\frac{0,003 \text{ m.}}{0,254 \text{ m.}}}{3,7} + \frac{2,51}{509\,063\sqrt{0,03}} \right)} \right)^2 = 0,040255$$

Calculamos el porcentaje de diferencia

$$\% \text{ Diferencia} = \left| \left[\frac{(0,03 - 0,040255)}{0,040255} \right] \right| * 100 = 25,475\%$$

Segunda iteración

$$\lambda = \left(\frac{1}{-2 \log \left(\frac{\frac{0.003 \text{ m.}}{0,254 \text{ m.}}}{3,7} + \frac{2,51}{509\,063 \sqrt{0,040255}} \right)} \right)^2 = 0,040238$$

$$\% \text{ Diferencia} = \left| \left[\frac{(0,040255 - 0,040238)}{0,040238} \right] \right| * 100 = 0,042\%$$

Tercera iteración

$$\lambda = \left(\frac{1}{-2 \log \left(\frac{\frac{0.003 \text{ m.}}{0,254 \text{ m.}}}{3,7} + \frac{2,51}{509\,063 \sqrt{0,040238}} \right)} \right)^2 = 4,02384 * 10^{-2}$$

$$\% \text{ Diferencia} = \left| \left[\frac{(0,040238 - 4,02384 * 10^{-2})}{4,02384 * 10^{-2}} \right] \right| * 100 = 0,000056\%$$

Ahora hallamos las pérdidas de superficie o pérdidas primarias por fricción

Ecuación de Darcy Weisbach

$$H_{rp} = \lambda \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{V^2}{2g} \right) = 4,02384 * 10^{-2} * \left(\frac{2 \text{ m.}}{0,254 \text{ m.}} \right) \left(\frac{\left(2,49 \frac{\text{m.}}{\text{s.}} \right)^2}{2 \left(9,81 \frac{\text{m.}}{\text{s.}^2} \right)} \right)$$

$$H_{rp} = 0,1 \text{ m.} = 0,328 \text{ ft.}$$

Perdidas de forma o perdidas secundarias por accesorios

Ecuación fundamental de las pérdidas secundarias

$$H_{rs} = \zeta \left(\frac{V^2}{2g} \right)$$

Tabla 7. Listado de accesorios a la succión (sistema- Bascula de Jugo)

cantidad	accesorio	condiciones	coeficiente
1	codo	90° radio largo (10")	0,052 (A dimensional)
1	Válvula de compuerta	10" (100% abierta)	0,05(A dimensional)
1	Contracción suave	(= 45 ^a) (d = 10") (d = 8")	0,2691(A dimensional)
1	Junta de expansión	Neopreno	1(A dimensional)

$$H_{rs} = \left(\sum \zeta \right) * \left(\frac{V^2}{2g} \right) = 1,3711 * \left(\frac{\left(2,49 \frac{m.}{s.} \right)^2}{2 \left(9,81 \frac{m.}{s.^2} \right)} \right) = 0,433 m. = 1,42 ft.$$

$$H_{rs} = 0,433 m. = 1,42 ft.$$

Descarga

Perdidas de superficie o perdidas primarias por fricción

Velocidad del fluido en la succión

$$\text{Caudal} = \text{Velocidad} * \text{Area}$$

$$\text{Velocidad} = \frac{\text{Caudal}}{\text{Area}} = \frac{\text{Caudal}}{\frac{\pi}{4} * D^2} = \frac{0,126 \frac{m.^3}{s}}{\frac{\pi}{4} * (0,254 m.)^2} = 2,49 \frac{m.}{s.}$$

Numero de Reynolds

$$Re = \frac{V D}{\nu} = \frac{2,49 \frac{m.}{s.} * 0,254 m.}{1,24 * 10^{-6} \frac{m.^2}{s.}} = 509 063 \text{ (Adimensional)} \rightarrow \text{Regimen Turbulento}$$

Ecuación de Colebrook - White

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{k}{3,7 D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} \right)$$

Debido al radical interior de esta ecuación debemos tener un valor inicial para λ y

realizar las iteraciones pertinentes

$$\lambda = 0,03 \text{ (Adimensional) Propuesto}$$

Despejamos λ

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{\frac{k}{D}}{3,7} + \frac{2,51}{\text{Re}\sqrt{\lambda}} \right)$$

$$\sqrt{\lambda} = \frac{1}{-2 \log \left(\frac{\frac{k}{D}}{3,7} + \frac{2,51}{\text{Re}\sqrt{\lambda}} \right)}$$

$$(\sqrt{\lambda})^2 = \left(\frac{1}{-2 \log \left(\frac{\frac{k}{D}}{3,7} + \frac{2,51}{\text{Re}\sqrt{\lambda}} \right)} \right)^2$$

$$\lambda = \left(\frac{1}{-2 \log \left(\frac{\frac{k}{D}}{3,7} + \frac{2,51}{\text{Re}\sqrt{\lambda}} \right)} \right)^2$$

Primera iteración:

Reemplazamos λ por el valor propuesto = 0,03(A dimensional)

$$\lambda = \left(\frac{1}{-2 \log \left(\frac{\frac{0,003 \text{ m.}}{0,254 \text{ m.}}}{3,7} + \frac{2,51}{509\,063\sqrt{0,03}} \right)} \right)^2 = 0,040255$$

Calculamos el porcentaje de diferencia

$$\% \text{ Diferencia} = \left| \left[\frac{(0,03 - 0,040255)}{0,040255} \right] \right| * 100 = 25,475\%$$

Segunda iteración

$$\lambda = \left(\frac{1}{-2 \log \left(\frac{\frac{0,003 \text{ m.}}{0,254 \text{ m.}}}{3,7} + \frac{2,51}{509\,063 \sqrt{0,040255}} \right)} \right)^2 = 0,040238$$

$$\% \text{ Diferencia} = \left| \left[\frac{(0,040255 - 0,040238)}{0,040238} \right] \right| * 100 = 0,042\%$$

Tercera iteración

$$\lambda = \left(\frac{1}{-2 \log \left(\frac{\frac{0,003 \text{ m.}}{0,254 \text{ m.}}}{3,7} + \frac{2,51}{509\,063 \sqrt{0,040238}} \right)} \right)^2 = 4,02384 * 10^{-2}$$

$$\% \text{ Diferencia} = \left| \left[\frac{(0,040238 - 4,02384 * 10^{-2})}{4,02384 * 10^{-2}} \right] \right| * 100 = 0,000056\%$$

Ahora hallamos las pérdidas de superficie o pérdidas primarias por fricción
Ecuación de Darcy Weisbach

$$H_{rp} = \lambda \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{V^2}{2g} \right) = 4,02384 * 10^{-2} \left(\frac{89 \text{ m.}}{0,254 \text{ m.}} \right) \left(\frac{\left(\frac{2,49 \frac{\text{m.}}{\text{s.}}}{2 \left(9,81 \frac{\text{m.}}{\text{s.}^2} \right)} \right)^2}{2} \right) = 4,45 \text{ m.}$$

$$H_{rp} = 4,45 \text{ m.} = 14,59 \text{ ft.}$$

Perdidas de forma o perdidas secundarias por accesorios

Ecuación fundamental de las pérdidas secundarias

$$H_{rs} = \zeta \left(\frac{V^2}{2g} \right)$$

Tabla 8. Listado de accesorios a la descarga (sistema- Bascula de jugo)

cantidad	accesorio	condiciones	coeficiente
4	Codo (90°)	Radio largo, 10"	0,208
1	Válvula de retención	10"	1,2
2	Válvula de compuerta	10"	0,1037
1	Ensanchamiento suave	45° (d=6", D=10")	0,92
1	Manómetro		1

$$H_{rs} = \left(\sum \zeta \right) * \left(\frac{V^2}{2g} \right) = (3,43) * \left(\frac{\left(2,49 \frac{\text{m.}}{\text{s.}} \right)^2}{2 \left(9,81 \frac{\text{m.}}{\text{s.}^2} \right)} \right) = 1,08 \text{ m.} = 3,55 \text{ ft.}$$

$$H_{rs} = 1,08 \text{ m.} = 3,55 \text{ ft.}$$

Ahora hallamos la altura útil de una bomba acoplada a éste sistema de bombeo, desde el punto de succión hasta el punto de descarga.

$$H_b = (z_2 - z_1) + \sum H_{rp(1-2)} + \sum H_{rs(1-2)}$$

$$H_b = (20 \text{ m.} - 1,5 \text{ m.}) + (0,1 \text{ m.} + 4,45 \text{ m.}) + (0,433 \text{ m.} + 1,08 \text{ m.})$$

$$H_b = 24,56 \text{ m.} = 80,57 \text{ ft.}$$

- Con estas operaciones creamos un vector de caudal (Q) de 0 a 4000 galones por minuto y corremos todos los cálculos anteriores dándonos como resultado un vector final de Cabeza (Hp).
- Estos dos vectores los graficamos en un plano cartesiano y tenemos como resultado la Curva de Operación del Sistema, también se pueden Incluir en la grafica Potencia (HP) y el NPSH (d).

- Esta curva la contraponemos con la curva característica de la bomba identificada y hallamos el punto de operación de la Bomba.
- En el próximo capítulo se iniciara la evaluación de las bombas más críticas en el proceso de producción del azúcar, por medio de la hoja de cálculo ya mencionada.

3. RESULTADOS

3.1 EVALUACION

3.1.1 Bomba Tromel

Figura 20. Foto del conjunto Bomba –Motor, sistema Bomba Tromel.



- **Identificación.** Esta bomba se encuentra en el área de molienda* , y básicamente recoge el jugo diluido de caña y mediante la energía cedida por esta el fluido es conducido hasta el Tromel, el cual es un filtro rotativo, en donde es separado el jugo de caña diluido del bagazo.
- **Recolección de datos de campo**

* Ver figura No. 19, pág. 57

BOMBA

MARCA	WILFLEY
MODELO	10 X 10 HD
IMPULSOR	16"

MOTOR

MARCA	LESSON
POTENCIA (HP)	150
VELOCIDAD (RPM)	1190
ACOPLE DIRECTO (VARIADOR DE VELOCIDAD)	

Condiciones del fluido

Caudal (g.p.m.)	2000	4,456018 Ft.^3/s
Temperatura del fluido (°C)	30	86,000 °F
Altura sobre el nivel del mar (m)	1200	3933,701 Ft.
BRIX	15	

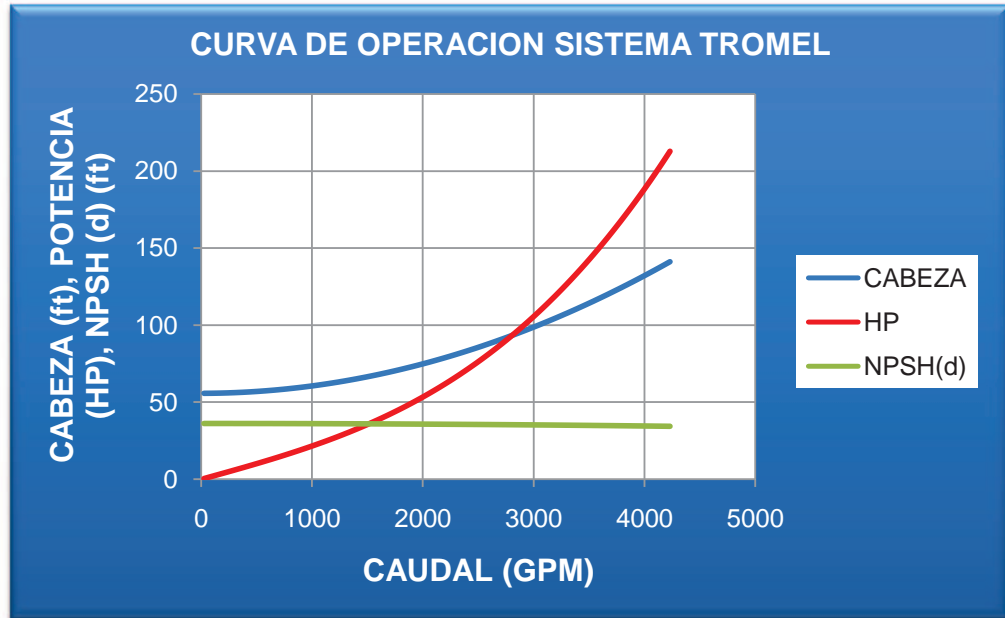
Cálculos

	ENG/US	SI
Densidad del fluido	66,0297 Lb./ft.^3	1057,697 Kg./m.^3
Viscosidad cinemática	1,337E-05 Ft.^2/s.	1,243E-06 m.^2/s.
Peso específico	0,4585 Psia./ft	10,3725 KPa./m
Altura estática total	45,9318 Ft.	14,0000 m.
Presión de Saturación	0,6160 Psia.	4,2469 KPa.
Presión Atmosférica	12,7227 Psia.	87,7200 KPa.

DIFERENCIAL DE ALTURA ESTATICA	45,932 Ft.
PERDIDAS POR FRICCION	6,174 Ft.
PERDIDAS POR ACCESORIOS	1,274 Ft.

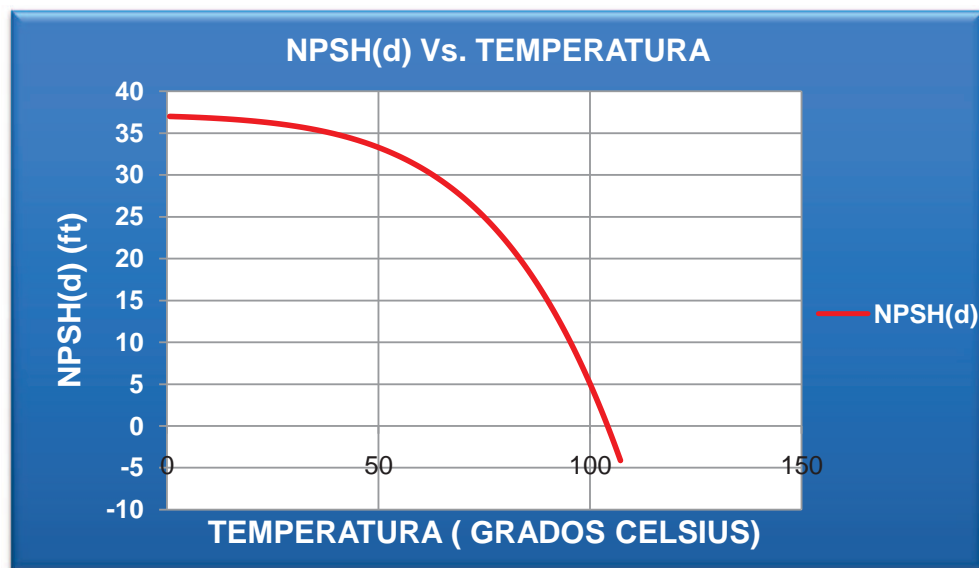
TOTAL CABEZA (SISTEMA)	53,380 Ft.
BHP	47,59 H.P.
NPSH (DISPONIBLE)	39,311 Ft.

Figura 21 .Curva de operación Sistema Tromel.



Debido a que la temperatura del fluido es una variable en el sistema, se presenta una grafica, figura No. 22, en donde se muestra el comportamiento del NPSH (d) en relación al cambio de temperatura del fluido.

Figura 22. Curva NPSH (d) Vs. Temperatura, Sistema Tromel.



Ahora con el dato de velocidad promedio 880 rpm (debido a un variador de velocidad), entramos a la curva característica de la bomba* y la comparamos con la curva de operación del sistema.

Conclusiones

- Encontramos que la bomba se encuentra operando en el punto de operación, esto debido al variador de velocidad que ajusta la velocidad del motor al caudal requerido. Para 880 rpm el caudal se ajusta a 2000 galones por minuto.
- La potencia según el análisis del punto de operación es de 70 HP, la cual es menor a la potencia que puede aportar el motor que es de 150 HP.
- El NPSH(r) de la bomba es de 15 ft. El cual es mucho menor al NPSH (d) que es de 39 ft.
- Debido al variador de velocidad, se puede controlar el nivel del tanque encañado esto es, la altura estática de succión, además de optimizar el manejo de la bomba y así economizar el consumo de energía del motor.

Recomendaciones

- Al presente sistema de bombeo se considera un estado de trabajo excelente y lo único a considerar es el tema de mantenimiento, preventivo, para mantener las condiciones de trabajo estudiadas y así garantizar que este análisis continúe vigente.

* Ver anexo Q, curva característica bomba, Wilfley A7 10 x 10, pág. 156.

3.1.2 Bomba Báscula de Jugo

Figura 23. Foto del conjunto Bomba – Motor, sistema Báscula de Jugo



- **Identificación.** La bomba “Bascula de Jugo”, es la que conduce el jugo de caña diluido desde la bascula de jugo hasta el proceso de Sulfatación*. Toda la información acerca de las condiciones de funcionamiento se encuentra incluida en anexo informático.
- **Recolección de datos de campo**

BOMBA	
MARCA	WILFLEY
MODELO	8 X 6 HD
IMPULSOR	22"

* Ver figura No. 19, pág. 57

MOTOR

MARCA	LESSON
POTENCIA (H.P.)	75
VELOCIDAD (R.P.M.)	1190
ACOPLE POR POLEA RELACION (M 14 ½"-B 20 ½ ")	

Condiciones del fluido

SISTEMA		ENG/US	SI
Caudal (g.p.m.)	2000	4,4560 Ft. ³ /s.	1,262E-01 m. ³ /s.
Temperatura del fluido (°C)	30	86,0000 °F	30,000 °C
Altura sobre el nivel del mar (m)	1200	3933,7008 Ft.	1200,000 m.
BRIX	15		

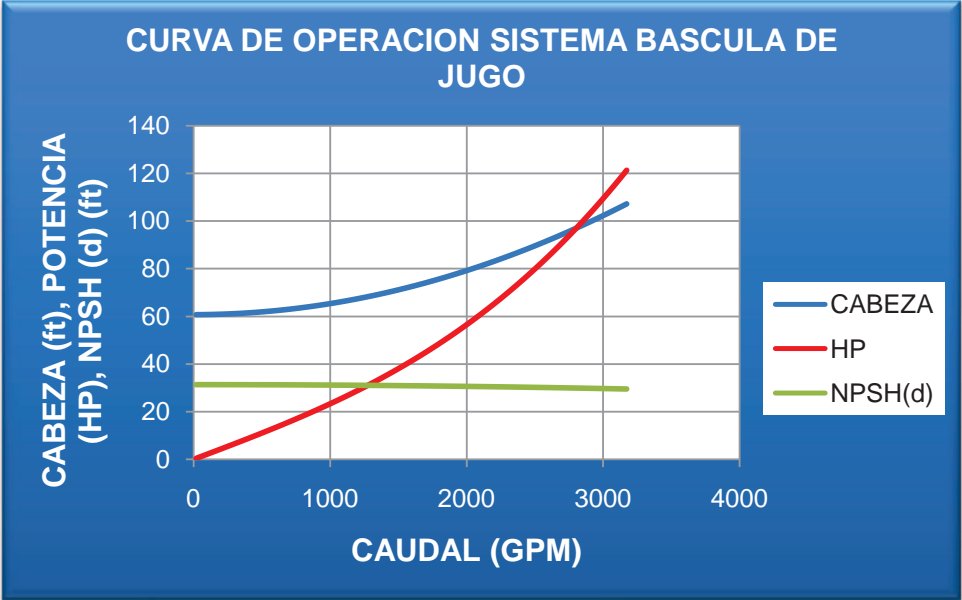
Cálculos

	ENG/US	SI
Densidad del fluido	66,0297 Lb./ft. ³	1057,697 Kg./m. ³
Viscosidad cinemática	1,337E-05 Ft. ² /s.	1,243E-06 m. ² /s.
Peso específico	0,4585 Psia./ft.	10,3725 kPa./m.
Altura estática total	60,6955 Ft.	18,5000 m.
Presión de Saturación	0,6160 Psia.	4,2469 kPa.
Presión Atmosférica	12,7227 Psia.	87,7200 kPa.

DIFERENCIAL DE ALTURA ESTATICA	60,696 Ft.
PERDIDAS POR FRICCION	14,956 Ft.
PERDIDAS POR ACCESORIOS	2,491 Ft.

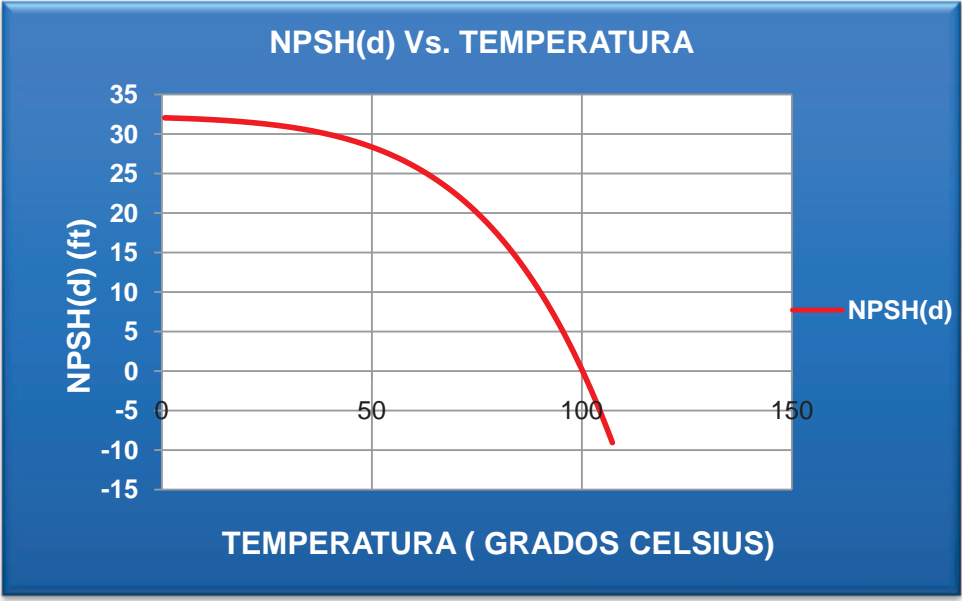
TOTAL CABEZA (SISTEMA)	78,143 Ft.
BHP	69,67 H.P.
NPSH (DISPONIBLE)	30,610 Ft.

Figura 24. Curva de operación Sistema Báscula de Jugo.



Debido a que la temperatura del fluido es una variable en el sistema, se presenta una grafica, figura No.25, en donde se muestra el comportamiento del NPSH (d) en relación al cambio de temperatura del fluido.

Figura 25. Curva NPSH (d) Vs. Temperatura, Sistema Báscula de Jugo.



Ahora entramos a la curva característica de la bomba* , con los datos de velocidad y caudal, seguidamente comparamos las curvas y obtenemos las conclusiones:

$$\text{Velocidad} = \frac{\text{r. p. m. (Motor)} * \text{Diametro pola del motor}}{\text{Diametro polea de la bomba}} = \frac{1190 * (14,5 \text{ plg.})}{(20,5 \text{ plg.})}$$
$$= 841,7 \text{ r. p. m.}$$

Conclusiones

- Se observa que en punto de operación nos encontramos un caudal de 2500 galones por minuto y una cabeza de 85 ft.
- La eficiencia de la bomba esta en 75%
- El NPSH(r) de la bomba para 840 rpm es de 25 ft. Lo cual es inferior al NPSH (d) que esta en 31 ft, lo cual es muy conveniente porque esto nos asegura el buen funcionamiento de la bomba además de evitarse los problemas de cavitación.

Recomendaciones

- Se recomienda reducir la velocidad de operación de la bomba a 750 rpm, esto con el fin de ajustar el punto de operación de la bomba a 2000 galones por minuto de caudal, pero esto generaría una restricción de máximo caudal en 2000 galones por minuto, esto se lograría tan solo con aumentar el diámetro de la polea de la bomba a 24,5 pulgadas.
- Se recomienda la instalación de un variador de velocidad, posiblemente sincronizado con el nivel del Tanque de Báscula y a un medidor de flujo volumétrico (caudal), todo esto con el fin de mejorar la eficiencia energética del sistema.
- En dado caso que el proceso aumente la temperatura del fluido, se recomienda tener en cuenta la grafica mostrada de NPSH (d) Vs. Temperatura del fluido.

* Ver anexo R, curva característica bomba Wilfley HD 8 X 6, pág. 157

3.1.3 Bomba Tanque Encalado

Figura 26. Foto del conjunto Bomba –Motor, sistema Tanque de Jugo Encalado



- **Identificación.** La bomba del tanque de encalado es la encargada de cederle energía al jugo diluido de caña para que este llegue a los intercambiadores de calor, primarios y secundarios, y de allí finalmente a la torre de pre floculación*, todo lo anterior, para iniciar el proceso de clarificación.
- **Recolección de datos de campo**

BOMBA

MARCA	WILFLEY
MODELO	10 X 6 HD
IMPULSOR	26"

* Ver figura No. 19, pág. 57.

MOTOR

MARCA	SIEMENS
POTENCIA (HP)	400
VELOCIDAD (RPM)	1190
ACOPLE POR POLEA RELACION (M 18"-B 21 ")	

Condiciones del fluido

SISTEMA		ENG/US		SI
Caudal (g.p.m.)	2000	4,4560	Ft.^3/s	1,262E-01 m.^3/s.
Temperatura del fluido (°C)	30	86,0000	°F	30,000 °C
Altura sobre el nivel del mar (m)	1200	3933,7008	Ft.	1200,000 m.
BRIX	15			

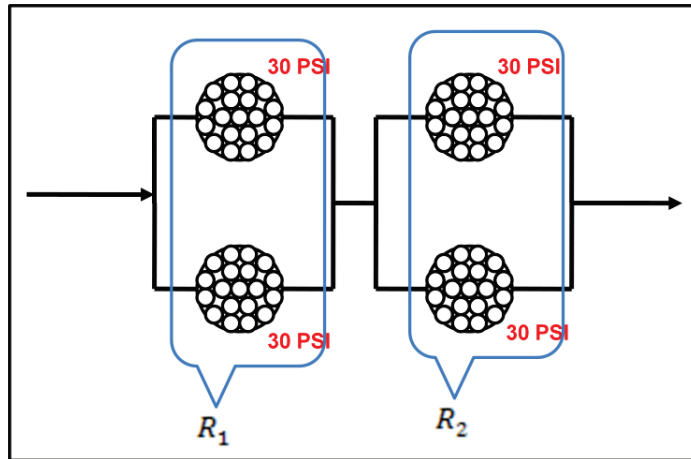
Cálculos

	ENG/US		SI	
Densidad del fluido	66,0297	Lb./ft.^3	1057,697	Kg./m.^3
Viscosidad cinemática	1,337E-05	Ft.^2/s.	1,243E-06	m.^2/s.
Peso específico	0,4585	Psia. /ft.	10,3725	kPa./m.
Altura estática total	55,7743	Ft.	17,0000	m.
Presión de Saturación	0,6160	Psia.	4,2469	kPa.
Presión Atmosférica	12,7227	Psia.	87,7200	kPa.

- Accesorio de consideración.** En el camino del jugo diluido ya encalado, este es conducido por los intercambiadores de calor, dos en paralelo, llamados primarios y secundarios, estos aumentan la temperatura del jugo, lo cual es necesario para el proceso de floculación y posterior clarificación. A continuación en la figura No.27 se muestra esquemáticamente los intercambiadores de calor.

El cálculo de la pérdida generada por estos intercambiadores de calor se realiza con una analogía de circuito eléctrico, en donde cada intercambiador de calor es una resistencia.

Figura 27. Dibujo esquemático de los Intercambiadores de calor, piro tubulares, primarios y secundarios, en paralelo y en serie.



$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{30 \text{ Psi.}} + \frac{1}{30 \text{ Psi.}} \quad ; \quad \frac{1}{R_2} = \frac{1}{30 \text{ Psi.}} + \frac{1}{30 \text{ Psi.}}$$

$$R_T = R_1 + R_2$$

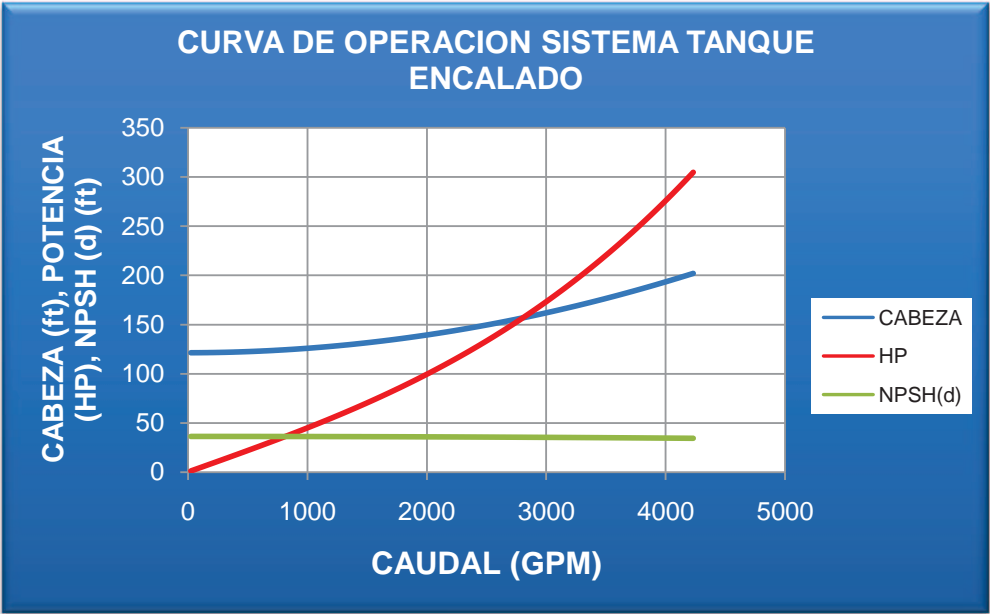
$$R_T = 15 \text{ Psi.} + 15 \text{ Psi.} = 30 \text{ Psi.} = 65,42 \text{ ft.}$$

Cálculos

DIFERENCIAL DE ALTURA ESTÁTICA	55,774 Ft.
PERDIDAS POR FRICCIÓN	14,978 Ft.
PERDIDAS POR ACCESORIOS	3,067 Ft.

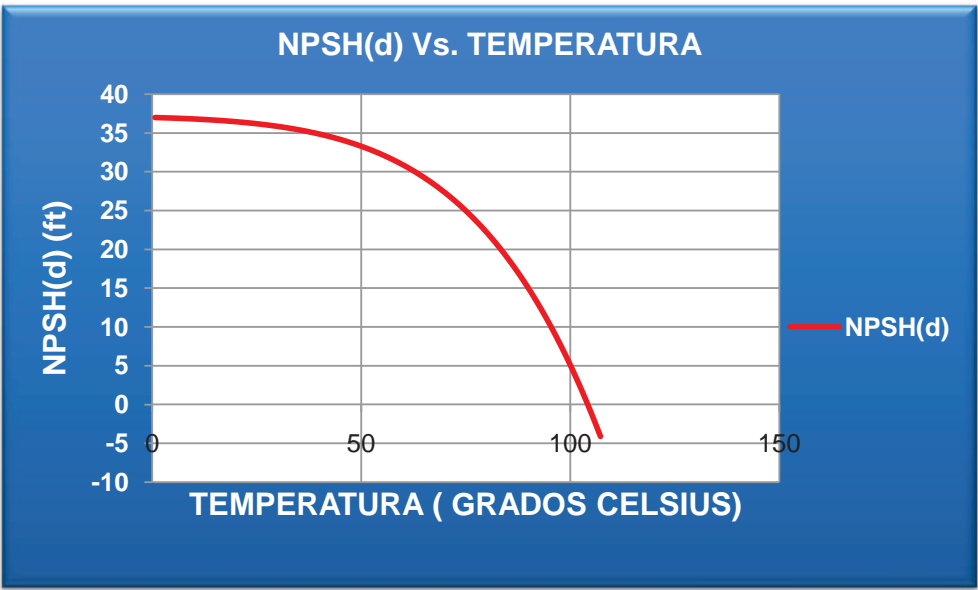
TOTAL CABEZA (SISTEMA)	139,244 Ft.
BHP	124,15 H.P.
NPSH (DISPONIBLE)	35,843 Ft.

Figura 28 .Curva de operación sistema Tanque encalado.



Debido a que la temperatura del fluido es una variable en el sistema, se presenta una grafica, figura No.29, en donde se muestra el comportamiento del NPSH (d) en relación al cambio de temperatura del fluido.

Figura 29. Curva NPSH (d) Vs. Temperatura, Sistema Tanque Encalado.



Ahora entramos a la curva característica de la bomba* , con los datos de velocidad, seguidamente comparamos las curvas y obtenemos las conclusiones:

$$\text{Velocidad} = \frac{\text{r. p. m. (Motor)} * \text{Diametro pola del motor}}{\text{Diametro polea de la bomba}} = \frac{1190 * (19 \text{ plg.})}{(22 \text{ plg.})}$$
$$= 1036 \text{ r. p. m.}$$

Conclusiones

- Se observa que en punto de operación nos encontramos un caudal de 3500 galones por minuto y una cabeza de 180 ft.
- La eficiencia de la bomba esta en 72%
- El NPSH(r) por la bomba es de 35 ft, igual al NPSH (d) del sistema de 35 ft., para esto hay que tener en cuenta que sí altura estática de succión disminuye del nivel propuesto de 3 m., estaría la bomba sufriendo cavitación.
- La potencia requerida por la bomba el punto de operación es de 225H.P., lo cual es muy inferior a la potencia que posee el motor de la bomba que es de 400 H.P. Por motivos de disponibilidad la fábrica utiliza este motor.

Recomendaciones

- Se recomienda reducir la velocidad de operación de la bomba a 800 rpm, esto se lograría tan solo con aumentar el diámetro de la polea de la bomba a 28 pulgadas.
- Se recomienda instalar un variador de velocidad, en caso de hacerlo sincronizarlo con el nivel del Tanque Encalado y un medidor de flujo volumétrico, además sí se toma la decisión de realizar lo anterior, no habría necesidad de cambiar la relación de poleas.

* Ver anexo S, Curva característica bomba Wilfley HD 10 x 6, pág. 158

3.1.4 Bomba jugo clarificado

- **Identificación.** La bomba de jugo clarificado es la encargada cederle energía al fluido (Jugo Clarificado), para que este llegue al proceso de evaporación^{*}, pre evaporador o evaporador de primer efecto.
- **Recolección de datos de campo**

BOMBA

MARCA	WORTHINGTON
MODELO	5LR-15
IMPULSOR	13 3/4"

MOTOR

MARCA	SIEMENS
POTENCIA (HP)	150
VELOCIDAD (RPM)	1775
ACOPLE	DIRECTO

Condiciones del fluido

SISTEMA		ENG/US	SI
Caudal (g.p.m.)	1000	2,2280 Ft. ³ /s.	6,309E-02 m. ³ /s.
Temperatura del fluido (°C)	45	113,0000 °F	45,000 °C
Altura sobre el nivel del mar (m)	1200	3933,7008 Ft.	1200,000 m.
BRIX	15		

Cálculos

	ENG/US	SI
Densidad del fluido	66,0297 Lb./ft. ³	1057,697 Kg./m. ³
Viscosidad cinemática	9,755E-06 Ft. ² /s.	9,063E-07 m. ² /s.
Peso específico	0,4585 Psia./ft.	10,3725 kPa./m.
Altura estática total	0,0000 Ft.	0,0000 m.
Presión de Saturación	1,3917 Psia.	9,5953 kPa.

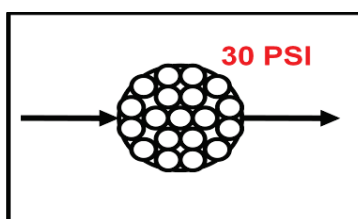
^{*} Ver figura No. 19, pág. 57

Presión Atmosférica	12,7227	Psia.	87,7200	kPa.
---------------------	---------	-------	---------	------

DIFERENCIAL DE ALTURA ESTÁTICA	0,000	Ft.
PERDIDAS POR FRICCIÓN	3,373	Ft.
PERDIDAS POR ACCESORIOS	1,997	Ft.

- **Condiciones especiales.** Al igual que la bomba de bascula de jugo, el sistema de Jugo clarificado posee un intercambiador de calor, con la diferencia que en esta ocasión es uno solo en serie, en la figura No.30, se aprecia el intercambiador de calor y su configuración.

Figura 30. Diagrama esquemático de un intercambiador de calor piro tubular.

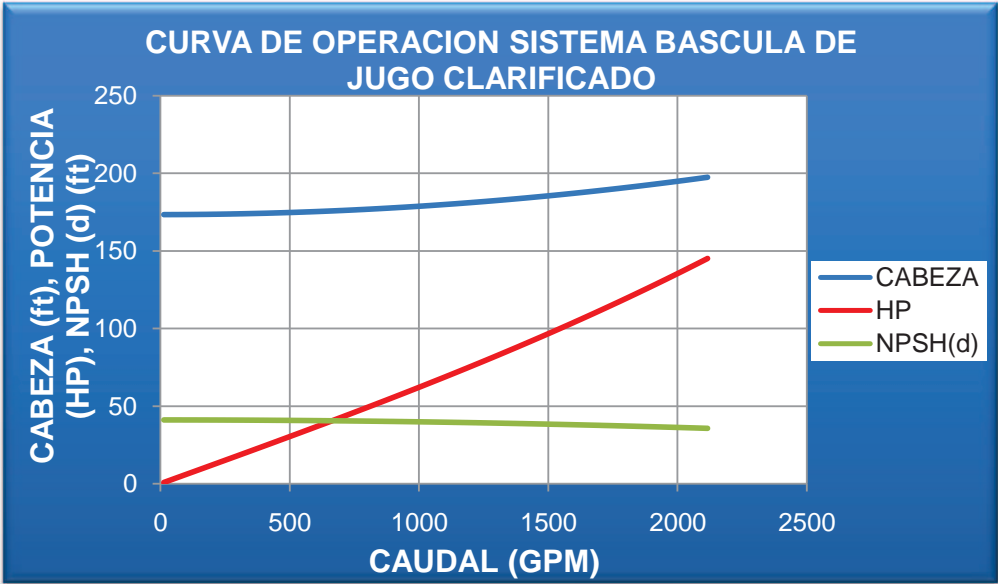


Además del intercambiador de calor piro tubular el sistema consta de un intercambiador de placas el cual presenta una caída de presión de 30 Psi. El cual fue medido por manómetros situados a la entrada y salida del mismo, en condición de caudal de 1000 galones por minuto.

El sistema cuenta también con la condición especial de entrada al evaporador de primer efecto, deposito final del sistema .El evaporador posee en su interior una presión manométrica de 19 Psi.

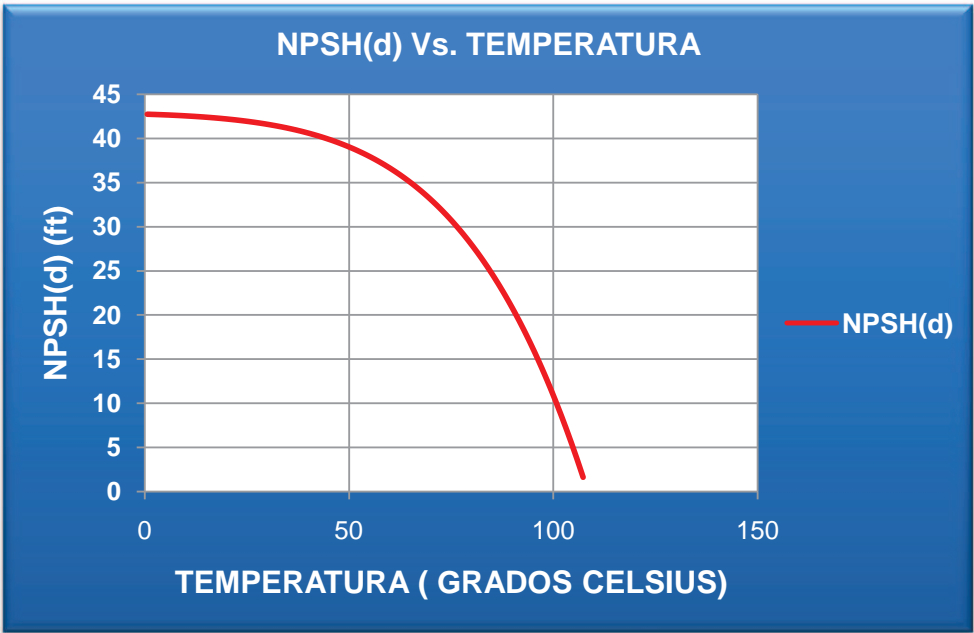
TOTAL CABEZA (SISTEMA)	178,795	Ft.
BHP (ef. bomba 77%)	62,7	H.P.
NPSH (DISPONIBLE)	39,889	Ft.

Figura 31. Curva de Operación Sistema Jugo Clarificado.



Debido a que la temperatura del fluido es una variable en el sistema, se presenta una grafica, figura No.32, en donde se muestra el comportamiento del NPSH (d) en relación al cambio de temperatura del fluido.

Figura 32. Curva NPSH (d) Vs. Temperatura, Sistema Jugo Clarificado.



Ahora entramos a la curva característica de la bomba* , con los datos de velocidad y caudal, seguidamente comparamos las curvas y obtenemos las conclusiones:

Velocidad = 1775 r. p. m.

Impulsor = $13\frac{3}{4}$ pulgadas

Conclusiones

- Se observa que en el punto de operación nos encontramos un caudal de 1000 galones por minuto y una cabeza de 180 ft.
- La eficiencia de la bomba esta en 77%
- El NPSH(r) por la bomba es de 10 ft, muy por debajo al NPSH (d) del sistema de 40 ft, esto da la seguridad de que la bomba no va a presentar problemas de cavitación y además su funcionamiento es el adecuado.
- La potencia requerida por la bomba según las curvas características es de 60 Hp, lo cual es muy inferior a la potencia que posee el motor de la bomba que es de 150 HP.

Recomendaciones

- Para en un futuro aumentar el caudal de operación de la bomba se recomienda aumentar el impulsor a uno de $15\frac{3}{4}$ ", lo cual aumentaría el caudal a 1500 galones por minuto, con una potencia requerida de 100 HP.
- Se recomienda instalar un variador de velocidad, en caso de hacerlo sincronizarlo con el nivel del evaporador de primer efecto, esto sería muy funcional porque así solo utilizaríamos la energía necesaria de operación.

* Ver anexo T, curva característica bomba Worthington 5 LR-15, pág. 159

3.1.5 Bomba Tanque Meladura no Clarificada.

- **Identificación.** En la actualidad la bomba del tanque de meladura no clarificada es la encargada de entregarle la energía suficiente a dicha meladura para que esta llegue a la torre de Sulfatación de Meladura, pero antes habiendo pasado por un intercambiador de calor para mejorar el proceso de Sulfatación.
- **Recolección datos de campo**

BOMBA

MARCA	WORTHINGTON
MODELO	4LR-14
IMPULSOR	12"

MOTOR

MARCA	SIEMENS
POTENCIA (HP)	40
VELOCIDAD (RPM)	1775
ACOPLE	DIRECTO

Condiciones del fluido

SISTEMA		ENG/US		SI
Caudal (g.p.m.)	600	0,8912	Ft. ³ /s.	2,524E-02 m. ³ /s.
Temperatura del fluido (°C)	60	140,0000	°F	60,000 °C
Altura sobre el nivel del mar (m)	1200	3933,7008	Ft.	1200,000 m.
BRIX	65			

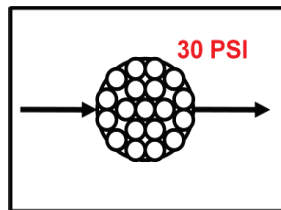
Cálculos

	ENG/US		SI	
Densidad del fluido	81,9347	Lb./ft. ³	1312,471	Kg./m. ³
Viscosidad cinemática	1,993E-04	Ft. ² /s.	1,852E-05	m. ² /s.
Peso específico	0,5690	Psia. /ft.	12,8709	kPa./m.
Altura estática total	57,4147	Ft.	17,5000	m.

Presión de Saturación	2,8931	Psia.	19,9470	KPa.
Presión Atmosférica	12,7227	Psia.	87,7200	KPa.

- **Condiciones especiales.** Al igual que la bomba de Jugo Clarificado , el sistema de Meladura No Clarificada posee un intercambiador de calor , con la diferencia que en esta ocasión es uno solo en serie, en la figura No.33, se aprecia el intercambiador de calor y su configuración.

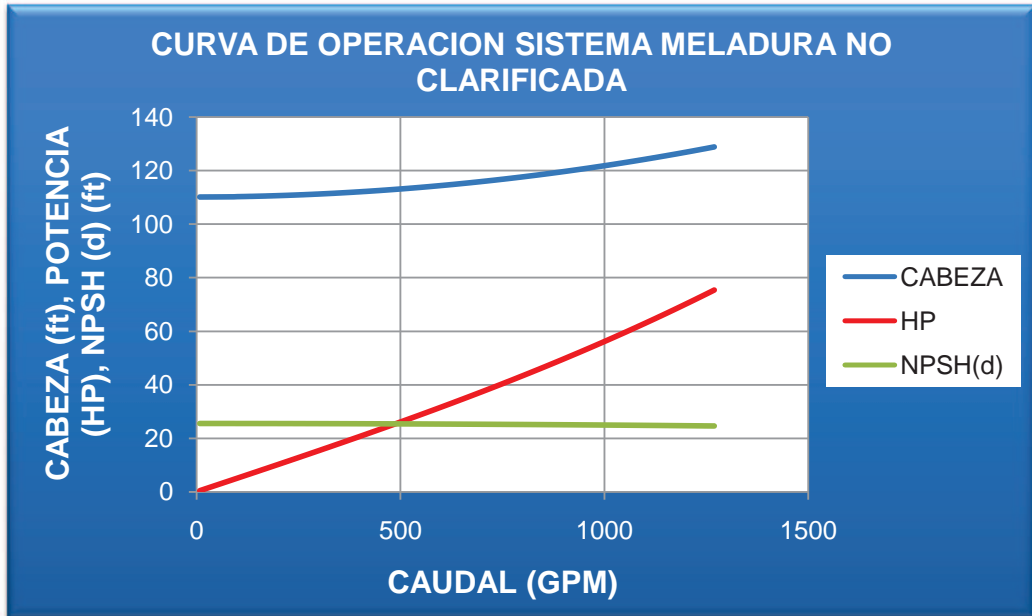
Figura 33. Diagrama esquemático de un intercambiador de calor piro tubular.



DIFERENCIAL DE ALTURA ESTÁTICA	57,415 Ft.
PERDIDAS POR FRICCIÓN	1,353 Ft.
PERDIDAS POR ACCESORIOS	0,599 Ft.

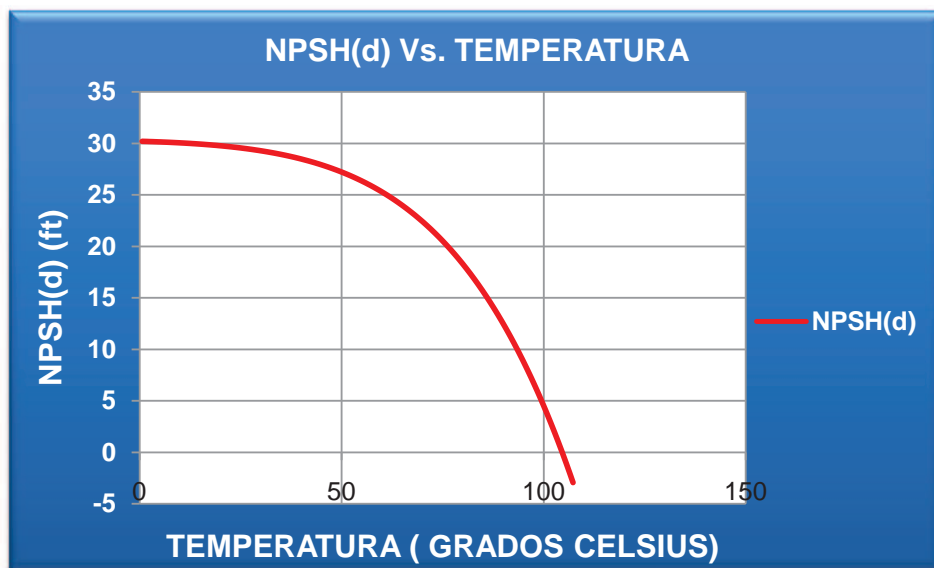
TOTAL CABEZA (SISTEMA)	112,091 Ft.
BHP (ef. bomba 72%)	31,65 H.P.
NPSH (DISPONIBLE)	25,389 Ft.

Figura 34. Curva de Operación Sistema Meladura No Clarificada.



Debido a que la temperatura del fluido es una variable en el sistema, se presenta una grafica, figura No.35, en donde se muestra el comportamiento del NPSH (d) en relación al cambio de temperatura del fluido.

Figura 35. Curva NPSH (d) Vs. Temperatura, Sistema Meladura No Clarificada.



Ahora entramos a la curva característica de la bomba* , con los datos de velocidad y caudal, seguidamente comparamos las curvas y obtenemos las conclusiones:

Velocidad = 1775 r. p. m.

Impulsor = 12 pulgadas

Conclusiones

- Se observa que en el punto de operación nos encontramos un caudal de 800 galones por minuto y una cabeza de 120 ft.
- La eficiencia de la bomba esta en 72%
- El NPSH(r) por la bomba es de 10 ft, muy por debajo al NPSH (d) del sistema de 25 ft, esto da la seguridad de que la bomba no va a presentar problemas de cavitación.

Recomendaciones

- Se recomienda disminuir el impulsor a uno de 11 pulgadas esto con el fin de ajustar el punto de operación a un caudal de 600 galones por minuto o la posibilidad de instalar un variador de velocidad sincronizado a un medidor de flujo volumétrico.

* Ver anexo U , curva característica bomba Worthington 4LR-14, pág. 160

3.1.6 Bomba Tanque Meladura Clarificada.

- **Identificación.** La bomba del tanque de Meladura Clarificada como se puede apreciar en la figura No. 19*. Es la encargada de cederle energía al fluido de tal modo que este pueda llegar hasta el proceso de cristalización (Tachos).
- **Recolección datos de campo**

BOMBA

MARCA	AURORA
MODELO	GGU- 4C
IMPULSOR	10"

MOTOR

MARCA	SIEMENS
POTENCIA (HP)	40
VELOCIDAD (RPM)	1775
ACOPLE	DIRECTO

Condiciones del fluido

SISTEMA		ENG/US		SI
Caudal (g.p.m.)	800	1,7824	Ft.^3/s.	5,047E-02 m.^3/s.
Temperatura del fluido (°C)	75	167,0000	°F	75,000 °C
Altura sobre el nivel del mar (m.)	1200	3933,7008	Ft.	1200,000 m.
BRIX	60			

Cálculos

	ENG/US		SI	
Densidad del fluido	80,0967	Lb./ft.^3	1283,029	Kg./m.^3
Viscosidad cinemática	5,220E-05	Ft.^2/s.	4,850E-06	m.^2/s.
Peso específico	0,5562	Psia./ft.	12,5822	kPa./m.
Altura estática total	73,8189	Ft.	22,5000	m.
Presión de Saturación	5,5980	Psia.	38,5970	kPa.

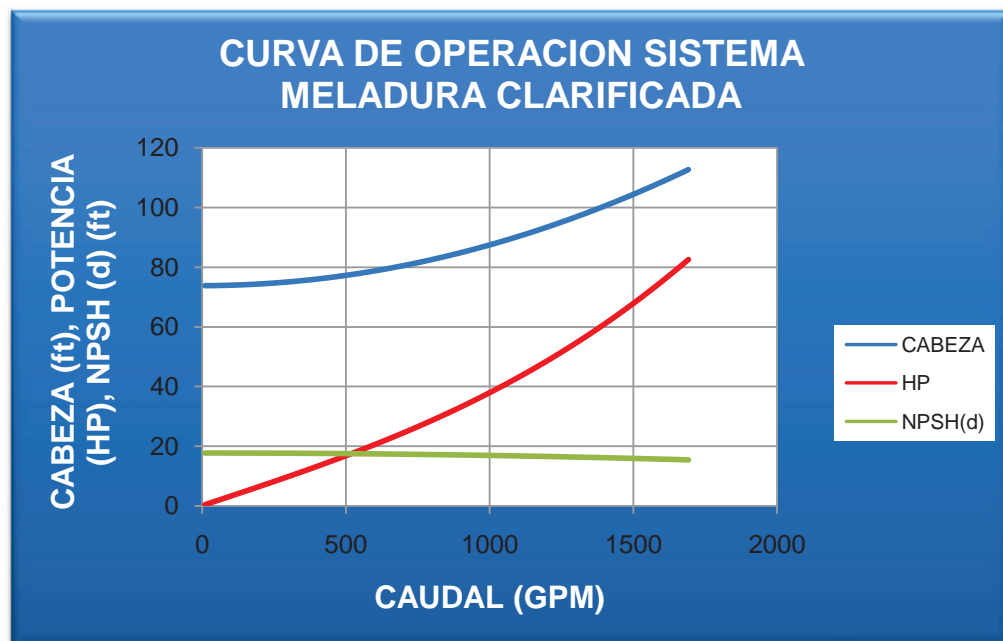
* Ver figura No. 19, pág. 57

Presión Atmosférica	12,7227	Psia.	87,7200	kPa.
---------------------	---------	-------	---------	------

DIFERENCIAL DE ALTURA ESTATICA	73,819 Ft.
PERDIDAS POR FRICCION	6,252 Ft.
PERDIDAS POR ACCESORIOS	2,488 Ft.

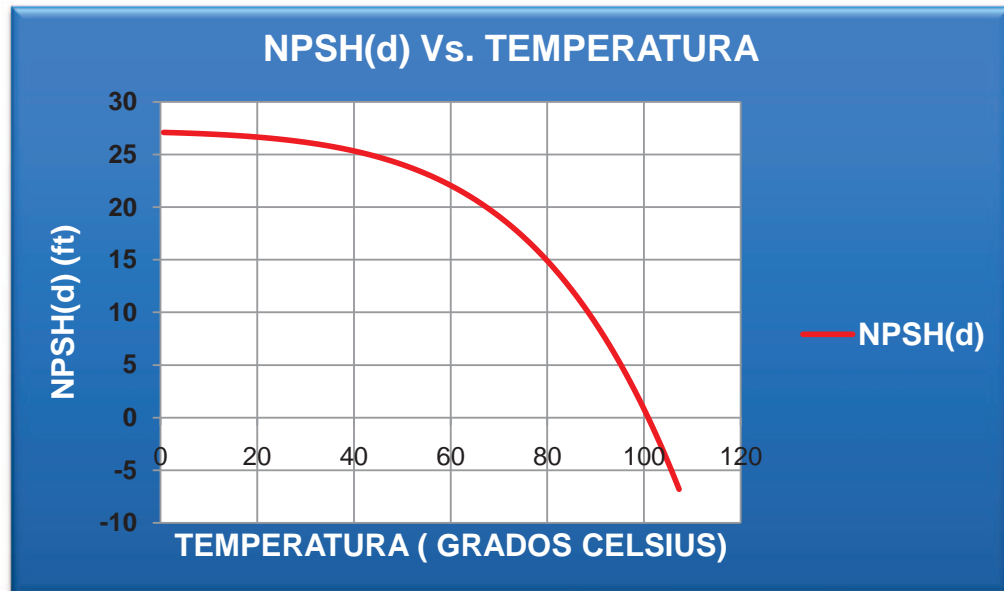
TOTAL CABEZA (SISTEMA)	82,559 Ft.
BHP	31,52 H.P.
NPSH (DISPONIBLE)	17,200 Ft.

Figura 36. Curva de Operación Sistema Meladura Clarificada.



Debido a que la temperatura del fluido es una variable en el sistema, se presenta una grafica, figura No.37, en donde se muestra el comportamiento del NPSH (d) en relación al cambio de temperatura del fluido.

Figura 37. Curva NPSH (d) Vs. Temperatura, Sistema Meladura Clarificada.



Ahora entramos a la curva característica de la bomba*, con los datos de velocidad y caudal, seguidamente comparamos las curvas y obtenemos las

Velocidad = 1775 r. p. m.

Impulsor = 10 pulgadas

Conclusiones

- Se observa que en el punto de operación nos encontramos un caudal de 900 galones por minuto y una cabeza de 85 ft.
- La eficiencia de la bomba se encuentra en 68%
- La potencia requerida por la bomba según la curva característica de la misma es de 28 H.P.
- El NPSH(r) es de 25 ft. El cual es superior al NPSH (d) del sistema que es de 17,2 ft.

* Ver anexo V, curva característica bomba Aurora HC-4C, pág. 161.

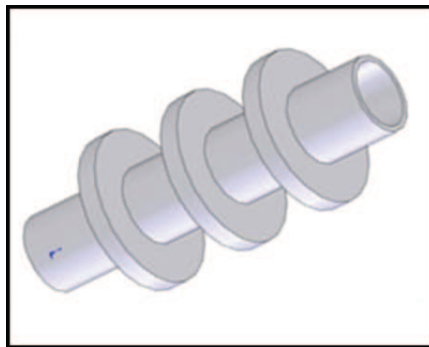
Recomendaciones

- Se recomienda estudiar la posibilidad de reducir el diámetro del impulsor a 9 1/5 pulgadas, para así ajustarse a los requerimientos del sistema y de esta forma mejorar la eficiencia energética del conjunto Bomba – Motor.
- Se recomienda el incorporara al sistema un variador de velocidad el cual puede ser sincronizado con el nivel del tanque de succión (Tanque de Meladura Clarificada) o a un medidor de flujo volumétrico.
- Se recomienda aumentar el NPSH (d), y una forma sería con la realización de una obra civil, comprendida de un desnivel, al Datum actual que es el nivel del primer piso, aproximadamente de 3 metros, para así garantizar que la bomba no sufrirá de cavitación, y su funcionamiento será el más óptimo, a continuación se da el dato simulado con una altura estática de succión 4,5m.

NPSH (DISPONIBLE)	27,76 Ft.
-------------------	-----------

Otra alternativa sería la realización de un disipador de calor en forma de aletas, ver figura No. 38, alrededor de la tubería de llegada al tanque de Meladura Clarificada, así , reduciendo la temperatura del fluido disminuiría su presión de saturación y aumentaría el NPSH(d), esto se puede observar en la Figura No.38.

Figura 38. Representación de disipadores de calor en forma de aletas circulares para disminuir la temperatura de un fluido en un conducto.



3.1.7 Bomba Recuperación Aguas Dulces

- Identificación.** La bomba recuperación de aguas dulces* es la encargada de cederle energía al fluido del tanque de recuperación de aguas dulces, para que este llegue al tanque receptor de jugo diluido y así se integre nuevamente al proceso de producción. La recuperación de aguas dulces se realiza por medio de canales los cuales recogen los fluidos del proceso que pudieran ser desbordados por fugas en los sistemas de bombeo, específicamente en este caso, se menciona , la fuga del sistema Magma , ubicado en la parte inferior del sistema de centrifugación. El funcionamiento de la bomba en cuestión se basa en el paro y arranque sincronizado con el nivel del tanque de aguas dulces.
- Recolección datos de campo**

BOMBA

MARCA	WORTHINGTON
MODELO	3CN - 104 (4X 3)
IMPULSOR	11 1/8 "

MOTOR

MARCA	SIEMENS
POTENCIA (H.P.)	40
VELOCIDAD (R.P.M.)	1775
ACOPLE	DIRECTO

SISTEMA		ENG/US		SI	
Caudal (g.p.m.)	400	1,1140	Ft.^3/s.	3,155E-02	m.^3/s.
Temperatura del fluido (°C)	30	86,0000	°F	30,000	°C
Altura sobre el nivel del mar (m)	1200	3933,7008	Ft.	1200,000	m.
BRIX	50				

* Ver fig. 19, pág. 57

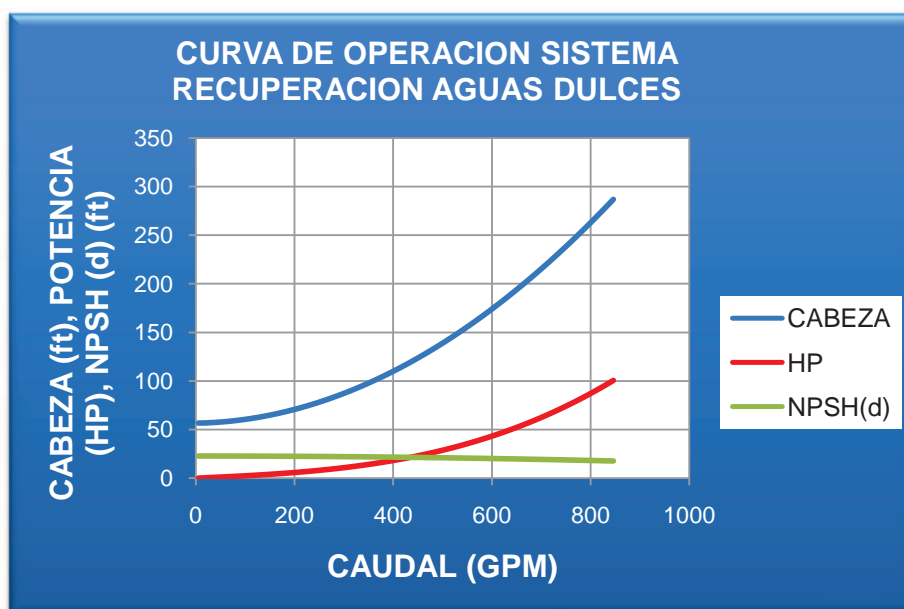
Cálculos

	ENG/US		SI	
Densidad del fluido	76,5857	Lb./ft.^3	1226,788	Kg./m.^3
Viscosidad cinemática	8,880E-05	Ft.^2/s.	8,250E-06	m.^2/s.
Peso específico	0,5319	Psia./ft.	12,0307	kPa./m.
Altura estática total	56,7585	Ft.	17,3000	m.
Presión de Saturación	0,6160	Psia.	4,2469	KPa.
Presión Atmosférica	12,7227	Psia.	87,7200	KPa.

DIFERENCIAL DE ALTURA ESTATICA	56,759 Ft.
PERDIDAS POR FRICCION	42,892 Ft.
PERDIDAS POR ACCESORIOS	10,372 Ft.

TOTAL CABEZA (SISTEMA)	110,022 Ft.
BHP (ef. Bomba 72%)	18,96 H.P.
NPSH (DISPONIBLE)	21,599 Ft.

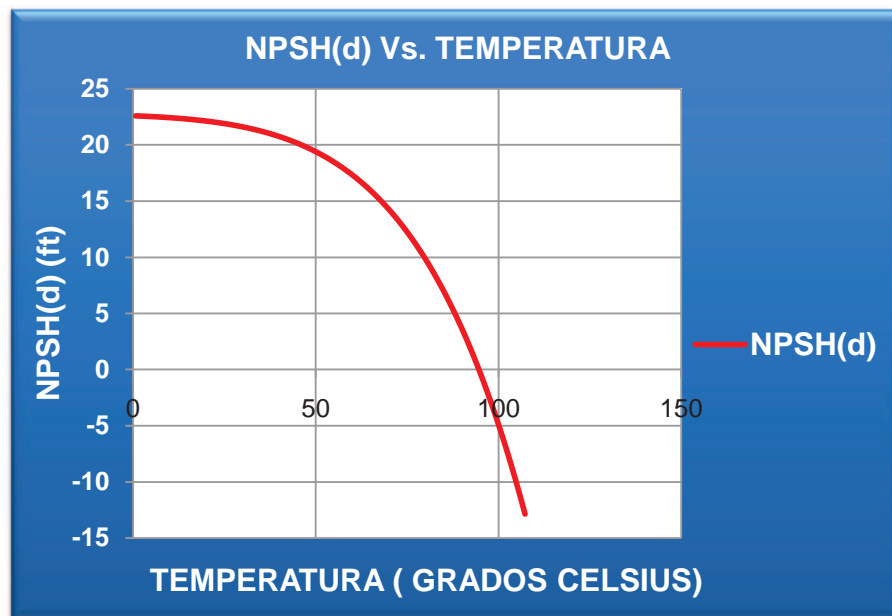
Figura 39. Curva de Operación Sistema Recuperación Aguas Dulces



Debido a que la temperatura del fluido es una variable en el sistema, se presenta

una grafica, figura No.40, en donde se muestra el comportamiento del NPSH (d) en relación al cambio de temperatura del fluido.

Figura 40. Curva NPSH (d) Vs. Temperatura, sistema Recuperación Aguas D.



Ahora entramos a la curva característica de la bomba*, con los datos de velocidad y caudal, seguidamente comparamos las curvas y obtenemos las conclusiones:

Velocidad = 1775 r. p. m.

Impulsor = $11 \frac{1}{8}$ pulgadas

Conclusiones

- Se observa que en el punto de operación nos encontramos un caudal de 450 galones por minuto y una cabeza de 120 ft.
- La bomba se encuentra en 72% de eficiencia
- La potencia requerida por la bomba es 20 HP lo cual es muy inferior a la potencia del motor instalado

* Ver anexo W, curva característica bomba Worthington 3CN – 104, pág. 162.

- El NPSH(r) es de 10 ft, muy inferior al NPSH (d) del sistema que es de 20 ft.

Recomendaciones

- Debido a que el volumen del tanque de succión es muy pequeño y esto presenta un paro y arranque de la bomba con una frecuencia de 30 segundos, este paro y arranque tan frecuente puede desgastar el material del eje y la manzana que es la que acopla el eje de la bomba con el impulsor, se recomienda la disminución del diámetro del impulsor a 10 pulgadas reduciendo así el caudal a 350 galones por minuto.
- Se recomienda la instalación de un variador de velocidad sincronizado al nivel del tanque de succión
- Se recomienda la construcción de un tanque de mayor capacidad, esto con el fin de que la bomba no lo vacíe tan rápidamente.

3.1.8 Bomba Mosto – Destilería.

- **Identificación.** La bomba de mosto* es la encargarla de cederle al fluido denominado como mosto, la energía necesaria para que este llegue hasta el tanque recibidor de mosto ubicado en la destilería del ingenio, para tal trabajo el fluido debe atravesar un calentador de placas y después por un disipador de calor. El mosto es la materia prima de la destilería para la producción de alcohol carburante, se observo que el mosto incluía ciertas bacterias que no eran benéficas para el proceso de fermentación en la destilería y entonces se procedió al calentamiento y rápido enfriamiento del fluido para eliminarlas.
- **Recolección datos de campo**

BOMBA

MARCA	DURCO
MODELO	STD-A70
IMPULSOR	9"

* Ver fig. 19, pág. 57

MOTOR

MARCA	GENERAL ELECTRIC
POTENCIA (H.P.)	40
VELOCIDAD (R.P.M.)	3550
ACOPLE	DIRECTO

SISTEMA		ENG/US	SI
Caudal (g.p.m.)	400	0,8912 Ft. ³ /s.	2,524E-02 m. ³ /s.
Temperatura del fluido (°C)	35	95,0000 °F	35,000 °C
Altura sobre el nivel del mar (m)	1200	3933,7008 Ft.	1200,000 m.
BRIX	60		

Cálculos

	ENG/US	SI
Densidad del fluido	80,0967 Lb./ft. ³	1283,029 Kg./m. ³
Viscosidad cinemática	2,309E-04 Ft. ² /s.	2,145E-05 m. ² /s.
Peso específico	0,5562 Psia./ft.	12,5822 kPa./m.
Altura estática total	45,9318 Ft.	14,0000 m.
Presión de Saturación	0,8164 Psia.	5,6291 KPa.
Presión Atmosférica	12,7227 Psia.	87,7200 KPa.

Condiciones especiales

El sistema de Mosto - Destilería posee un intercambiador de calor de paletas y además un disipador de calor "Serpentín", para enfriar el fluido (Mosto).

CALENTADOR DE PLACAS	60 Ft.
SERPENTIN (DISIPADOR DE CALOR)	10 Ft.

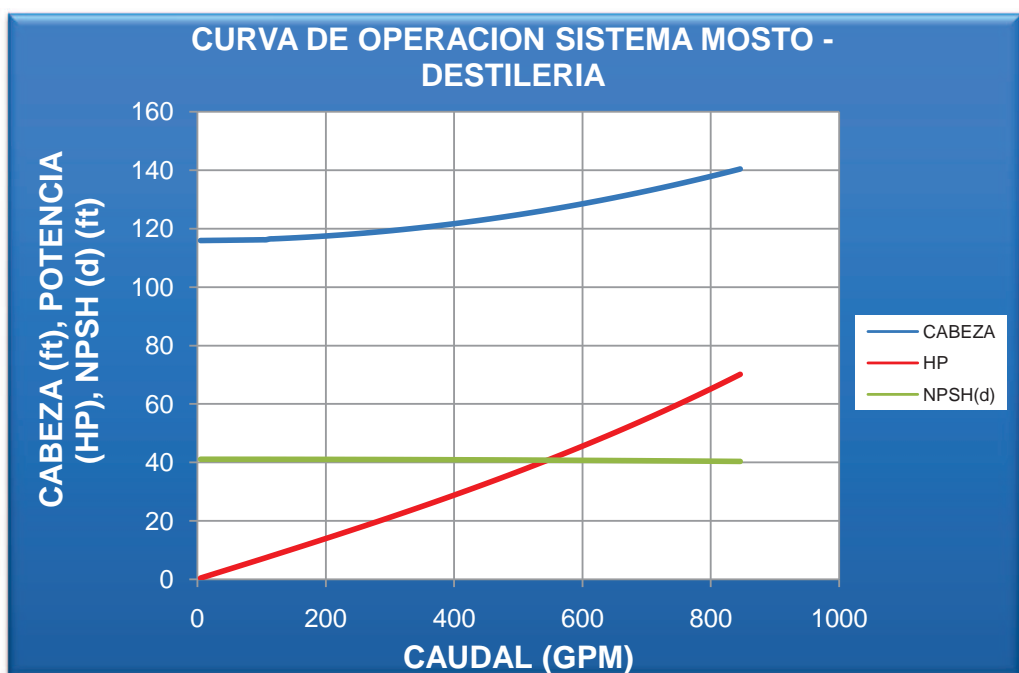
Esta pérdida se midió por medio de manómetros ubicados a la entrada y salida del accesorio a un caudal de 400 galones por minuto.

DIFERENCIAL DE ALTURA ESTATICA	45,932 Ft.
--------------------------------	------------

PERDIDAS POR FRICCION	5,142	Ft.
PERDIDAS POR ACCESORIOS	0,619	Ft.

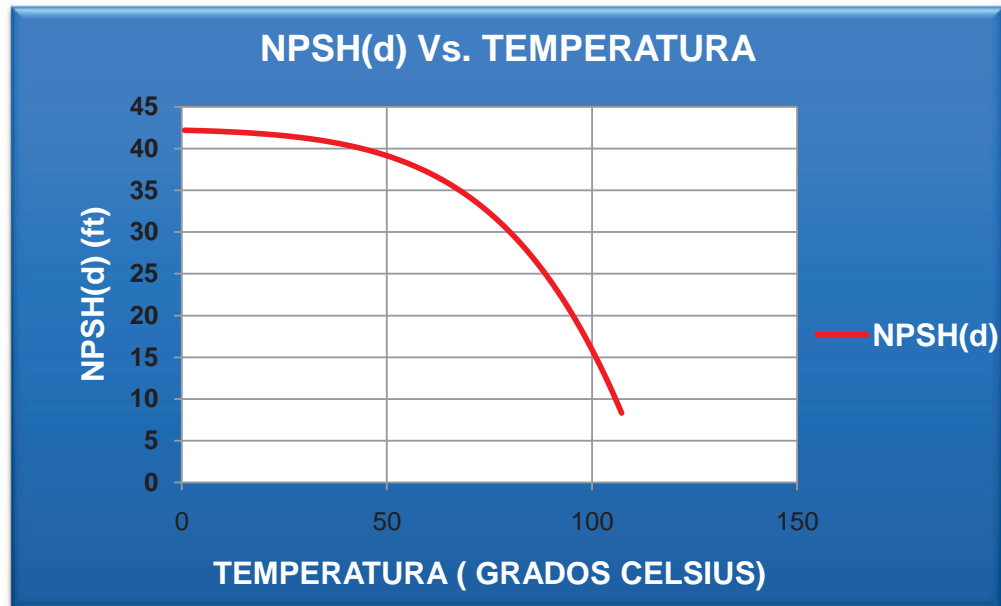
TOTAL CABEZA (SISTEMA)	121,693	Ft.
BHP (ef. Bomba 55%)	28,72	H.P.
NPSH (DISPONIBLE)	40,900	Ft.

Figura 41. Curva de Operación Sistema Mosto – Destilería.



Debido a que la temperatura del fluido es una variable en el sistema, se presenta una grafica, figura No.42, en donde se muestra el comportamiento del NPSH (d) en relación al cambio de temperatura del fluido.

Figura 42. Curva NPSH (d) Vs. Temperatura, Sistema Mosto - Destilería.



Ahora entramos a la curva característica de la bomba*, con los datos de velocidad y diámetro del impulsor, seguidamente comparamos las curvas y obtenemos las conclusiones:

Velocidad = 3550 r. p. m.

Impulsor = 9 pulgadas

Conclusiones

- Se observa que en el punto de operación nos encontramos un caudal de 800 galones por minuto y una cabeza de 160 ft, muy superior a lo necesitado.
- La eficiencia de la bomba en este punto de operación es de 55%
- El NPSH(r) en el punto de operación es de 9 m = 30 ft. Inferior al NPSH (d) del sistema de 40 ft.
- La potencia requerida en este punto es de 28 HP inferior a la potencia del

* Ver anexo X, curva característica Bomba Durco STD - A70, pág. 163.

motor instalado.

Recomendaciones

- Se recomienda la reducción del diámetro del impulsor a 8 pulgadas, así se ajustaría el punto de operación a el caudal requerido además de aumentar la eficiencia de la bomba a 60% y la potencia requerida a 20HP.

3.2. PROYECTOS

3.2.1. Sulfatación en caliente.

Condición actual del sistema de bombeo “Bascula de Jugo”

En la actualidad el jugo diluido de caña que se encuentra en el tanque de “Bascula de Jugo”, es llevado al “Tanque Recibidor Jugo Diluido”, ubicado al nivel de los Evaporadores, una vez llegado el jugo a este tanque abierto, a presión atmosférica, por acción de la gravedad, el jugo es conducido a las torres de sulfatación y de allí llega al tanque de Jugo en Calado.

La energía necesaria para que el fluido llegue del tanque de Bascula de Jugo al Tanque Recibidor, es aportada por una Bomba Centrifuga ; marca Wilfley HD 8 X 6 , con un motor en transmisión por poleas relación (Motor 14½” - Bomba 20½”) marca Lesson , de 75 HP. Y 1190 rpm.

En el trabajo general del análisis de la línea de producción ya se había calculado las condiciones de este sistema

Ahora se presenta el nuevo sistema de operación, ver figura No. 17, en donde se observa la nueva línea de corriente, la cual se requiere para el procedimiento de sulfatado con el jugo caliente; para esto se traza una ruta alterna de tubería que lleve el jugo a los calentadores secundarios (intercambiadores de calor), los cuales se encuentran en paralelo y representan una pérdida de 30 Psi. Cada uno. Por último el jugo llega al “Tanque Recibidor Del Jugo Diluido” y así por gravedad el jugo ya caliente es sulfatado.

Figura 43. Dibujo Esquemático, Proyecto Supresión del Calentamiento de la Meladura

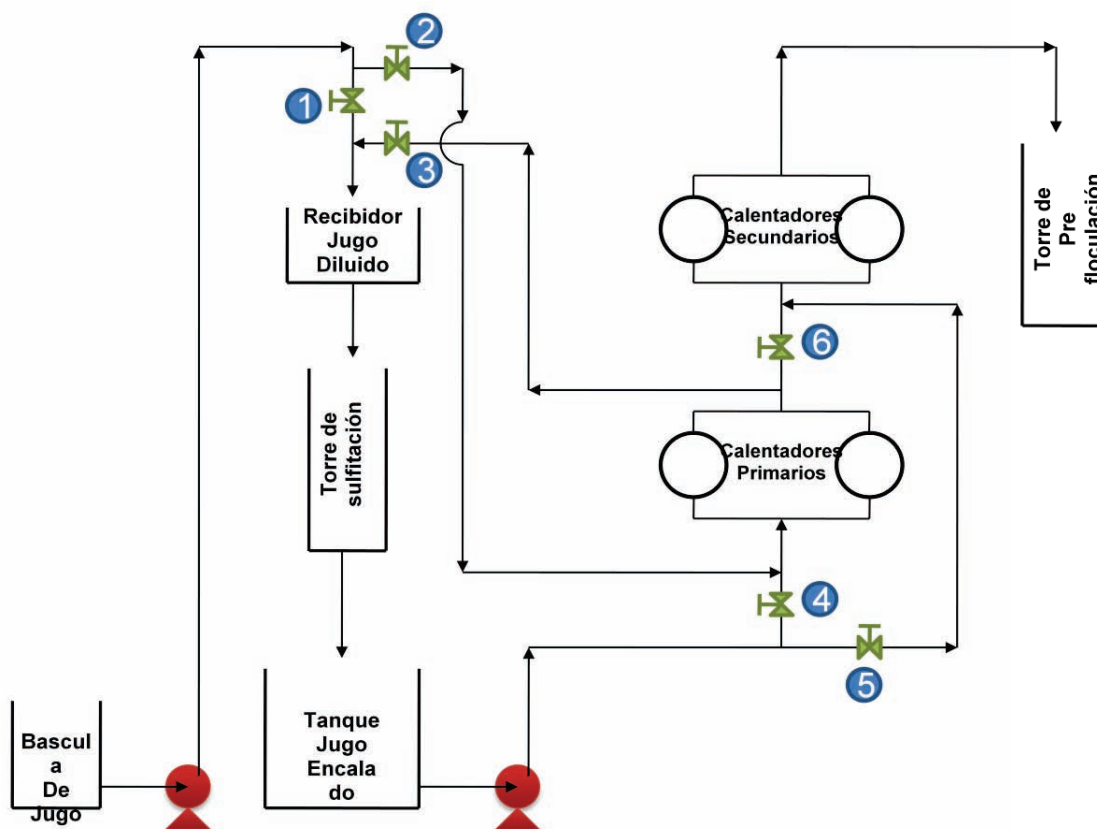


Tabla 9. Configuración válvulas figura No. 43

Válvula	Condición actual	Condición futura
①	Abierta	Cerrada
②	Cerrada	Abierta
③	Cerrada	Abierta
④	Abierta	Cerrada
⑤	Cerrada	Abierta
⑥	Abierta	Cerrada

Se realizaron los cálculos para poder escoger una bomba que cumpla con el trabajo solicitado así como también un motor eléctrico y la relación de velocidad requerida. A continuación los cálculos para la nueva configuración del sistema.

3.2.1.1 Bascula de Jugo (1).

Condiciones del fluido

SISTEMA		ENG/US	SI
Caudal (g.p.m.)	2000	4,4560 Ft. ³ /s.	1,262E-01 m. ³ /s.
Temperatura del fluido (°C)	30	86,0000 °F	30,000 °C
Altura sobre el nivel del mar (m.)	1200	3933,7008 Ft.	1200,000 m.
BRIX	15		

Cálculos

	ENG/US	SI
Densidad del fluido	66,0297 lb./ft. ³	1057,697 Kg./m. ³
Viscosidad cinemática	1,337E-05 Ft. ² /s.	1,243E-06 m. ² /s.
Peso específico	0,4585 Psia./ft.	10,3725 kPa./m.
Altura estática total	50,853 Ft.	15,5 m.
Presión de Saturación	0,6160 Psia.	4,2469 kPa.
Presión Atmosférica	12,7227 Psia.	87,7200 kPa.

DIFERENCIA DE ALTURA ESTÁTICA	54,274 Ft.
PERDIDAS POR FRICCIÓN	23,210 Ft.
PERDIDAS POR ACCESORIOS	34,519 Ft.

TOTAL CABEZA (SISTEMA)	144,003 Ft.
BHP (ef. Bomba 60%)	128,39 H.P.
NPSH (DISPONIBLE)	31,141 Ft.

Figura 44. Curva de Operación Sistema Báscula de Jugo, Proyecto Sulfatación en Caliente

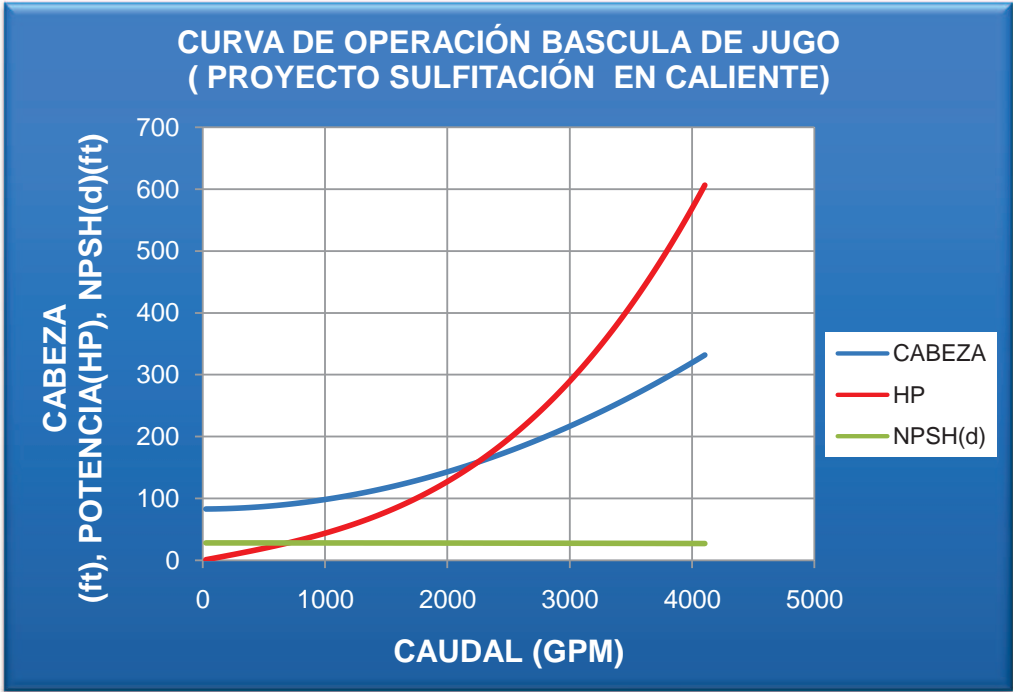
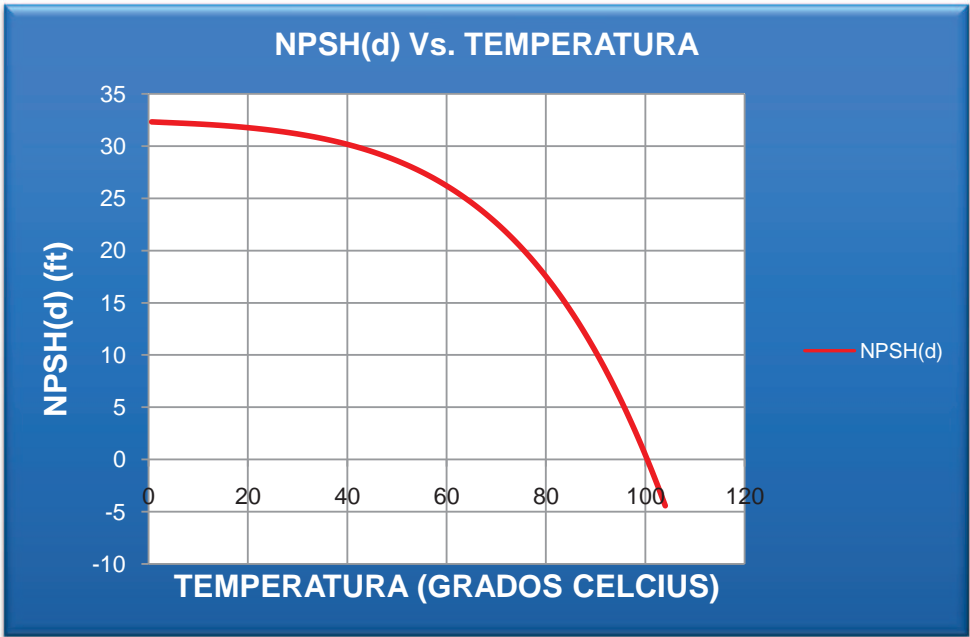


Figura 45. Curva de Operación NPSH (D), Báscula de Jugo, Proyecto Sulfatación en Caliente



3.2.1.2. Tanque Jugo Encalado (1)

Condiciones del fluido

SISTEMA		ENG/US		SI
Caudal (g.p.m.)	2000	4,4560	Ft. ³ /s.	1,262E-01 m. ³ /s.
Temperatura del fluido (°C)	30	86,0000	°F	30,000 °C
Altura sobre el nivel del mar (m)	1200	3933,7008	Ft.	1200,000 m.
BRIX	15			

Cálculos

CALCULOS			
	ENG/US		SI
Densidad del fluido	66,0297	Lb./ft. ³	1057,697 Kg./m. ³
Viscosidad cinemática	7,427E-06	Ft. ² /s.	6,900E-07 m. ² /s.
Peso específico	0,4585	Psia./ft.	10,3725 kPa./m.
Altura estática total	55,7743	Ft.	17,0000 m.
Presión de Saturación	2,8931	Psia.	19,9470 kPa.
Presión Atmosférica	12,7227	Psia.	87,7200 kPa.

DIFERENCIAL DE ALTURA ESTATICA	55,774 Ft.
PERDIDAS POR FRICCION	14,960 Ft.
PERDIDAS POR ACCESORIOS	2,964 Ft.

TOTAL CABEZA (SISTEMA)	106,410 Ft.
BHP (ef. Bomba 60%)	94,88 H.P.
NPSH (DISPONIBLE)	30,877 Ft.

Figura 46. Curva de Operación Sistema Tanque Jugo Encalado, Proyecto Sulfatación en Caliente

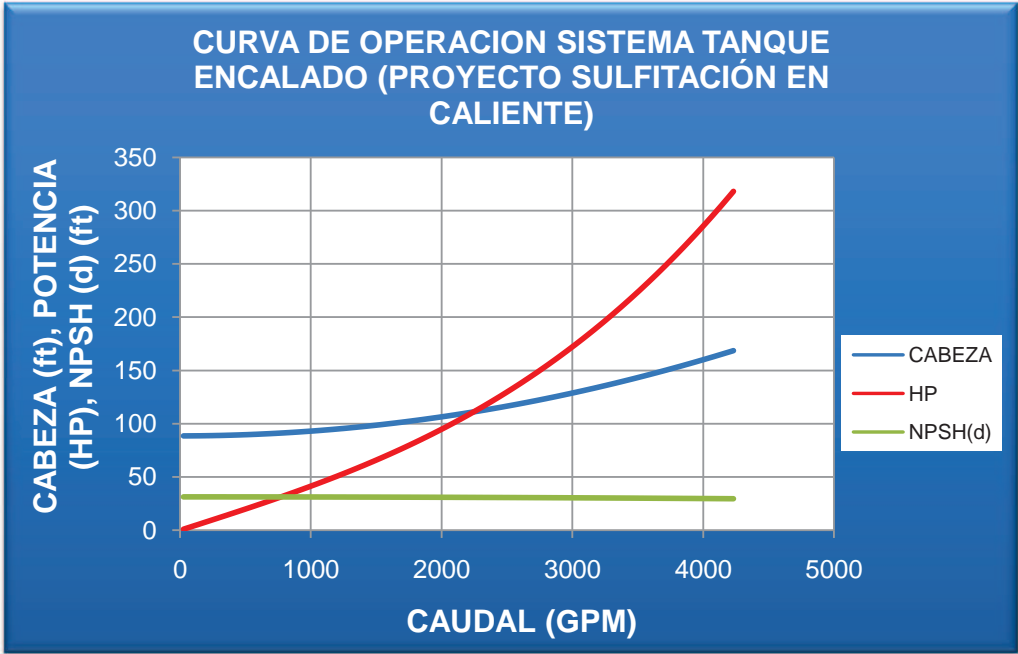
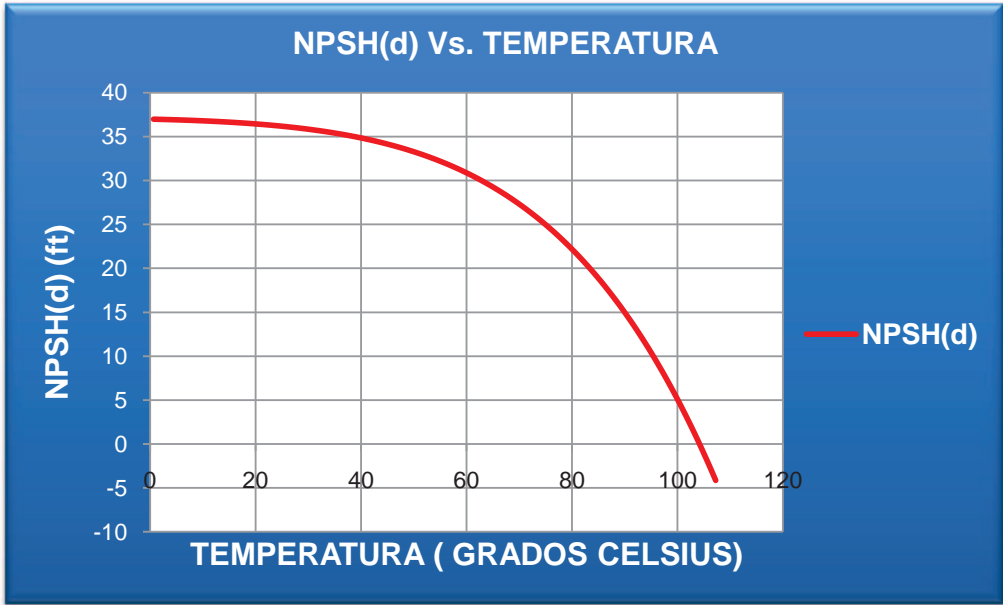


Figura 47. Curva de Operación NPSH (D), Tanque Jugo Encalado, Proyecto Sulfatación en Caliente



Obtenidos estos cálculos, escogemos las siguientes bombas y motores

3.2.1.3. Bascula de jugo (2)

BOMBA	
TIPO	CENTRIFUGA
MARCA	WILFLEY
MODELO	HD 10 X 6
IMPULSOR	26"
MOTOR	
TIPO	ELECTRICO TRIFASICO
MARCA	
POTENCIA	400 HP
VELOCIDAD	1190 RPM
ACOPLE	
ACOPLE POR POLEA RELACION (M 12 ½"-B 18 ½ ")	

$$\text{Velocidad} = \frac{\text{r. p. m. (Motor)} * \text{Diametro pola del motor}}{\text{Diametro polea de la bomba}} = \frac{1190 * (12\frac{1}{2} \text{ plg.})}{(18\frac{1}{2} \text{ plg.})}$$

$$= 804 \text{ r. p. m.}$$

Análisis punto de operación

Ahora entramos a la curva característica de la bomba* , con los datos de velocidad, seguidamente comparamos las curvas y obtenemos las conclusiones:

Conclusiones

- Comparando las curvas de operación del sistema con la curva característica de la bomba, para el punto de operación nos da un caudal de 2000 galones por minuto y una cabeza de 150 ft.
- La eficiencia de la bomba para el punto de operación es de 68 %

* Ver anexo S, Curva característica bomba Wilfley HD 10 x 6, pág. 158.

- El nuevo cálculo del BHP para una eficiencia del 68% queda:

$$\text{BHP} = \left[\frac{\left(4,45 \frac{\text{ft}^3}{\text{s}}\right) (144\text{ft}) \left(0,4585 \frac{\text{psia}}{\text{ft}}\right)}{0,68} \right] * 0.2618 = 113 \text{ HP}$$

- El NPSH(r) de la bomba para el punto de operación es de 25 ft. El cual es mucho menor al NPSH (d) que es de 31ft.

Recomendaciones

- Se recomienda realizar la instalación de un variador de velocidad sincronizado con el nivel del Tanque de Bascula de Jugo, lo anterior para conservar una altura de succión constante para no sufrir casos de cavitación.

3.2.1.4. Tanque encalado (2)

BOMBA	
TIPO	CENTRIFUGA
MARCA	WILFLEY
MODELO	HD 8 X 6
MOTOR	
TIPO	ELECTRICO TRIFASICO
MARCA	SIEMENS
POTENCIA	150 H.P.
VELOCIDAD	1790 R.P.M.
ACOPLE	
ACOPLE POR POLEA RELACION (M 12"-B 23 ½ ")	

$$\text{Velocidad} = \frac{\text{r. p. m. (Motor)} * \text{Diametro pola del motor}}{\text{Diametro polea de la bomba}} = \frac{1790 * (12 \text{ plg.})}{(23 \frac{1}{2} \text{ plg.})}$$

$$= 914 \text{ r. p. m.}$$

Consideraciones

- Debido a la implementación en el ingenio providencia de variadores de velocidad en sistemas de bombeo en donde el flujo volumétrico es variable dependiendo de la molienda del momento, se referirá a continuación el funcionamiento de dicho proceso.
- El variador de velocidad fue sincronizado con el nivel del tanque de jugo encalado, así se mantuvo un nivel adecuado no solo por motivos de molienda, sino, también por la bomba ; porque la altura de succión, va directamente ligado a la potencia requerida por el sistema, recordando:

$$H = (z_2 - z_1) + \sum H_{rp(1-2)} + \sum H_{rs(1-2)}$$

Siendo:

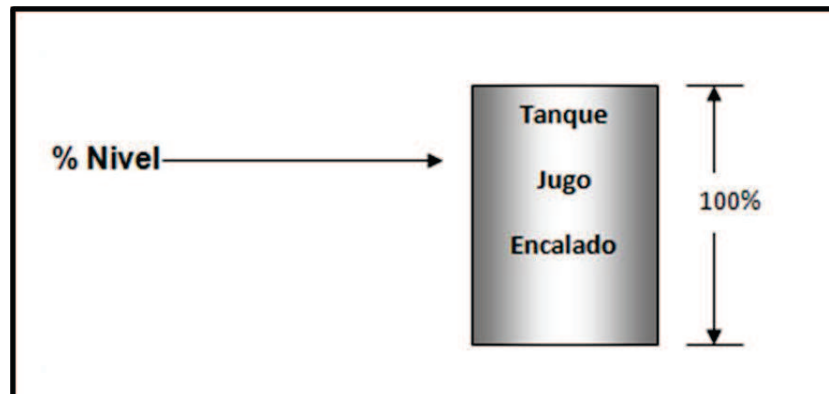
z_1 = Altura de succión con respecto al nivel de la Bomba

$$P = \frac{QH\gamma}{\eta}$$

Tabla 10. Datos obtenidos comportamiento, Proyecto sulfatación en caliente (sistema tanque jugo encalado- Variador de Velocidad)

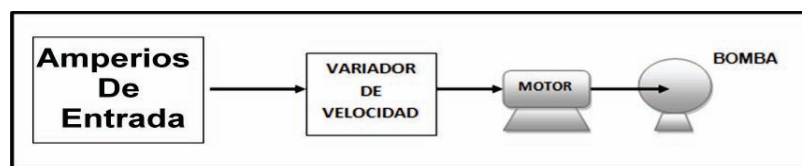
Flujo (ton.h)	Hz	% Nivel (Encalado)	Amperios (Entrada)	Caballos de Potencia	Cabeza (Psi)
366,5	55	9,6	127,9	111,1042346	48
366	50	11,4	127,8	111,0173666	48,5
410,25	55	14,2	157	136,3828369	52
442,1	55	14,5	149,2	129,607129	65
402,5	50	12,7	116	100,7669368	55
397,5	50	14	117	101,6356173	55
345	45	17,8	88	76,44388308	47
351	45	32,5	89,3	77,57316772	47
382,5	50	41	116	100,7669368	56
404,1	50	44	116	100,7669368	56
459	55	0	148	128,5647125	64
447	52	40	129	112,0597832	50

Figura 48. Dibujo esquemático de la medición del porcentaje de nivel del Tanque de Jugo Encalado



- Amperios (Entrada)

Figura 49. Dibujo esquemático de la medición de los Amperios de entrada



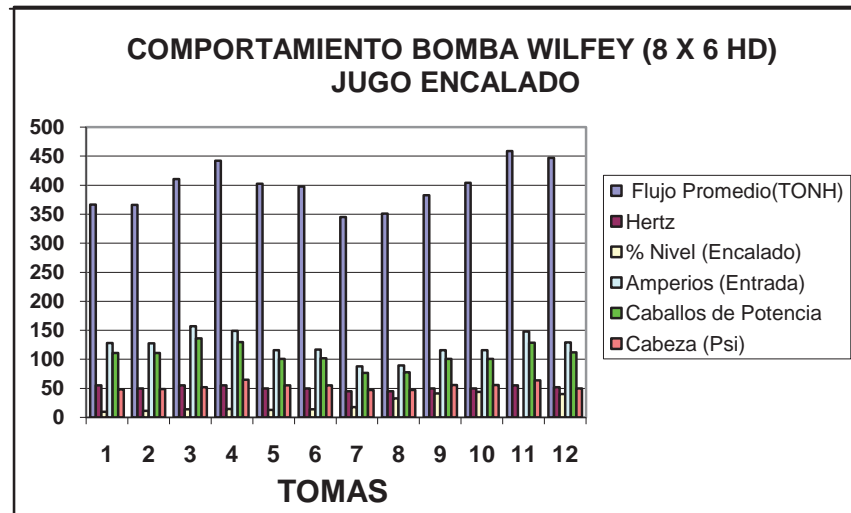
$$\text{Caballos de Potencia} = \text{HP} = A * V * \sqrt{3} * \cos \varphi$$

Donde:

- A = Amperios
- V = Voltios
- $\sqrt{3}$ = Motor Trifásico
- $\cos \varphi$ = factor de potencia = 0,85

Cabeza (Psi) = Se toma la presión manométrica a la descarga de la Bomba.

Figura 50. Grafico de barras, datos obtenidos Proyecto Sulfatación en Caliente



Conclusiones

- Debido al cambio de la configuración del sistema de sulfatación; ahora realizándolo con el fluido a una temperatura de 80°C aproximadamente, se obtiene múltiples beneficios, primero el acto de sulfatación es más eficiente a nivel molecular y segundo la nueva reorganización del acto de calentamiento permitió modificar las velocidades de las bombas, ajustándose las mismas al caudal necesitado.
- Debido a la puesta en marcha del variador de velocidad para la Bomba de Jugo Encalado, se logro un nivel de succión constante y solo se utilizará la energía necesaria para el trabajo requerido, esto último siendo de mucha importancia por su reflejo en el consumo energético de la empresa.

Recomendaciones:

- Se recomienda realizar un seguimiento al comportamiento del sistema en lo que concierne a su consumo energético, además poner por ejemplo este proyecto para futuros cambios en todas las áreas donde haya sistemas de bombeo.

3.2.2. Clarificación meladura de cuarto efecto

Consideraciones

En el proceso de evaporación , cuando la meladura sale del cuarto efecto posee una temperatura de 85°C y un grado Brix de 50 , de ahí es conducida a un quinto efecto en donde la meladura aumenta su grado Brix hasta 65, de ahí llega por energía potencial a un tanque de meladura no clarificada, por medio de una bomba la meladura es llevada atreves de un intercambiador de calor , el cual aumenta la temperatura de la meladura hasta 85°C , lo cual es indispensable para el siguiente paso que realiza la meladura el cual es su sulfatación y clarificación, la meladura ya clarificada llega a un tanque llamado de meladura clarificada , pero en el proceso de sulfatación y clarificación la meladura a disminuido a un grado Brix de 60° aproximadamente, siguiendo el proceso de producción del azúcar.

Objetivo

El objetivo de este proyecto es el de aprovechar la temperatura con la que sale la meladura sin clarificar del evaporador No. 4 para realizar la sulfatación de la misma y después conducir la meladura ya clarificada al evaporador No. 5 para terminar el proceso de evaporación, así al final la empresa no realiza el calentamiento de la meladura por intermedio de los Intercambiadores de calor y se ahorran aproximadamente 9000 lb de vapor.

A continuación en la figura No. Se muestran la ruta actual de la meladura y también la ruta proyectada para cumplir el proyecto anteriormente nombrado.

Figura 51. Proyecto Clarificación Meladura de Cuarto Efecto

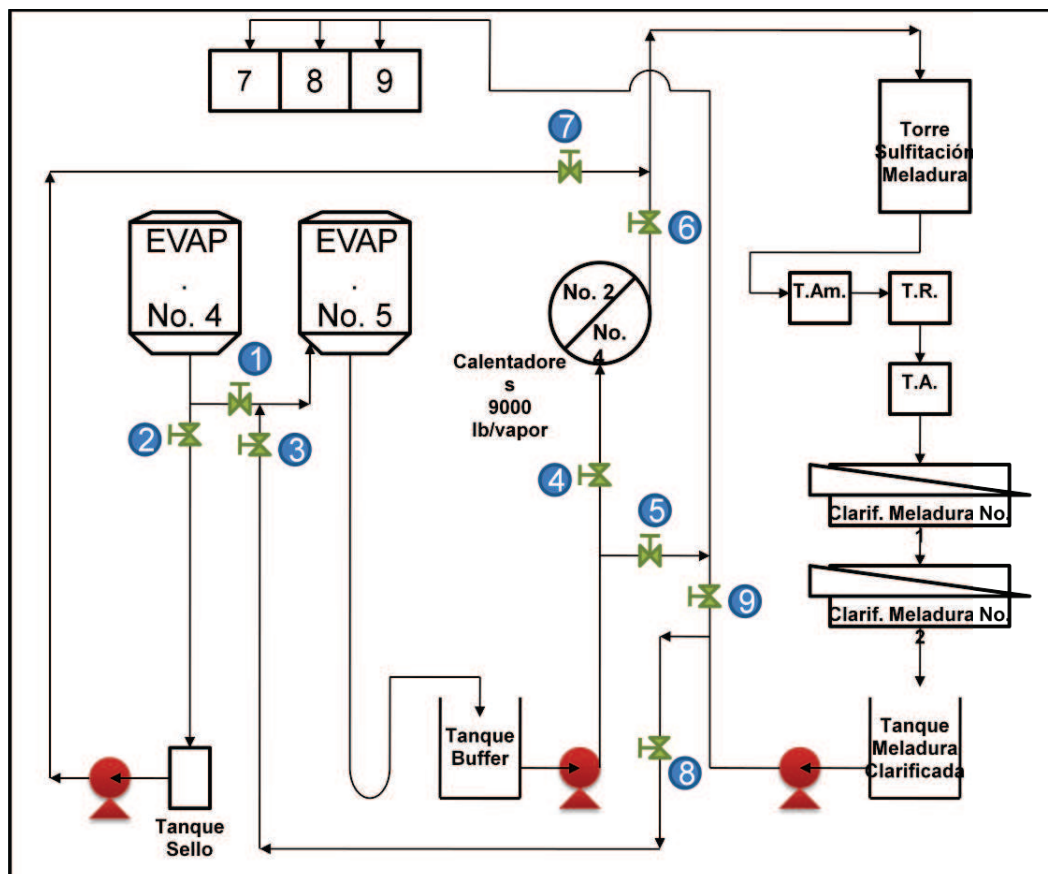


Tabla 11. Configuración válvulas figura No. 51

Válvula	Condición actual	Condición futura
①	Abierta	Cerrada
②	Cerrada	Abierta
③	Cerrada	Abierta
④	Abierta	Cerrada
⑤	Cerrada	Abierta
⑥	Abierta	Cerrada
⑦	Cerrada	Abierta
⑧	Cerrada	Abierta
⑨	Abierta	Cerrada

Anteriormente se habían calculado los parámetros de operación de los sistemas:

- Tanque meladura clarificada
- Tanque meladura no clarificada.

Ahora corresponde calcular los nuevos sistemas de operaciones para la nueva configuración de red de tuberías del proyecto en cuestión, además de la adecuación de una nueva bomba en el “Tanque sello” para completar el proyecto.

Dado el caso de dejar los mismos conjuntos Bomba-Motor en los sistemas; tanque meladura clarificada y tanque meladura no clarificada, es necesario comparar las nuevas curvas de operación de los sistemas con las curvas características de cada bomba para poder obtener conclusiones precisas acerca de posibles modificaciones, con el fin de mejorar la eficiencia de los sistemas.

3.2.2.1. Sistema Tanque meladura Clarificada a 5 efecto-(Evaporadores).

SISTEMA		ENG/US		SI
Caudal (g.p.m.)	600	1,3368	Ft. ³ /s.	3,785E-02 m. ³ /s.
Temperatura del fluido (°C)	75	167,0000	°F	75,000 °C
Altura sobre el nivel del mar (m)	1200	3933,7008	Ft.	1200,000 m.
BRIX	65			

CALCULOS				
	ENG/US		SI	
Densidad del fluido	81,9347	Lb./ft. ³	1312,471	Kg./m. ³
Viscosidad cinemática	1,117E-04	Ft. ² /s.	1,038E-05	m. ² /s.
Peso específico	0,5690	Psia./ft.	12,8709	kPa./m.
Altura estática total	50,8530	Ft.	15,5000	m.
Presión de Saturación	5,5980	Psia.	38,5970	kPa.
Presión Atmosférica	12,7227	Psia.	87,7200	kPa.

DIFERENCIAL DE ALTURA ESTATICA	50,853	Ft.
PERDIDAS POR FRICCION	2,598	Ft.
PERDIDAS POR ACCESORIOS	1,111	Ft.

TOTAL CABEZA (SISTEMA)	54,562 Ft.
BHP	18,11 H.P.
NPSH (DISPONIBLE)	17,283 Ft.

Figura 52. Curva de Operación Sistema Meladura Clarificada, Proyecto Clarificación Meladura De Cuarto Efecto

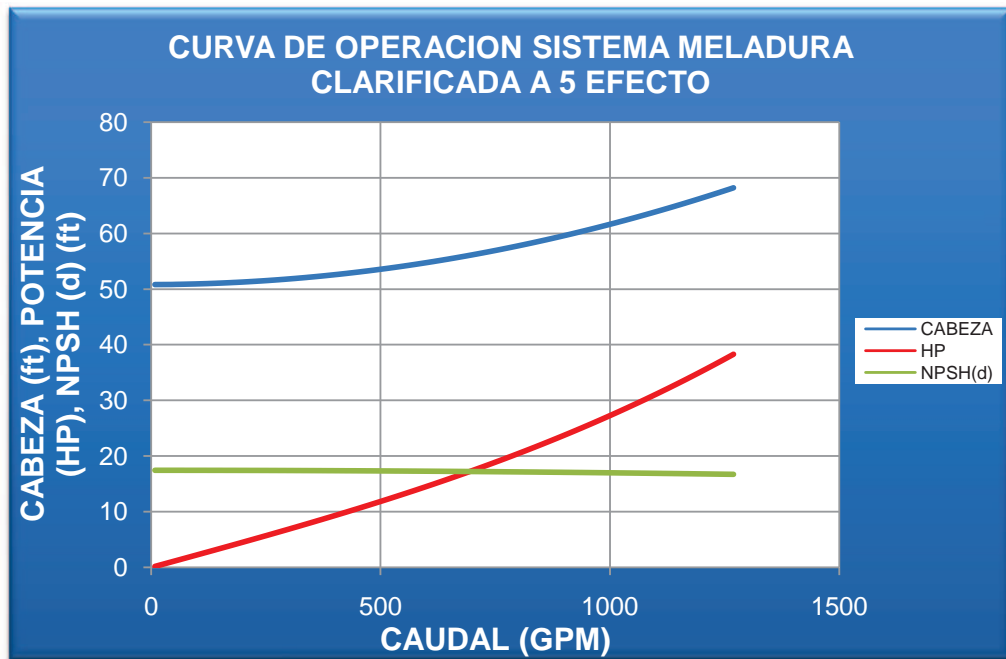
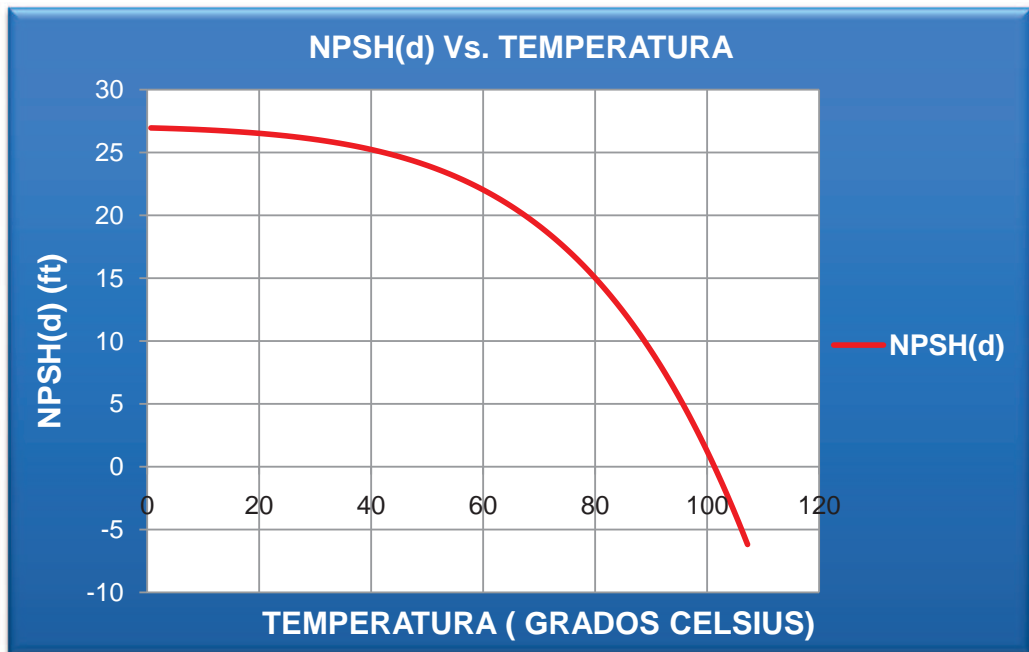


Figura 53. Curva de operación NPSH (d) Sistema Meladura Clarificada, Proyecto Clarificación Meladura de Cuarto Efecto



Ahora entramos a la curva característica de la bomba*, con los datos de velocidad y caudal, seguidamente comparamos las curvas y obtenemos las conclusiones:

Velocidad = 1775 r. p. m.

Impulsor = 10 pulgadas

Conclusiones

- El punto de operación se encuentra fuera totalmente de la curva característica de la bomba para 1750 rpm.

Recomendaciones

- Se recomienda modificar la velocidad de operación de 1750 rpm a 1150 rpm.

* Ver anexo V, curva característica bomba, Aurora HC-4C, pág. 161.

- Se recomienda aumentar el diámetro del impulsor a 12 pulgadas así el punto de operación nos daría un caudal de 700 galones por minuto una cabeza de 55 ft, una eficiencia de 70%, un NPSH(r) de 10ft. Y una potencia requerida de 15 HP.

3.2.2.2. Sistema Tanque Buffer (meladura clarificada)

BOMBA

MARCA	WORTHINGTON
MODELO	4LR-14
IMPULSOR	12"

MOTOR

MARCA	SIEMENS
POTENCIA (HP)	40
VELOCIDAD (RPM)	1775
ACOPLE	DIRECTO

SISTEMA		ENG/US	SI
Caudal (g.p.m.)	500	1,1140 Ft. ³ /s.	3,155E-02 m. ³ /s.
Temperatura del fluido (°C)	60	140,0000 °F	60,000 °C
Altura sobre el nivel del mar (m)	1200	3933,7008 Ft.	1200,000 m.
BRIX	65		

Cálculos

DIFERENCIAL DE ALTURA ESTATICA	70,538 Ft.
PERDIDAS POR FRICCION	2,629 Ft.
PERDIDAS POR ACCESORIOS	0,997 Ft.

TOTAL CABEZA (SISTEMA)	74,164 Ft.
BHP (ef. Bomba 60%)	20,51 H.P.
NPSH (DISPONIBLE)	25,340 Ft.

Figura 54. Curva de Operación Sistema Tanque Buffer, Proyecto Clarificación Meladura de Cuarto Efecto

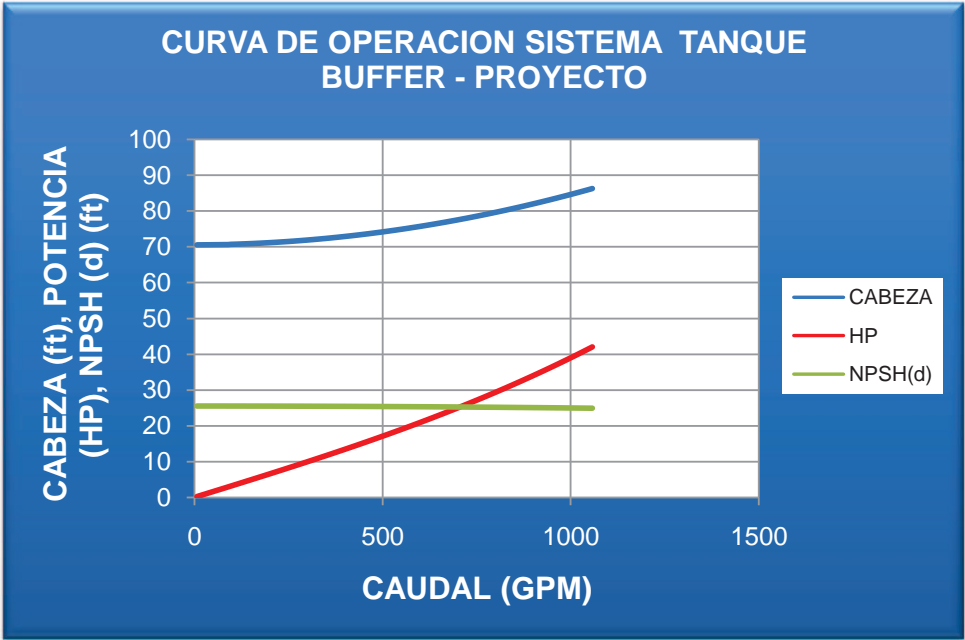
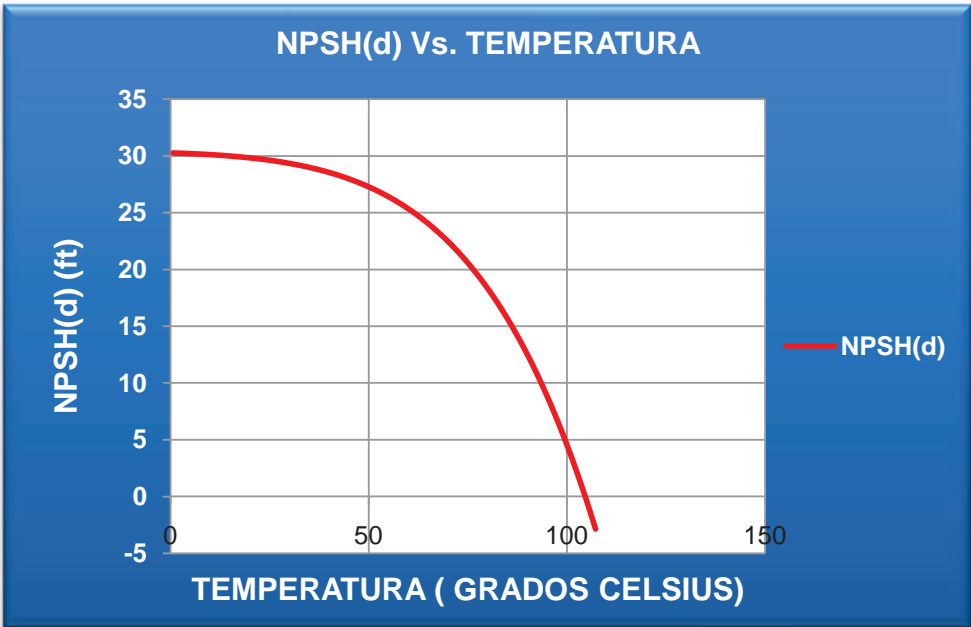


Figura 55. Curva de NPSH (d), Sistema Tanque Buffer, Proyecto Clarificación Meladura de Cuarto Efecto



Ahora entramos a la curva característica de la bomba^{*}, con los datos de velocidad y caudal, seguidamente comparamos las curvas y obtenemos las conclusiones:

Velocidad = 1775 r. p. m.

Impulsor = 12 pulgadas

Conclusiones

- El punto de operación de la bomba se encuentra muy a la derecha de su curva característica, para este punto de operación tenemos un caudal de 900 galones por minuto, el cual es muy superior al necesitado para el proceso y una cabeza de 95 pies, también muy superior a la cabeza del sistema.
- La eficiencia de la bomba para este punto de operación es de 60%
- El NPSH(r) de la bomba par su punto de operación es de 12 ft.
- La potencia requerida por la bomba para este punto de operación es de 35 HP.

Recomendaciones

- Se recomienda disminuir la velocidad a 1175 r.p.m., y además aumentar el impulsor a uno de 14 pulgadas de diámetro
- Teniendo un impulsor de 14 pulgadas de diámetro y a una velocidad de 1175 rpm. Obtenemos :
Caudal = 500 g.p.m.
Cabeza= 75 ft.
Eficiencia=76%
NPSH(r)= 6 ft.
BHP=15 H.P.
- Una de las soluciones para dejar como está la configuración de velocidad y diámetro de impulsor seria el cierre de una válvula hasta alcanzar el caudal requerido por el proceso, pero como ya vimos en el marco teórico esto implicaría un consumo energético mayor.

^{*} Ver anexo U, curva característica Bomba Worthington 4LR – 14, pág. 160.

3.2.2.3. Sistema Tanque sello

Este sistema no existe en la actualidad por lo que hay que escoger una bomba y un motor que se ajusten a las necesidades de cabeza y caudal.

SISTEMA		ENG/US		SI
Caudal (g.p.m.)	600	1,3368	Ft.^3/s.	3,785E-02 m.^3/s.
Temperatura del fluido (°C)	85	185,0000	°F	85,000 °C
Altura sobre el nivel del mar (m)	1200	3933,7008	Ft.	1200,000 m.
BRIX	55			

	ENG/US		SI	
Densidad del fluido	78,3137	Lb./ft.^3	1254,468	Kg./m.^3
Viscosidad cinemática	2,782E-05	Ft.^2/s.	2,585E-06	m.^2/s.
Peso específico	0,5439	Psia./ft.	12,3021	kPa./m.
Altura estática total	49,2126	Ft.	15,0000	m.
Presión de Saturación	8,3931	Psia.	57,8680	kPa.
Presión Atmosférica	12,7227	Psia.	87,7200	kPa.

DIFERENCIAL DE ALTURA ESTÁTICA	49,213 Ft.
PERDIDAS POR FRICCIÓN	2,339 Ft.
PERDIDAS POR ACCESORIOS	1,616 Ft.

TOTAL CABEZA (SISTEMA)	53,167 Ft.
BHP	16,87 H.P.
NPSH (DISPONIBLE)	23,288 Ft.

Figura 56. Curva de Operación Sistema Tanque Sello, Proyecto Clarificación Meladura de Cuarto Efecto

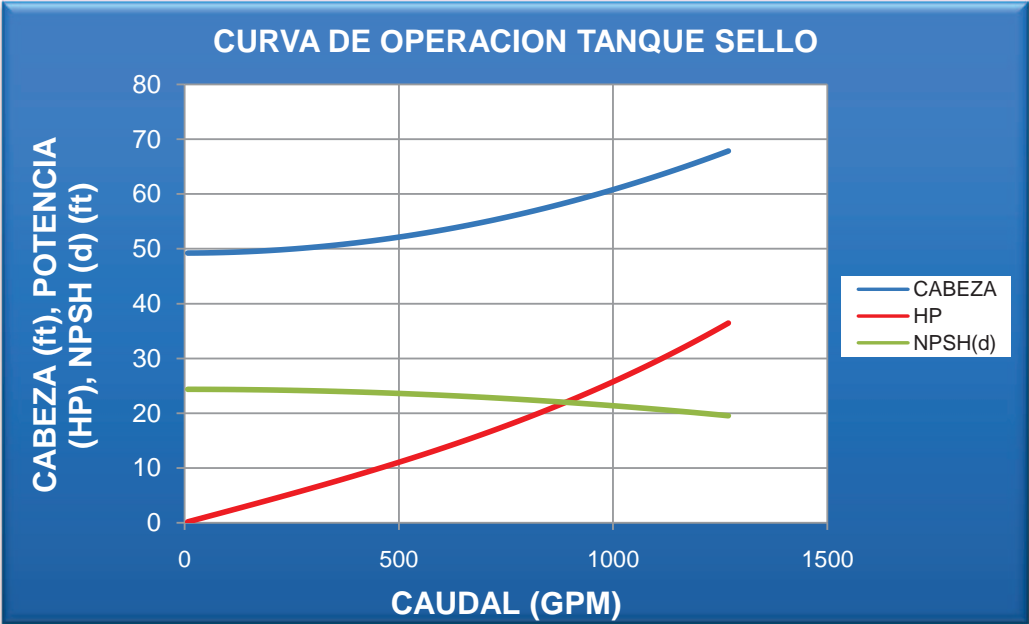
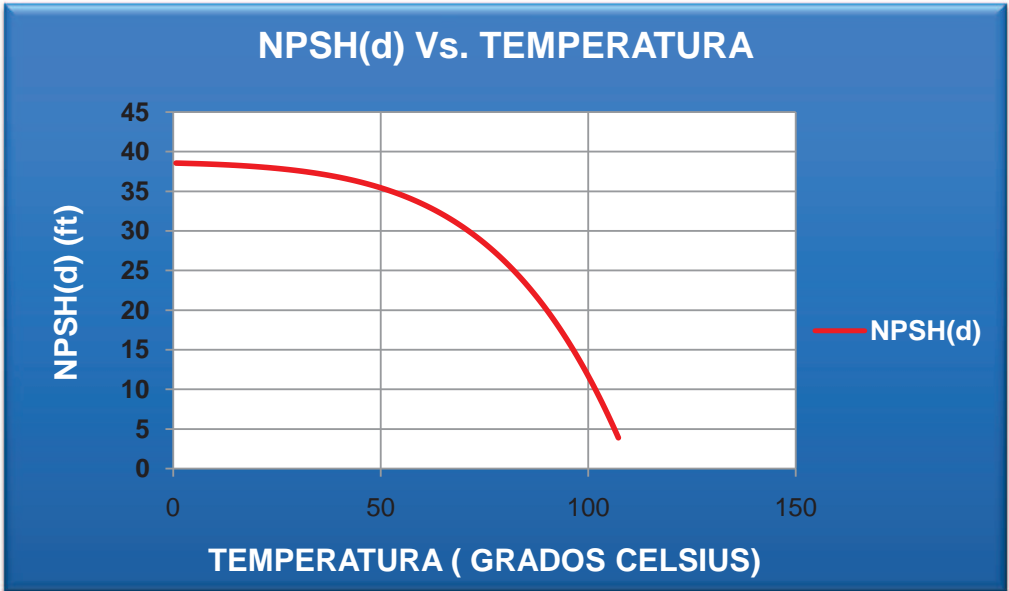


Figura 57. Curva de NPSH (d), Sistema Tanque Sello, Proyecto Clarificación Meladura de Cuarto Efecto



- **Selección bomba**

En la actualidad la Fabrica del Ingenio Providencia S.A. cuenta en su inventario con una Bomba Wilfley A7 6 x 4*, la cual se ajusta a las necesidades de operación.

Ahora se procede a evaluarla, comparando la curva característica de la Bomba antes mencionada y la curva de operación del sistema.

BOMBA

MARCA	WILFLEY
MODELO	A7 6 X 4
IMPULSOR	10 1/5"

MOTOR

MARCA	LESSON
POTENCIA (HP)	150
VELOCIDAD (RPM)	1190
ACOPLE	RELACION POLEAS (M 12" - B 9 1/5")

$$\text{Velocidad} = \frac{\text{r. p. m(Motor)} * \text{Diametro pola del motor}}{\text{Diametro polea de la bomba}} = \frac{1190 * (12 \text{ plg.})}{(9 \frac{1}{2} \text{ plg.})}$$

$$= 914 \text{ r. p. m.}$$

$$\text{Impulsor} = 10 \frac{1}{2} \text{ pulgadas}$$

Conclusiones

- Obtenemos el punto de operación de la bomba en donde tenemos un caudal de 1100 galones por minuto y una cabeza de 60 ft.
- La eficiencia es de 72%.

* Ver anexo Y, curva característica Bomba Wilfley A7 6 x 4, pág. 164.

- El NPSH(r) es de 20 ft el cual es menor que el NPSH (d) de 23 ft.

Recomendaciones

- Cómo en la actualidad existe el impulsor de 10.5 pulgadas, se recomienda disminuir el diámetro del mismo a 8,5 pulgadas, así nos ajustaríamos al caudal requerido por proceso de producción, a continuación un análisis de cómo quedarían las condiciones.
Caudal = 650 galones por minuto.
Cabeza = 55 ft.
Eficiencia = 67%.
- Potencia teórica a 67% de eficiencia de la bomba = 15 H.P.

4. CONCLUSIONES

4.1 EVALUACION

4.1.1. Bomba Tromel.

- Encontramos que la bomba se encuentra operando en el punto de operación, esto debido al variador de velocidad que ajusta la velocidad del motor al caudal requerido. Para 880 rpm el caudal se ajusta a 2000 galones por minuto.
- La potencia según el análisis del punto de operación es de 70 HP, la cual es menor a la potencia que puede aportar el motor que es de 150 HP.
- El NPSH(r) de la bomba es de 15 ft. El cual es mucho menor al NPSH (d) que es de 39 ft.
- Debido al variador de velocidad, se puede controlar el nivel del tanque encalado esto es, la altura estática de succión, además de optimizar el manejo de la bomba y así economizar el consumo de energía del motor.

4.1.2. Bomba Báscula de Jugo.

- Se observa que en punto de operación nos encontramos un caudal de 2500 galones por minuto y una cabeza de 85 ft.
- La eficiencia de la bomba esta en 75%
- El NPSH(r) de la bomba para 840 rpm es de 25 ft. Lo cual es inferior al NPSH (d) que esta en 31 ft, lo cual es muy conveniente porque esto nos asegura el buen funcionamiento de la bomba además de evitarse los problemas de cavitación.

4.1.3. Bomba Tanque Encalado.

- Se observa que en punto de operación nos encontramos un caudal de 3500 galones por minuto y una cabeza de 180 ft.
- La eficiencia de la bomba esta en 72%

- El NPSH(r) por la bomba es de 35 ft, igual al NPSH (d) del sistema de 35 ft., para esto hay que tener en cuenta que si altura estática de succión disminuye del nivel propuesto de 3 m., estaría la bomba sufriendo cavitación.
- La potencia requerida por la bomba el punto de operación es de 225H.P., lo cual es muy inferior a la potencia que posee el motor de la bomba que es de 400 H.P. Por motivos de disponibilidad la fábrica utiliza este motor.

4.1.4. Bomba jugo clarificado.

- Se observa que en el punto de operación nos encontramos un caudal de 1000 galones por minuto y una cabeza de 180 ft.
- La eficiencia de la bomba esta en 77%
- El NPSH(r) por la bomba es de 10 ft, muy por debajo al NPSH (d) del sistema de 40 ft, esto da la seguridad de que la bomba no va a presentar problemas de cavitación y además su funcionamiento es el adecuado.
- La potencia requerida por la bomba según las curvas características es de 60 Hp, lo cual es muy inferior a la potencia que posee el motor de la bomba que es de 150 HP.

4.1.5. Bomba Tanque Meladura no Clarificada.

- Se observa que en el punto de operación nos encontramos un caudal de 800 galones por minuto y una cabeza de 120 ft.
- La eficiencia de la bomba esta en 72%
- El NPSH(r) por la bomba es de 10 ft, muy por debajo al NPSH (d) del sistema de 25 ft, esto da la seguridad de que la bomba no va a presentar problemas de cavitación.

4.1.6. Bomba Tanque Meladura Clarificada.

- Se observa que en el punto de operación nos encontramos un caudal de 900 galones por minuto y una cabeza de 85 ft.
- La eficiencia de la bomba se encuentra en 68%.

- La potencia requerida por la bomba según la curva característica de la misma es de 28 H.P.
- El NPSH(r) es de 25 ft. El cual es superior al NPSH (d) del sistema que es de 17,2 ft.

4.1.7. Bomba Recuperación Aguas Dulces.

- Se observa que en el punto de operación nos encontramos un caudal de 450 galones por minuto y una cabeza de 120 ft.
- La bomba se encuentra en 72% de eficiencia
- La potencia requerida por la bomba en 20 HP lo cual es muy inferior a la potencia del motor instalado
- El NPSH(r) es de 10 ft, muy inferior al NPSH (d) del sistema que es de 20 ft.

4.1.8. Bomba Mosto – Destilería.

- Se observa que en el punto de operación nos encontramos un caudal de 800 galones por minuto y una cabeza de 160 ft, muy superior a lo necesitado.
- La eficiencia de la bomba en este punto de operación es de 55%.
- El NPSH(r) en el punto de operación es de 9 m = 30 ft. Inferior al NPSH (d) del sistema de 40 ft.
- La potencia requerida en este punto es de 28 HP inferior a la potencia del motor instalado.

4.2 PROYECTOS

4.2.1. Sulfatación en caliente.

4.2.1.1. Bascula de Jugo (2).

- Comparando las curvas de operación del sistema con la curva

característica de la bomba, para el punto de operación nos da un caudal de 2000 galones por minuto y una cabeza de 150 ft.

- La eficiencia de la bomba para el punto de operación es de 68 %.
- El nuevo cálculo del BHP para una eficiencia del 68% queda:

$$\text{BHP} = \left[\frac{\left(4,45 \frac{\text{ft}^3}{\text{s}}\right) (144\text{ft}) \left(0,4585 \frac{\text{psia}}{\text{ft}}\right)}{0,68} \right] * 0.2618 = 113 \text{ HP}$$

- El NPSH(r) de la bomba para el punto de operación es de 25 ft. el cual es mucho menor al NPSH (d) que es de 31ft.

4.2.1.2. Tanque encalado (2).

- Debido al cambio de la configuración del sistema de sulfatación; ahora realizándolo con el fluido a una temperatura de 80°C aproximadamente, se obtiene múltiples beneficios, primero el acto de sulfatación es más eficiente a nivel molecular y segundo la nueva reorganización del acto de calentamiento permitió modificar las velocidades de las bombas, ajustándose las mismas al caudal necesitado.
- Debido a la puesta en marcha del variador de velocidad para la Bomba de Jugo Encalado, se logro un nivel de succión constante y solo se utilizará la energía necesaria para el trabajo requerido, esto último siendo de mucha importancia por su reflejo en el consumo energético de la empresa.

4.2.2. Clarificación meladura de cuarto efecto.

4.2.2.1. Sistema Tanque meladura Clarifica a 5 efecto-(Evaporadores).

- El punto de operación se encuentra fuera totalmente de la curva característica de la bomba para 1750 rpm.

4.2.2.2. Sistema Tanque Buffer (meladura clarificada).

- El punto de operación de la bomba se encuentra muy a la derecha de su curva característica, para este punto de operación tenemos un caudal de 900 galones por minuto, el cual es muy superior al necesitado para el

proceso y una cabeza de 95 pies, también muy superior a la cabeza del sistema.

- La eficiencia de la bomba para este punto de operación es de 60%
- El NPSH(r) de la bomba par su punto de operación es de 12 ft.
- La potencia requerida por la bomba para este punto de operación es de 35 HP.

4.2.2.3. Sistema Tanque sello.

- Obtenemos el punto de operación de la bomba en donde tenemos un caudal de 1100 galones por minuto y una cabeza de 60 ft.
- La eficiencia es de 72%.
- El NPSH(r) es de 20 ft el cual es menor que el NPSH (d) de 23 ft.

5. RECOMENDACIONES

5.1 EVALUACION

5.1.1. Bomba Tromel.

- Al presente sistema de bombeo se considera un estado de trabajo excelente y lo único a considerar es el tema de mantenimiento, preventivo, para mantener las condiciones de trabajo estudiadas y así garantizar que este análisis continúe vigente.

5.1.2. Bomba Báscula de Jugo.

- Se recomienda reducir la velocidad de operación de la bomba a 750 rpm, esto con el fin de ajustar el punto de operación de la bomba a 2000 galones por minuto de caudal, pero esto generaría una restricción de máximo caudal en 2000 galones por minuto, esto se lograría tan solo con aumentar el diámetro de la polea de la bomba a 24,5 pulgadas.
- Se recomienda la instalación de un variador de velocidad, posiblemente sincronizado con el nivel del Tanque de Báscula y a un medidor de flujo volumétrico (caudal), todo esto con el fin de mejorar la eficiencia energética del sistema.
- En dado caso que el proceso aumente la temperatura del fluido, se recomienda tener en cuenta la grafica mostrada de NPSH (d) Vs. Temperatura del fluido.

5.1.3. Bomba Tanque Encalado.

- Se recomienda reducir la velocidad de operación de la bomba a 800 rpm, esto se lograría tan solo con aumentar el diámetro de la polea de la bomba a 28 pulgadas.
- Se recomienda instalar un variador de velocidad, en caso de hacerlo sincronizarlo con el nivel del Tanque Encalado y un medidor de flujo volumétrico, además sí se toma la decisión de realizar lo anterior, no habría necesidad de cambiar la relación de poleas.

5.1.4. Bomba jugo clarificado.

- Para en un futuro aumentar el caudal de operación de la bomba se recomienda aumentar el impulsor a uno de 15 $\frac{3}{4}$ “, lo cual aumentaría el caudal a 1500 galones por minuto, con una potencia requerida de 100 HP.
- Se recomienda instalar un variador de velocidad, en caso de hacerlo sincronizarlo con el nivel del evaporador de primer efecto, esto sería muy funcional porque así solo utilizaríamos la energía necesaria de operación.

5.1.5. Bomba Tanque Meladura no Clarificada.

- Se recomienda disminuir el impulsor a uno de 11 pulgadas esto con el fin de ajustar el punto de operación a un caudal de 600 galones por minuto o la posibilidad de instalar un variador de velocidad sincronizado a un medidor de flujo volumétrico.

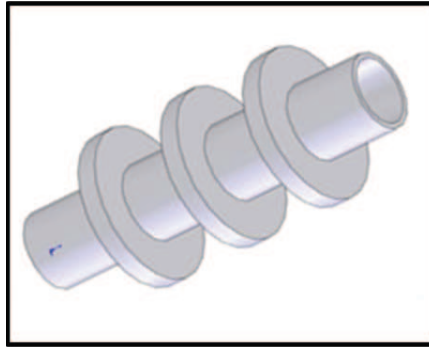
5.1.6. Bomba Tanque Meladura Clarificada.

- Se recomienda estudiar la posibilidad de reducir el diámetro del impulsor a 9 $\frac{1}{5}$ pulgadas, para así ajustarse a los requerimientos del sistema y de esta forma mejorar la eficiencia energética del conjunto Bomba – Motor.
- Se recomienda el incorporara al sistema un variador de velocidad el cual puede ser sincronizado con el nivel del tanque de succión (Tanque de Meladura Clarificada) o a un medidor de flujo volumétrico.
- Se recomienda aumentar el NPSH (d), y una forma seria con la realización de una obra civil, comprendida de un desnivel, al Datum actual que es el nivel del primer piso, aproximadamente de 3 metros, para así garantizar que la bomba no sufrirá de cavitación, y su funcionamiento será el más optimo, a continuación se da el dato simulado con una altura estática de succión 4,5m.

• NPSH (DISPONIBLE)	• 27,76	• Ft.
---------------------	---------	-------

- Otra alternativa seria la realización de un dissipador de calor en forma de aletas, ver figura No. 38, alrededor de la tubería de llegada al tanque de Meladura Clarificada, así , reduciendo la temperatura del fluido disminuiría su presión de saturación y aumentaría el NPSH(d), esto se puede observar en la Figura No.58.

Figura 58. Representación de disipadores de calor en forma de aletas circulares para disminuir la temperatura de un fluido en un conducto.



5.1.7. Bomba Recuperación Aguas Dulces.

- Debido a que el volumen del tanque de succión es muy pequeño y esto presenta un paro y arranque de la bomba con una frecuencia de 30 segundos, este paro y arranque tan frecuente puede desgastar el material del eje y la manzana que es la que acopla el eje de la bomba con el impulsor, se recomienda la disminución del diámetro del impulsor a 10 pulgadas reduciendo así el caudal a 350 galones por minuto.
- Se recomienda la instalación de un variador de velocidad sincronizado al nivel del tanque de succión.
- Se recomienda la construcción de un tanque de mayor capacidad, esto con el fin de que la bomba no lo vacíe tan rápidamente.

5.1.8. Bomba Mosto – Destilería.

- Se recomienda la reducción del diámetro del impulsor a 8 pulgadas, así se ajustaría el punto de operación a el caudal requerido además de aumentar la eficiencia de la bomba a 60% y la potencia requerida a 20HP.

5.2 PROYECTOS

5.2.1. Sulfatación en caliente.

5.2.1.1. Bascula de Jugo (2).

- Se recomienda realizar la instalación de un variador de velocidad sincronizado con el nivel del Tanque de Bascula de Jugo, lo anterior para conservar una altura de succión constante para no sufrir casos de cavitación.

5.2.1.2. Tanque encalado (2).

- Se recomienda realizar un seguimiento al comportamiento del sistema en lo que concierne a su consumo energético, además poner por ejemplo este proyecto para futuros cambios en todas las áreas donde haya sistemas de bombeo.

5.2.2. Clarificación meladura de cuarto efecto.

5.2.2.1. Sistema Tanque meladura Clarifica a 5 efecto-(Evaporadores).

- Se recomienda modificar la velocidad de operación de 1750 rpm a 1150 rpm.
- Se recomienda aumentar el diámetro del impulsor a 12 pulgadas así el punto de operación nos daría un caudal de 700 galones por minuto una cabeza de 55 ft, una eficiencia de 70%, un NPSH(r) de 10ft. Y una potencia requerida de 15 HP.

5.2.2.2. Sistema Tanque Buffer (meladura clarificada).

- Se recomienda disminuir la velocidad a 1175 r.p.m., y además aumentar el impulsor a uno de 14 pulgadas de diámetro
- Teniendo un impulsor de 14 pulgadas de diámetro y a una velocidad de 1175 rpm. Obtenemos :
Caudal = 500 g.p.m.
Cabeza= 75 ft.
Eficiencia=76%
NPSH(r)= 6 ft.
BHP=15 H.P.
- Una de las soluciones para dejar como está la configuración de velocidad y diámetro de impulsor sería el cierre de una válvula hasta alcanzar el caudal requerido por el proceso, pero como ya vimos en el marco teórico esto implicaría un consumo energético mayor.

5.2.2.3. Sistema Tanque sello.

- Cómo en la actualidad existe el impulsor de 10.5 pulgadas , se recomienda disminuir el diámetro del mismo a 8,5 pulgadas, así nos ajustaríamos al caudal requerido por proceso de producción, a continuación un análisis de cómo quedarían las condiciones:
Caudal = 650 galones por minuto.
Cabeza = 55 ft.
Eficiencia = 67%.
Potencia teórica a 67% de eficiencia de la bomba = 15 H.P.

BIBLIOGRAFÍA

Boresi, Arthur y Schmidt, Richard. México: Thomson Learning. Ingeniería Mecánica - Dinámica. 2001. p.118-119. ISBN 0-534-95162-7.

Emile Hugot. Handbook of Cane Sugar Engineering: Pump System. Primera edición. Ámsterdam: Elsevier, 1986, pag.980

http://www.virtual-tec.com/upme/archivos/Tecnologia/Metodologia_en_Sistemas_de_Bombeo_Eficiencia_de_las_Bombas_Centrifugas.pdf

<http://www.waterymex.org/contenidos/rtecnicos/Curso%20basico%20de%20Variadores%20de%20Velocidad.pdf>

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIONES. Normas Colombianas para la presentación de trabajos de grado. Bogotá: ICONTEC., 1996.132p.NTC.1486

Karassik, Igor J. et al. Pump Handbook. 3ed. New York: Mac Graw Hill, 2001. P. 8.55-8.61. ISBN. 0-07-034032-3.

Mataix Claudio. Mecánica de Fluidos y Maquinas Hidráulicas. Segunda edición. México D.F.: Alfa omega, Oxford, 2005. p. 5-12,13-31,33-40,92-105,109-116,203-221,237-247,318-325,355-406,540-543. ISBN. 84-219-0175-3.

Yunus A, Cengel, Termodinámica. Quinta Edición. México D.F.: Mc Graw Hill, 2006. Pág. 940, Tabla A-4E.

ANEXOS

ANEXO A. Características de Superficie

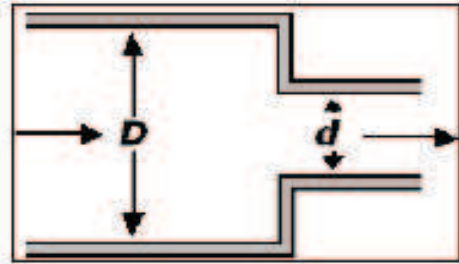
Coefficientes de rugosidad absoluta (k), para tuberías comerciales*

MATERIAL TUBERIA	RUGOSIDAD ABSOLUTA (mm)
Vidrio, cobre o latón estirado	0,001
Latón industrial	0,25
Acero laminado nuevo	0,05
Acero laminado oxidado	0,25
Acero laminado con incrustaciones	3
Acero asfaltado	0,015
Acero roblonado	0,1
Acero soldado, oxidado	0,4
Hierro galvanizado	0,2

* Mataix Claudio. Mecánica de Fluidos y Maquinas Hidráulicas: Perdidas primarias en conductos cerrados o tuberías. Segunda edición. México D.F.: Alfa omega, Oxford, 2005. Pág.219

ANEXO B. Características de forma, Contracción Brusca*

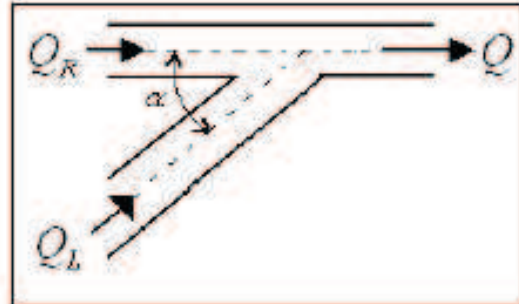
D/d	ζ
1,2	0,25
1,3	0,275
1,4	0,3
1,5	0,32
1,6	0,34
1,65	0,36
1,7	0,374286
1,8	0,388572
1,9	0,41
2	0,42
2,1	0,435
2,2	0,44
2,3	0,445
2,4	0,45
2,5	0,455
2,6	0,456
2,7	0,457
2,8	0,458
2,9	0,459
3	0,46



* Mataix Claudio. Mecánica de Fluidos y Maquinas Hidráulicas: Perdidas primarias en conductos cerrados o tuberías. Segunda edición. México D.F.: Alfa omega, Oxford, 2005. Pág. 239.

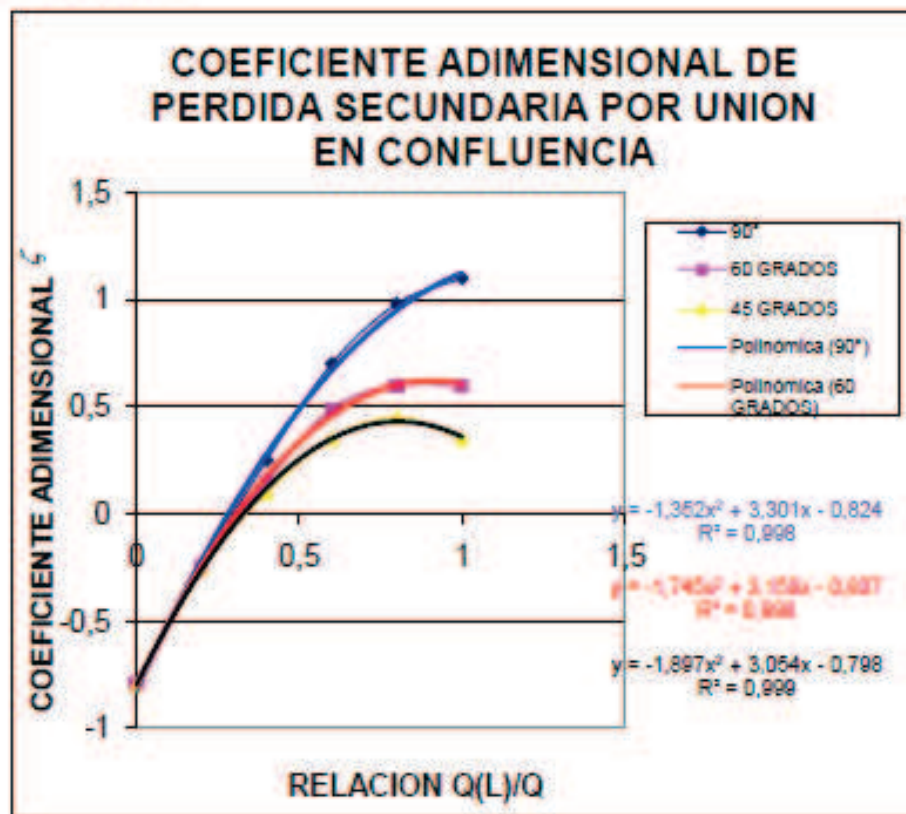
ANEXO C. Características de forma, Unión en confluencia*

$Q(L)/Q$	90° ζ	60° ζ	45° ζ
0	-0,8	-0,8	-0,8
0,2	-0,25	-0,25	-0,25
0,4	0,25	0,15	0,1
0,6	0,7	0,49	0,35
0,8	0,98	0,6	0,45
1	1,1	0,6	0,35



$Q_L \Rightarrow$ CAUDAL LATERAL

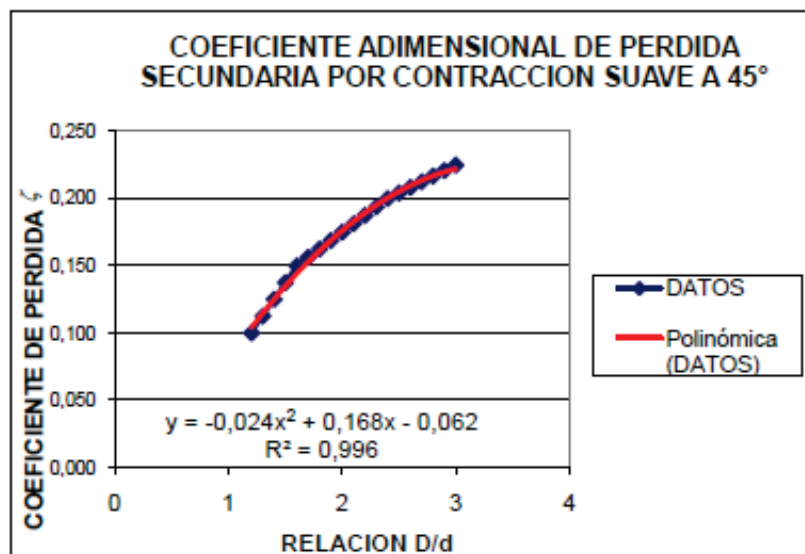
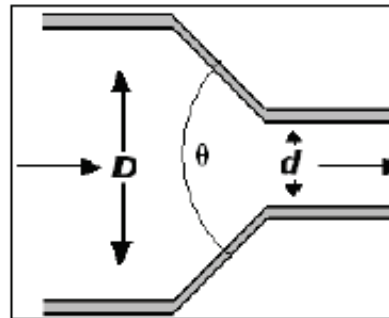
$Q_R \Rightarrow$ CAUDAL RECTO



* Mataix Claudio. Mecánica de Fluidos y Maquinas Hidráulicas: Perdidas secundarias en conductos cerrados o tuberías. Segunda edición. México D.F.: Alfa omega, Oxford, 2005. Pág. 240.

ANEXO D. Características de forma, Contracción suave a 45°*

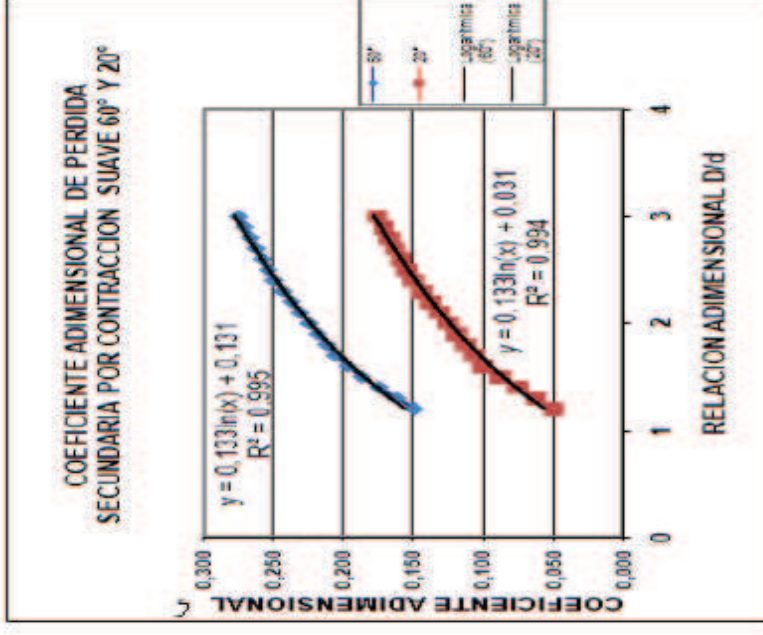
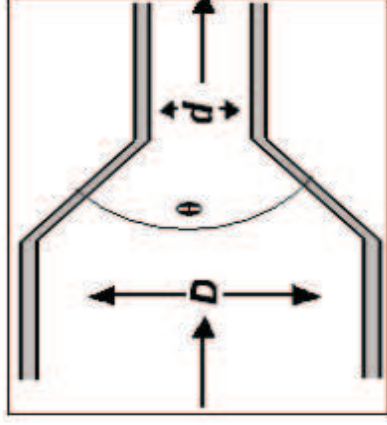
D/d	ζ
1,2	0,100000
1,3	0,112500
1,4	0,125000
1,5	0,137500
1,6	0,150000
1,7	0,156250
1,8	0,162500
1,9	0,168750
2	0,175000
2,1	0,181250
2,2	0,187500
2,3	0,193750
2,4	0,200000
2,5	0,204167
2,6	0,208334
2,7	0,212501
2,8	0,216668
2,9	0,220835
3	0,225002



* Mataix Claudio. Mecánica de Fluidos y Maquinas Hidráulicas: Perdidas secundarias en conductos cerrados o tuberías. Segunda edición. México D.F.: Alfa omega, Oxford, 2005. Pág. 239.

ANEXO E. Características de forma, Contracción suave a 60° y 20°*

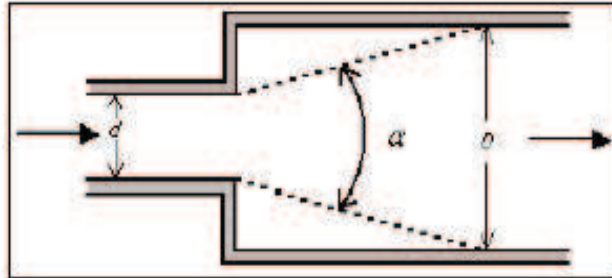
D/d	60°	20°
1.2	0,150000	0,050000
1.3	0,162500	0,062500
1.4	0,175000	0,075000
1.5	0,187500	0,087500
1.6	0,197500	0,100000
1.7	0,206250	0,106250
1.8	0,212500	0,112500
1.9	0,218750	0,118750
2	0,225000	0,125000
2.1	0,231250	0,131250
2.2	0,237500	0,137500
2.3	0,243750	0,143750
2.4	0,250000	0,150000
2.5	0,254167	0,154167
2.6	0,258334	0,158334
2.7	0,262501	0,162501
2.8	0,266668	0,166668
2.9	0,270835	0,170835
3	0,275002	0,175002



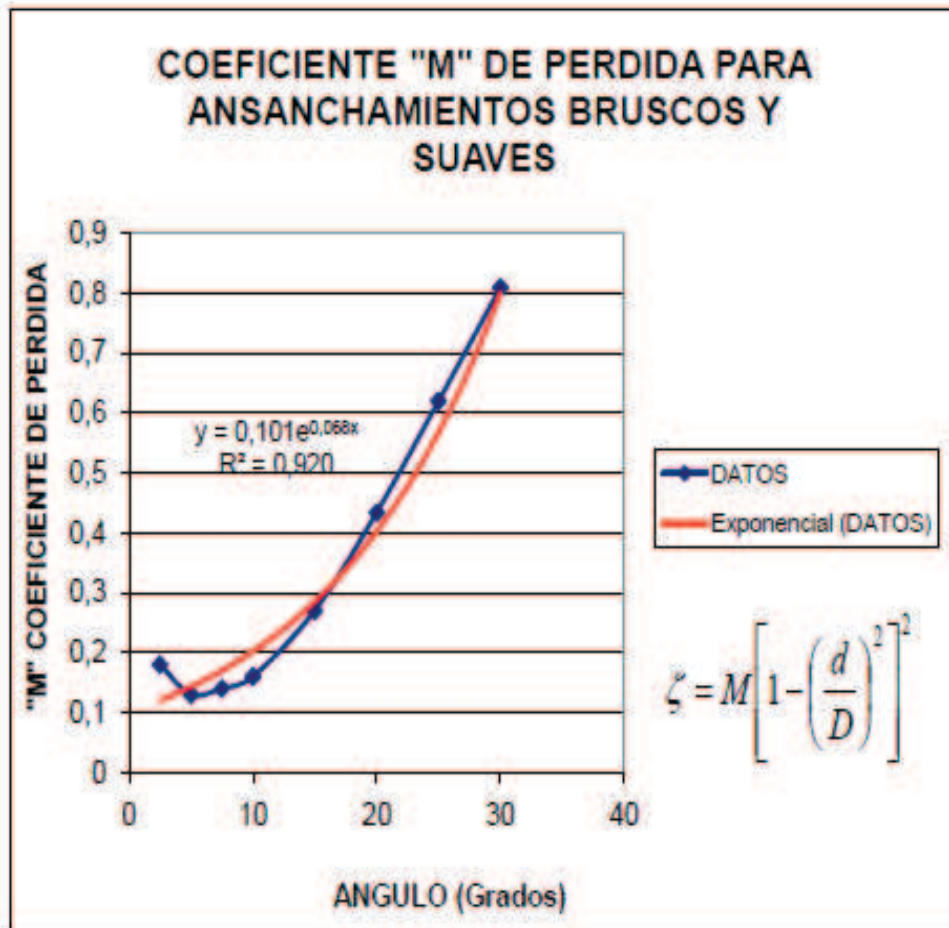
* Mataix Claudio. Mecánica de Fluidos y Maquinas Hidráulicas: Pérdidas secundarias en conductos cerrados o tuberías. Segunda edición. México D.F.: Alfa omega, Oxford, 2005. Pág. 239.

ANEXO F. Características de forma, Ensanchamientos bruscos y suaves*

α	M
2.5	0,18
5	0,13
7.5	0,14
10	0,16
15	0,27
20	0,434
25	0,62
30	0,81



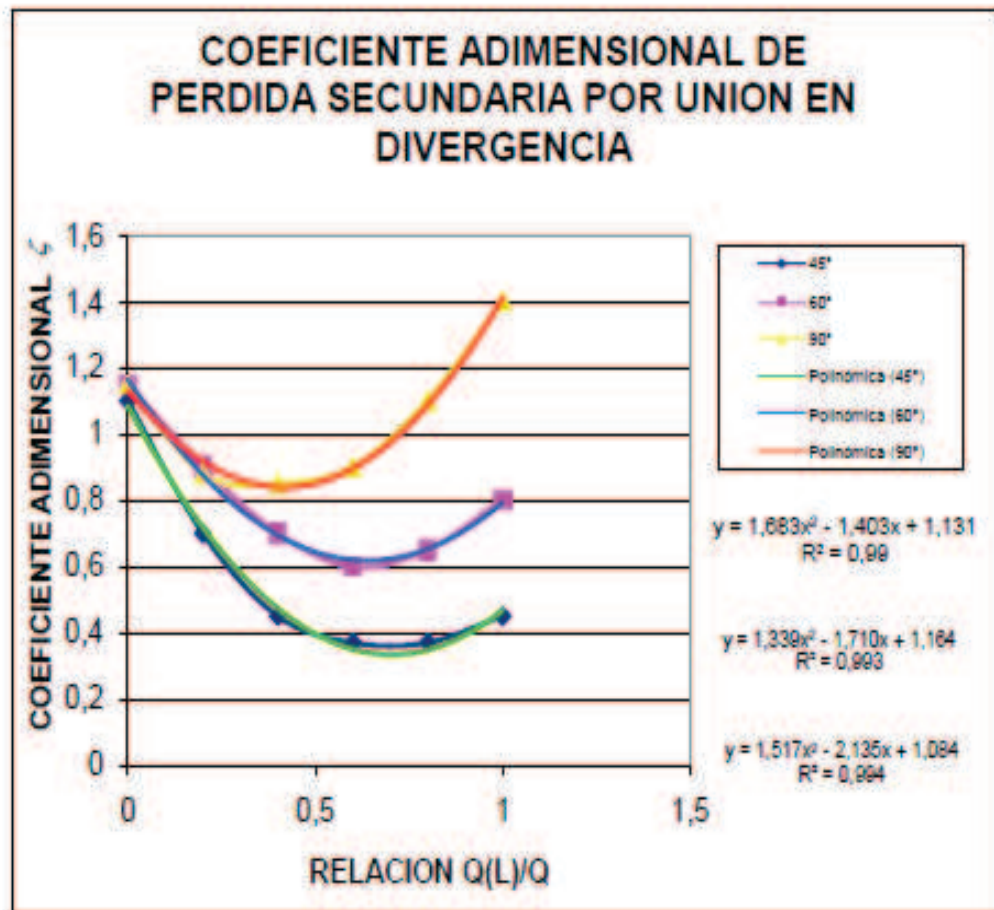
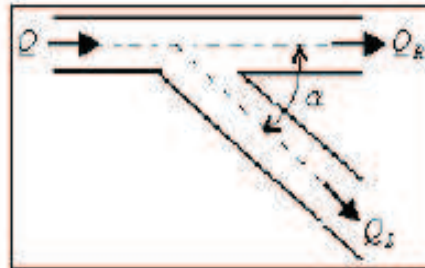
PARA ENSANCHAMIENTO BRUSCO M=1



* Mataix Claudio. Mecánica de Fluidos y Maquinas Hidráulicas: Perdidas secundarias en conductos cerrados o tuberías. Segunda edición. México D.F.: Alfa omega, Oxford, 2005. Pág. 238.

ANEXO G. Características de forma, Uniones Tes en divergencia*

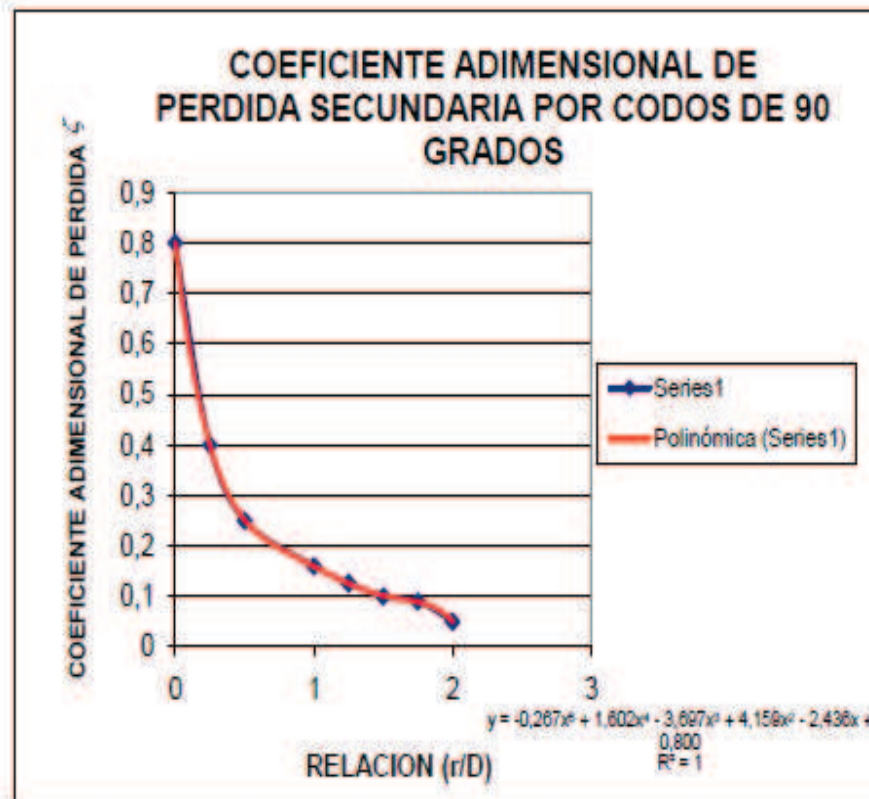
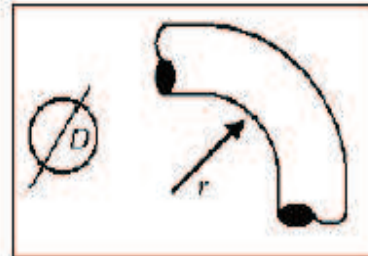
ζ	45°	60°	90°
0	1,1	1,15	1,15
0,2	0,7	0,9	0,88
0,4	0,45	0,7	0,85
0,6	0,37	0,6	0,9
0,8	0,37	0,65	1,1
1	0,45	0,8	1,4



* Mataix Claudio. Mecánica de Fluidos y Maquinas Hidráulicas: Perdidas secundarias en conductos cerrados o tuberías. Segunda edición. México D.F.: Alfa omega, Oxford, 2005. Pág. 240.

ANEXO H. Características de forma, Codo a 90°*

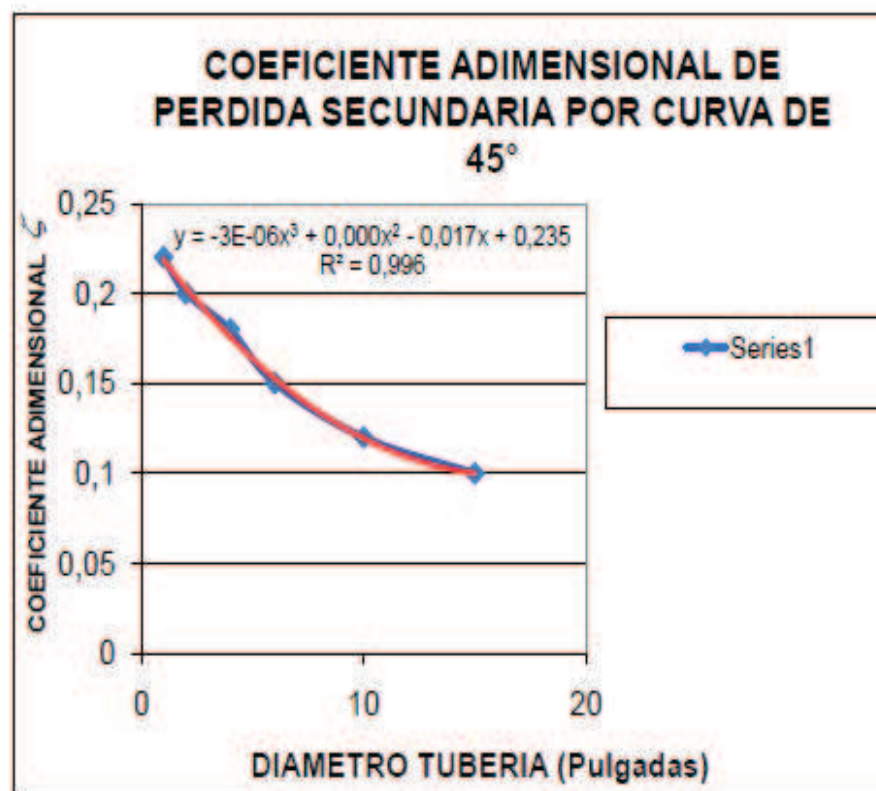
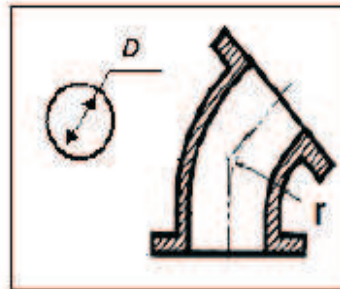
r/D	ζ
0	0,8
0,25	0,4
0,5	0,25
1	0,16
1,25	0,126
1,5	0,1
1,75	0,09
2	0,05



* Mataix Claudio. Mecánica de Fluidos y Maquinas Hidráulicas: Perdidas secundarias en conductos cerrados o tuberías. Segunda edición. México D.F.: Alfa omega, Oxford, 2005. Pág. 241.

ANEXO I. Características de forma, Curva a 45°*

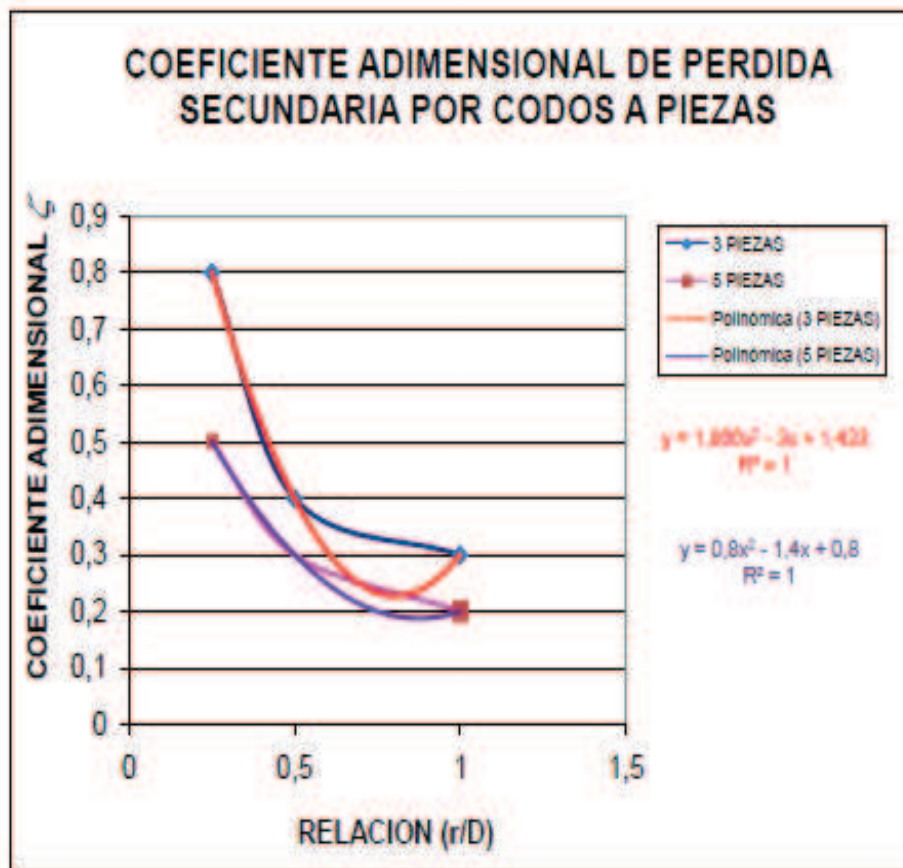
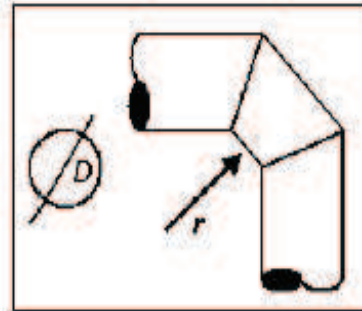
D	ζ
1	0,22
2	0,2
4	0,18
6	0,15
10	0,12
15	0,1



* Mataix Claudio. Mecánica de Fluidos y Maquinas Hidráulicas: Perdidas secundarias en conductos cerrados o tuberías. Segunda edición. México D.F.: Alfa omega, Oxford, 2005. Pág. 241.

ANEXO J. Características de forma, Codos por piezas*

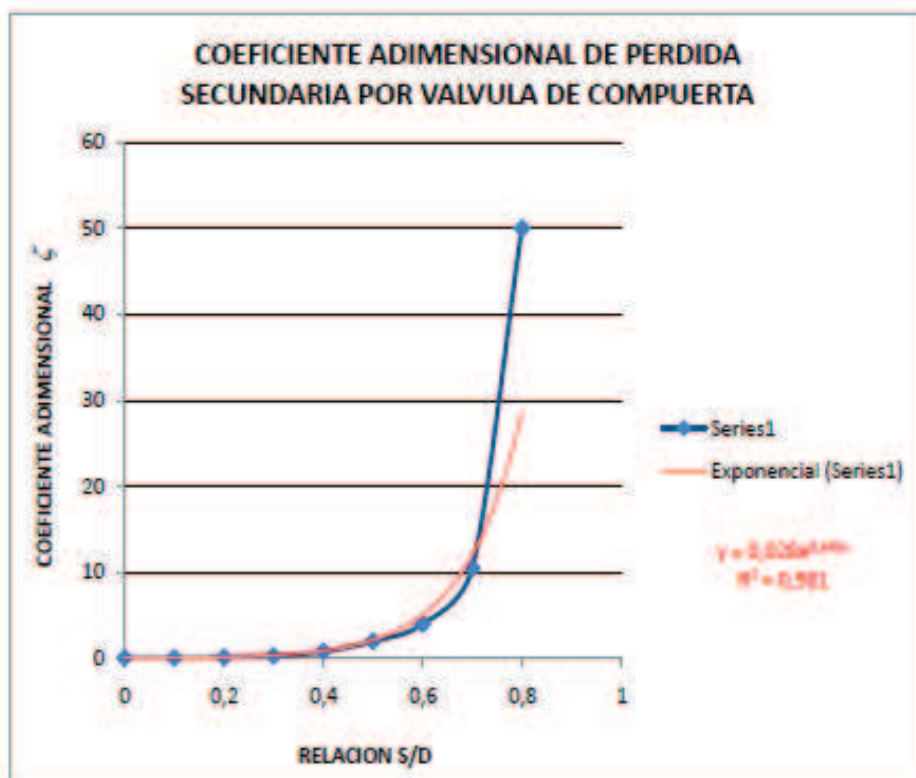
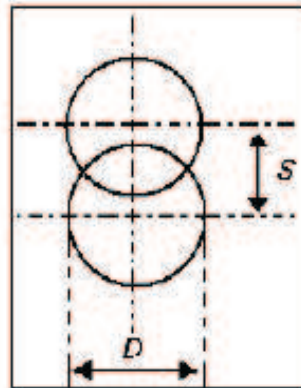
	3 PIEZAS	5 PIEZAS
r/D	\leq	\leq
0,25	0,8	0,5
0,5	0,4	0,3
1	0,3	0,2



* Mataix Claudio. Mecánica de Fluidos y Maquinas Hidráulicas: Perdidas secundarias en conductos cerrados o tuberías. Segunda edición. México D.F.: Alfa omega, Oxford, 2005. Pág. 242.

ANEXO K. Características de forma, Válvula de compuerta*

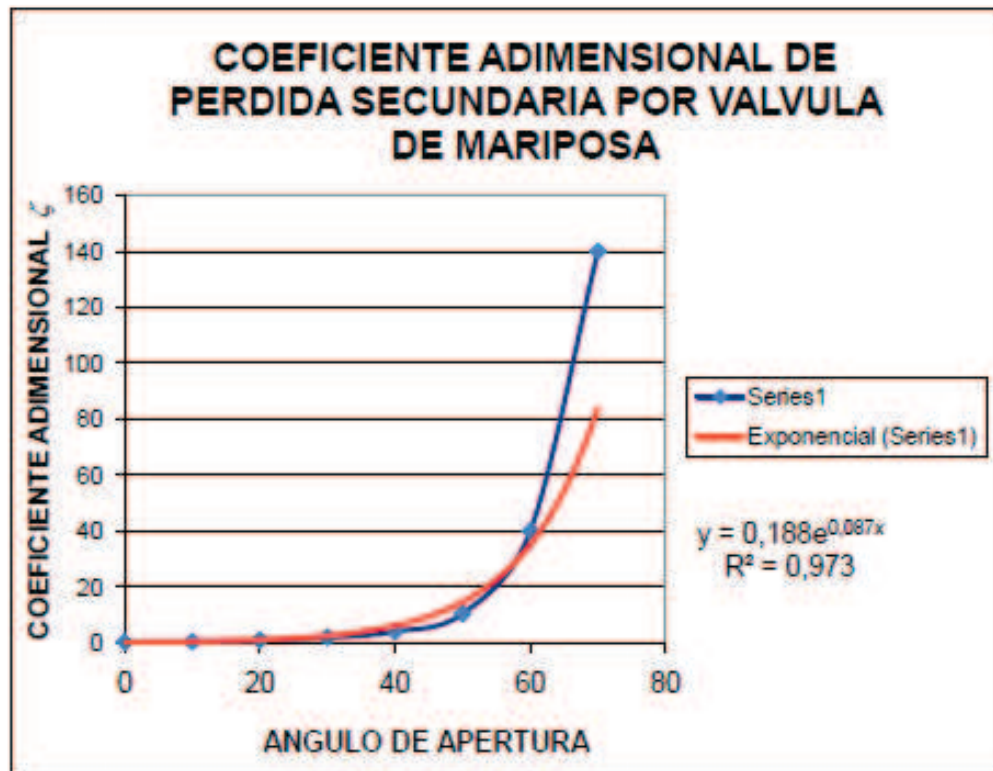
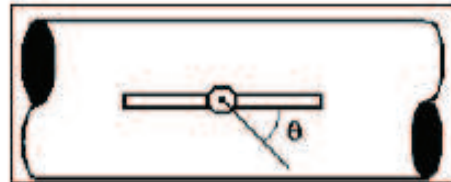
s/D	ζ
0	0,05
0,1	0,06
0,2	0,13
0,3	0,3
0,4	0,8
0,5	2
0,6	4
0,7	10,5
0,8	50



* Mataix Claudio. Mecánica de Fluidos y Maquinas Hidráulicas: Perdidas secundarias en conductos cerrados o tuberías. Segunda edición. México D.F.: Alfa omega, Oxford, 2005. Pág. 242.

ANEXO L. Características de forma, Válvula de mariposa*

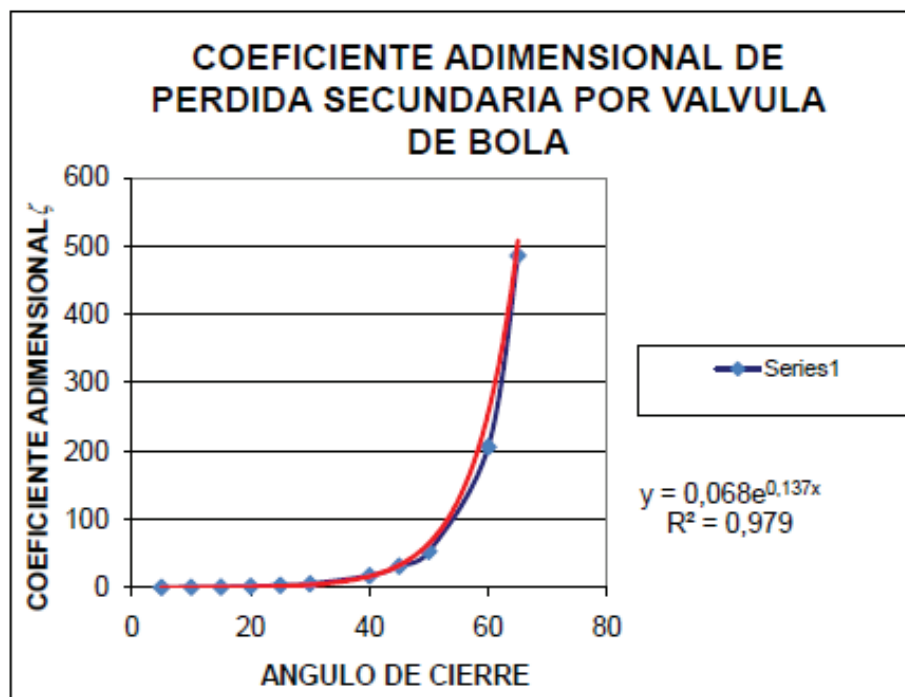
ANGULO DE CIERRE	θ
0	0,3
10	0,45
20	1
30	2
40	4
50	10,5
60	40
70	140



* Mataix Claudio. Mecánica de Fluidos y Maquinas Hidráulicas: Pérdidas secundarias en conductos cerrados o tuberías. Segunda edición. México D.F.: Alfa omega, Oxford, 2005. Pág. 243.

ANEXO M. Características de forma, Válvula de bola*

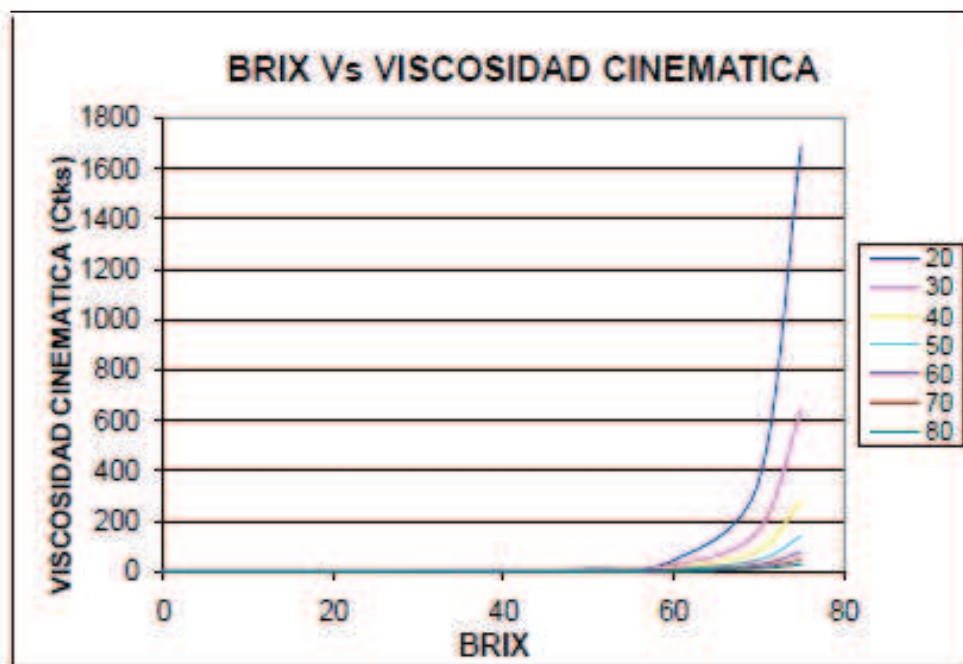
θ	ζ
5	0,05
10	0,29
15	0,75
20	1,56
25	3,1
30	5,47
40	17,3
45	31,2
50	52,6
60	206
65	486



* Mataix Claudio. Mecánica de Fluidos y Maquinas Hidráulicas: Perdidas secundarias en conductos cerrados o tuberías. Segunda edición. México D.F.: Alfa omega, Oxford, 2005. Pág. 243.

ANEXO N. Viscosidad cinemática según temperatura del fluido y grado Brix*

		TEMPERATURA						
		VISCOSIDAD CINEMATICA CTKS						
		20	30	40	50	60	70	80
BRIX	0	1	0,8	0,66	0,56	0,48	0,42	0,37
	20	1,8	1,39	1,1	0,91	0,76	0,64	0,57
	30	2,83	2,11	1,64	1,32	1,08	0,91	0,78
	40	5,24	3,73	2,78	2,14	1,7	1,39	1,15
	50	12,55	8,25	5,73	4,17	3,15	2,44	1,96
	60	45,5	26,4	16,5	11	7,64	5,55	4,15
	70	357,5	165,2	85,3	48,4	29,4	19	12,8
	75	1688	644	285	142	77,4	45,5	28,5

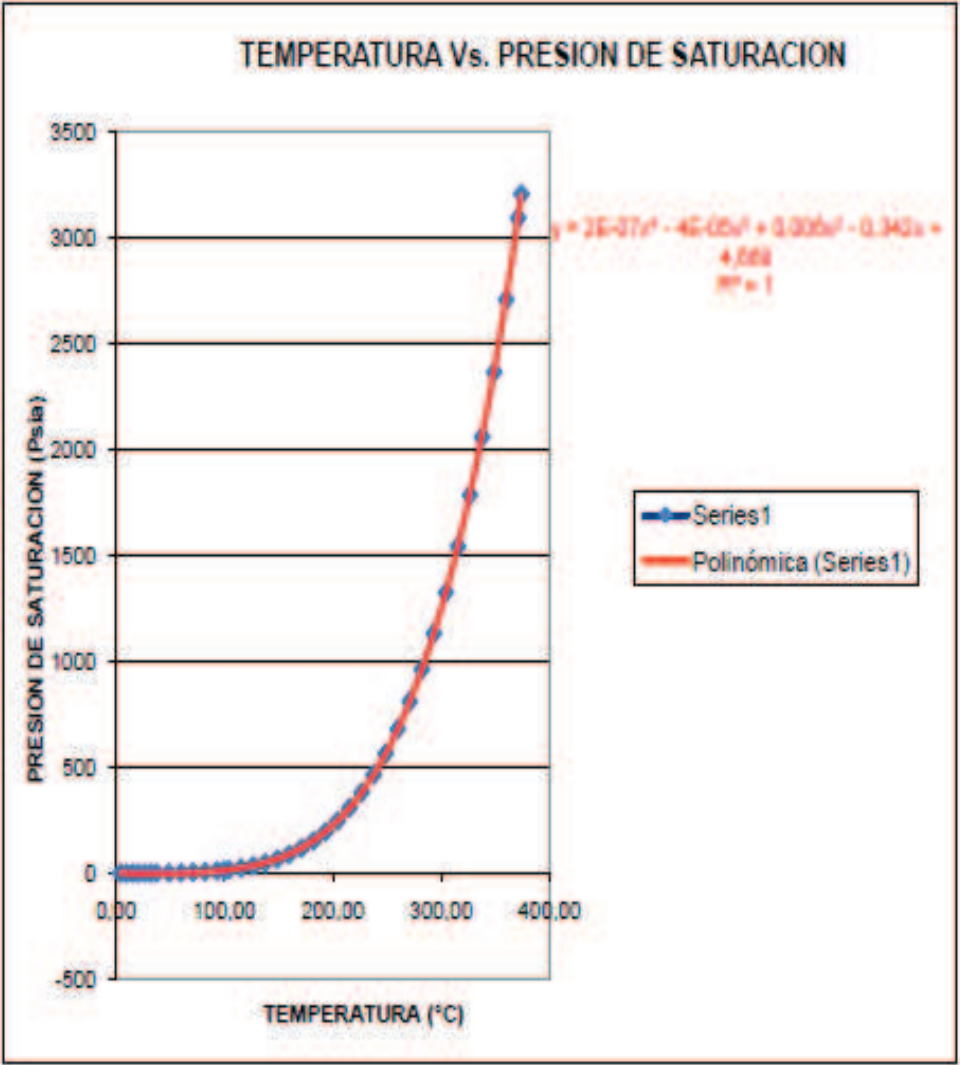


* Emile Hugot. Handbook of Cane Sugar Engineering: Pump System. Primera edición. Ámsterdam: Elsevier, 1986, pag.980.

ANEXO Ñ. Presión de saturación del agua según Temperatura*

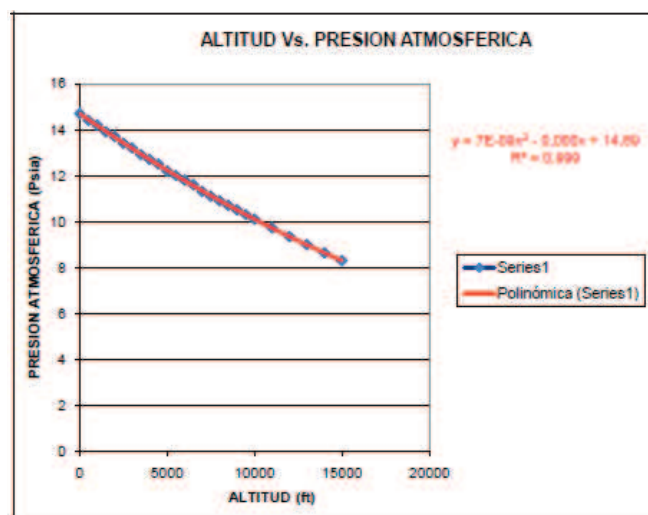
TEMPERATURA (°F)	TEMPERATURA (°C)	PRESION DE SATURACION (PSIA)
40	4,44	0,1217
50	10,00	0,1781
60	15,56	0,2563
70	21,11	0,3631
80	26,67	0,5069
90	32,22	0,6982
100	37,78	0,9492
120	48,89	1,692
140	60,00	2,889
160	71,11	4,741
180	82,22	7,51
200	93,33	11,526
212	100,00	14,696
220	104,44	17,186
240	115,56	24,97
260	126,67	35,43
280	137,78	49,2
300	148,89	67,01
320	160,00	89,66
340	171,11	118,01
360	182,22	153,04
380	193,33	195,77
400	204,44	247,31
420	215,56	308,83
440	226,67	381,59
460	237,78	466
480	248,89	566,1
500	260,00	680,8
520	271,11	812,4
540	282,22	962,5
560	293,33	1133,1
580	304,44	1325,8
600	315,56	1542,9
620	326,67	1786,6
640	337,78	2059,7
660	348,89	2365,4
680	360,00	2708,1
700	371,11	3093,7
705,4	374,11	3206,2

* Yunus A, Cengel, Termodinámica. Quinta Edición. México D.F.: Mc Graw Hill, 2006. Pág. 940, Tabla A-4E.



ANEXO O. Presión atmosférica según altitud*

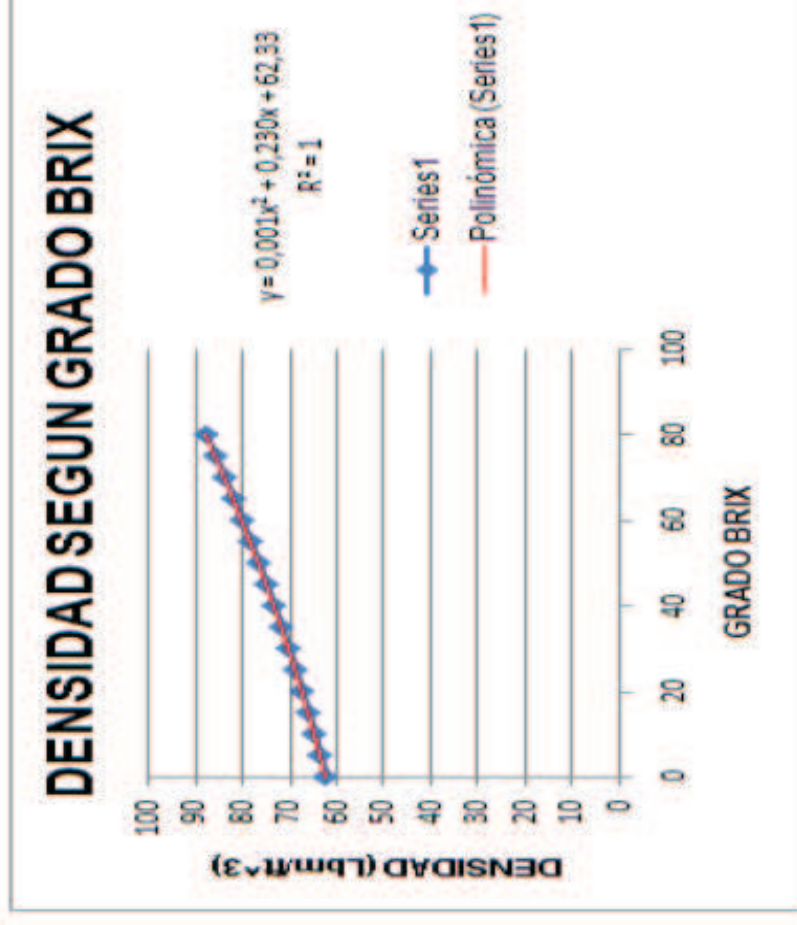
ALTITUD (ft)	PRESION ATMOSFERICA (Psia)
0	14,7
500	14,4
1000	14,2
1500	13,9
2000	13,7
2500	13,4
3000	13,2
3500	12,9
4000	12,7
4500	12,5
5000	12,2
5500	12
6000	11,8
6500	11,6
7000	11,3
7500	11,1
8000	10,9
8500	10,7
9000	10,5
9500	10,3
10000	10,1
11000	9,72
12000	9,34
13000	8,99
14000	8,63
15000	8,29



* Yunus A, Cengel, Termodinámica. Quinta Edición. México D.F.: Mc Graw Hill, 2006. Pág. 940, Tabla A-16E.

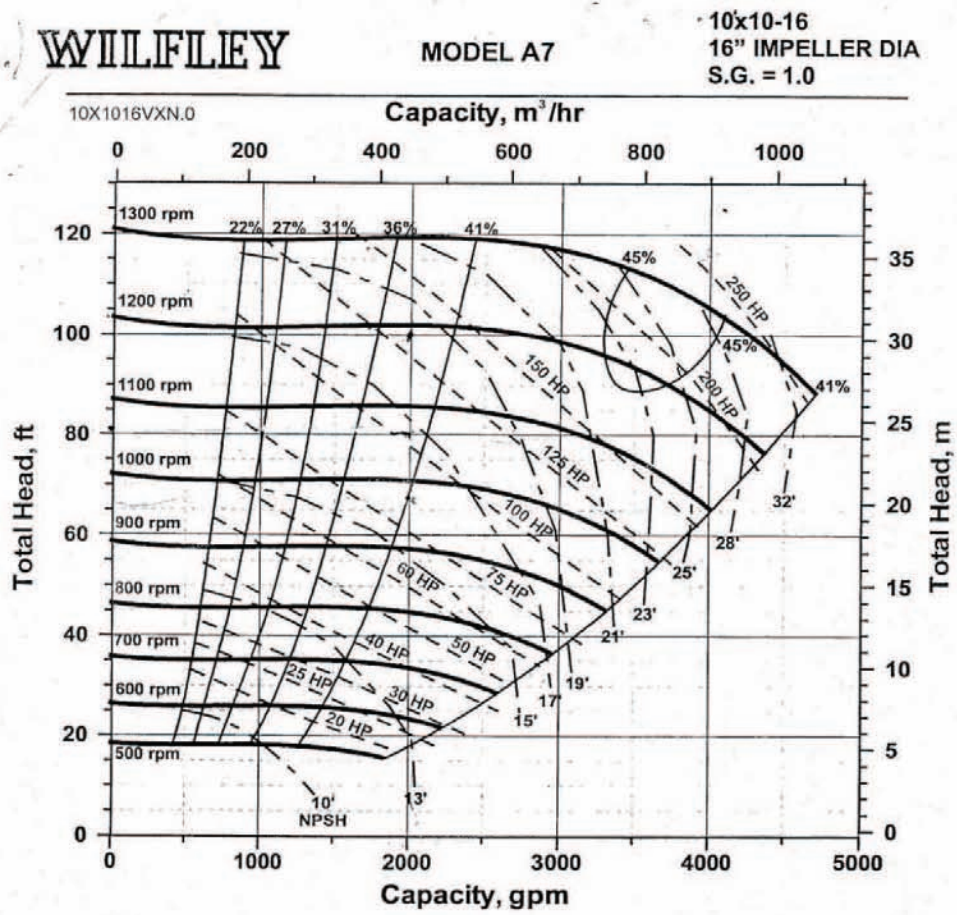
ANEXO P. Densidad según grado Brix*

°BRIX	DENSIDAD (Lbm/ft ³)
0	62,3307
5	63,5087
10	64,7417
15	66,0297
20	67,3727
25	68,7707
30	70,2237
35	71,7317
40	73,2947
45	74,9127
50	76,5857
55	78,3137
60	80,0967
65	81,9347
70	83,8277
75	85,7757
80	87,7787



* Emile Hugot. Handbook of Cane Sugar Engineering: Pump System. Primera edición. Amsterdam: Elsevier, 1986, p.981.

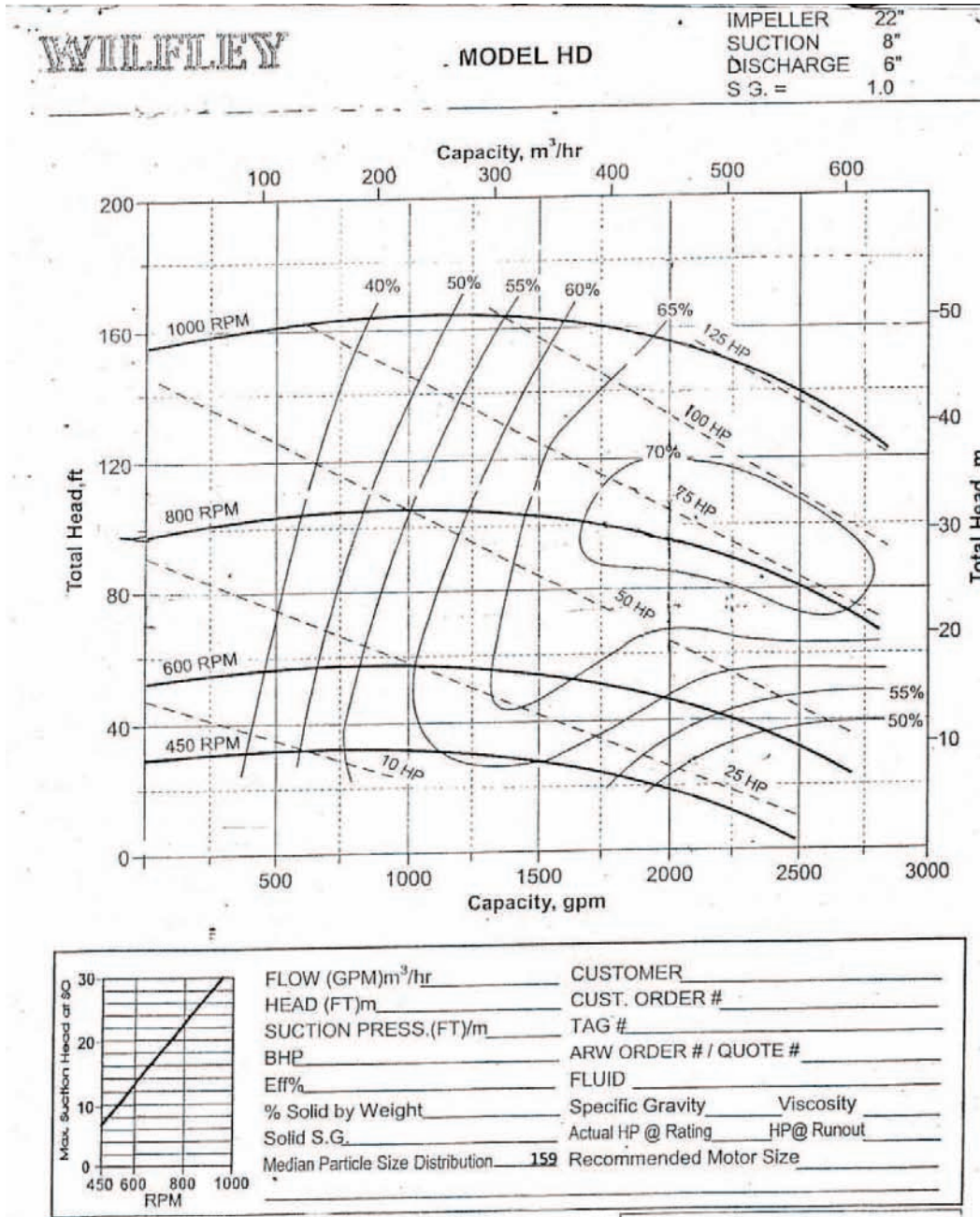
ANEXO Q. Curvas Características, Bomba Wilfley A7 10 x 10



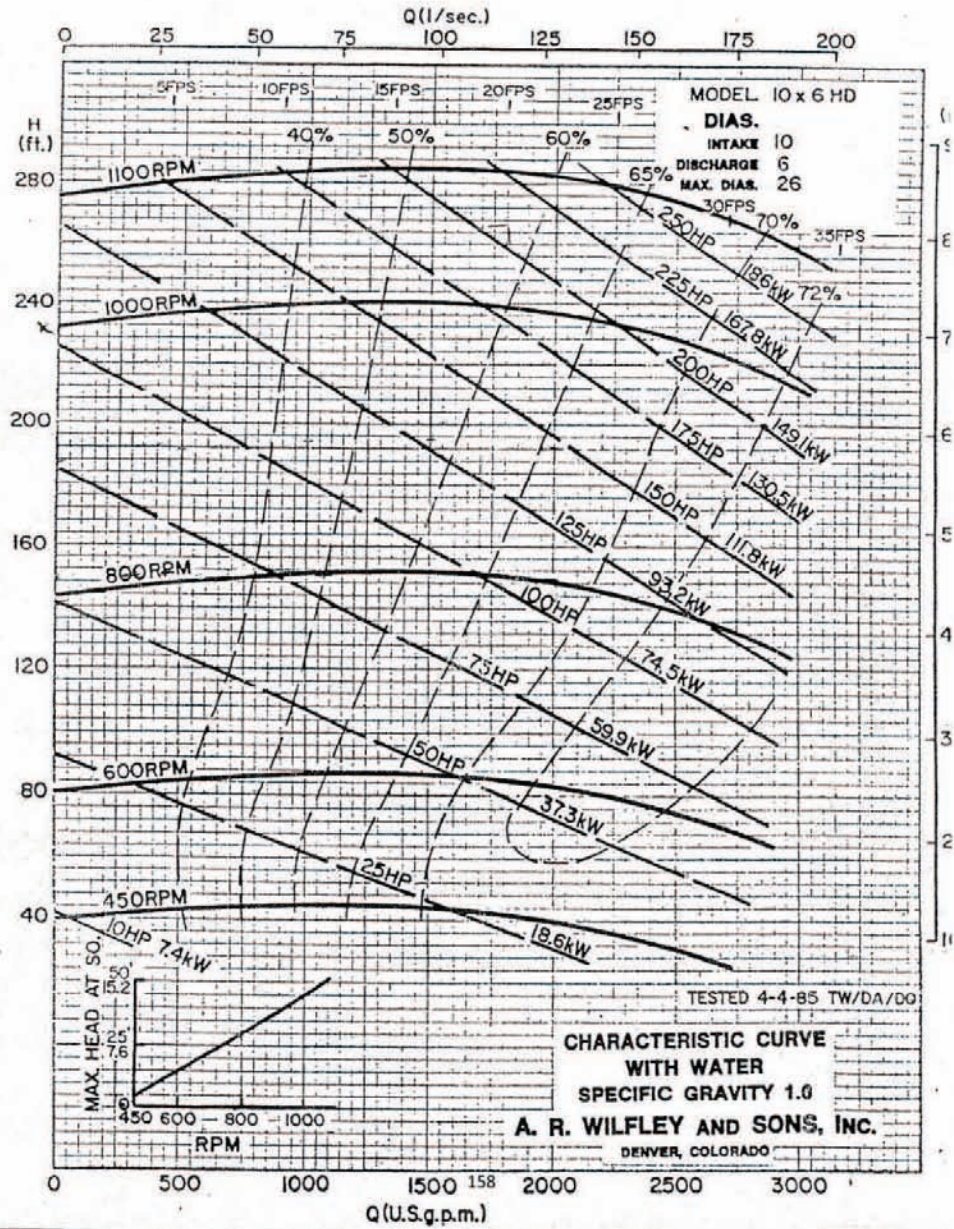
FLOW (GPM) _____	CUSTOMER _____
HEAD (FT) _____	CUST. ORDER # _____
SUCTION PRESS.(FT) _____	TAG # _____
BHP _____	ARW ORDER # / QUOTE # _____
Eff % _____	FLUID _____
SEAL HP _____	Specific Gravity _____ Viscosity _____
TOTAL BHP _____	Actual HP @ Rating _____ HP@ Runout _____
FINAL Eff % _____	Recommended Motor Size _____

Serial No. _____

ANEXO R. Curvas Características, Bomba Wilfley HD 8 x 6



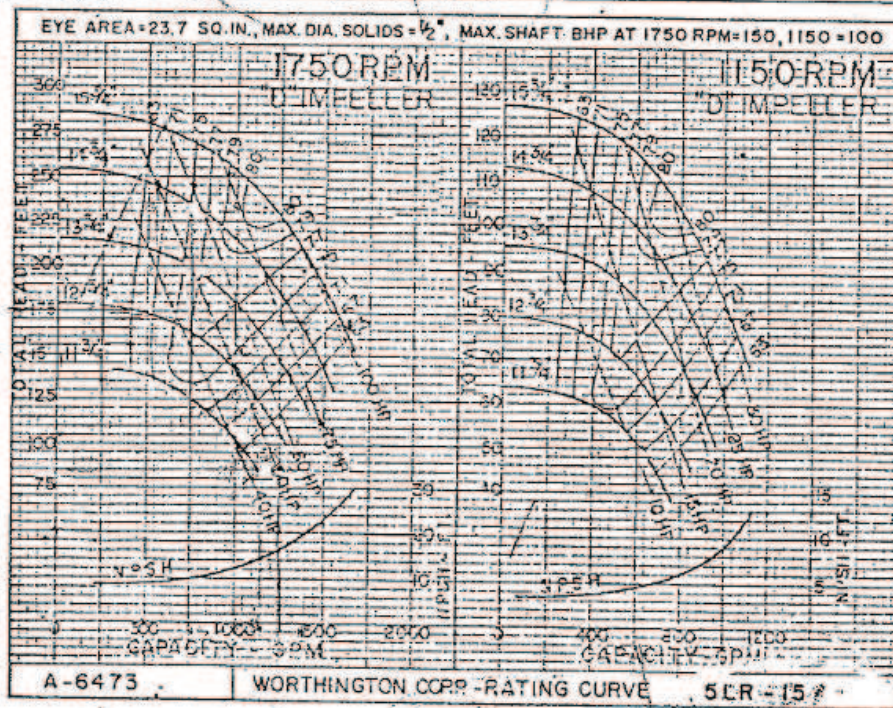
ANEXO S. Curvas Características, Bomba Wilfley HD 10 x 6



ANEXO T. Curvas Características, Bomba Worthington 5LR 15



HORIZONTAL
SPLIT CASE
CENTRIFUGAL PUMPS



5 LR-15 "D"

A-6473

ANEXO U. Curvas Características, Bomba Worthington 4LR 14

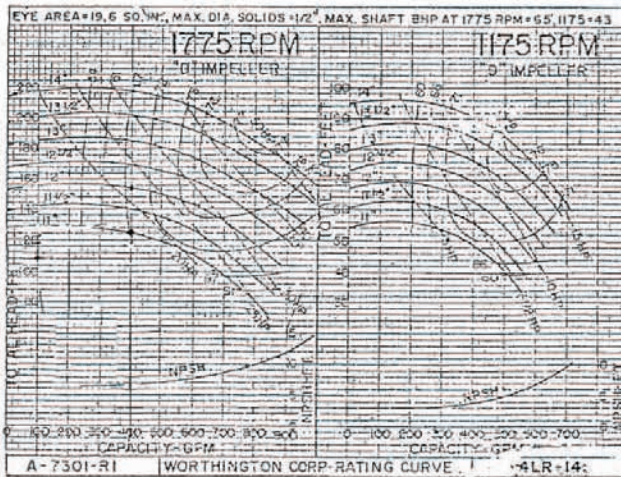
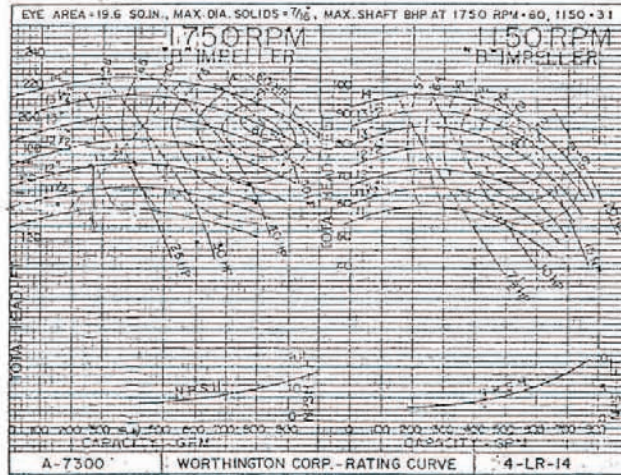


HORIZONTAL
SPLIT CASE
CENTRIFUGAL PUMPS

Proposal Number or District Office Number _____
 ITEM NO. _____ Date _____
 Customer Reference _____

CUSTOMER _____	This pump is guaranteed for one set of design conditions. Other points shown on this curve are approximate and not guaranteed. The design capacity and head are based on shop tests when handling clear, cold water.
SERVICE _____	
ITEM _____	
DATE _____	
OFFICE _____	
BY _____	
DESIGN CONDITIONS	
CAPACITY _____ GPM	
TOTAL HEAD _____ FT.	

Order Forms from
Stationery & Printing
Section, V. Section,
New York, N.Y. 10001
New Form No. 20-100-1982



ANEXO V. Curvas Características, Bomba Aurora HC – 4C

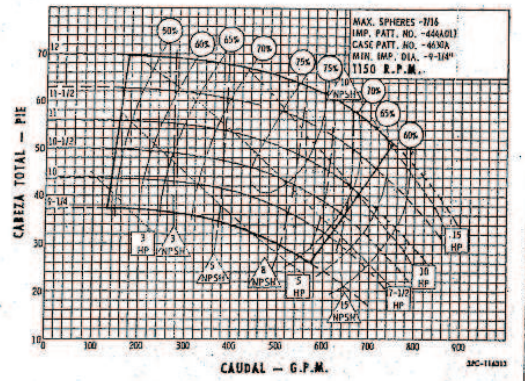
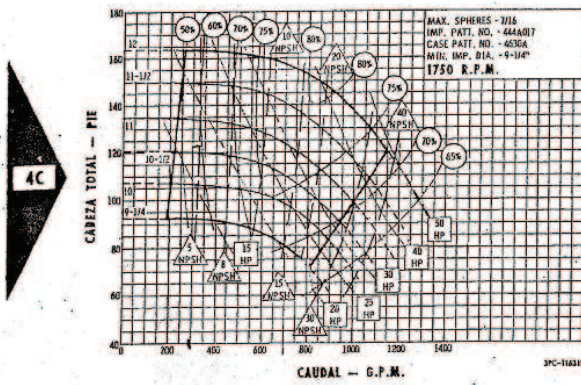


AURORA PUMP DIVISION
 THE NEW YORK AIR BRAKE COMPANY
 AURORA ILLINOIS

SECTION GGU PAGE 4
 DATED JULY 1970

TYPE GGU

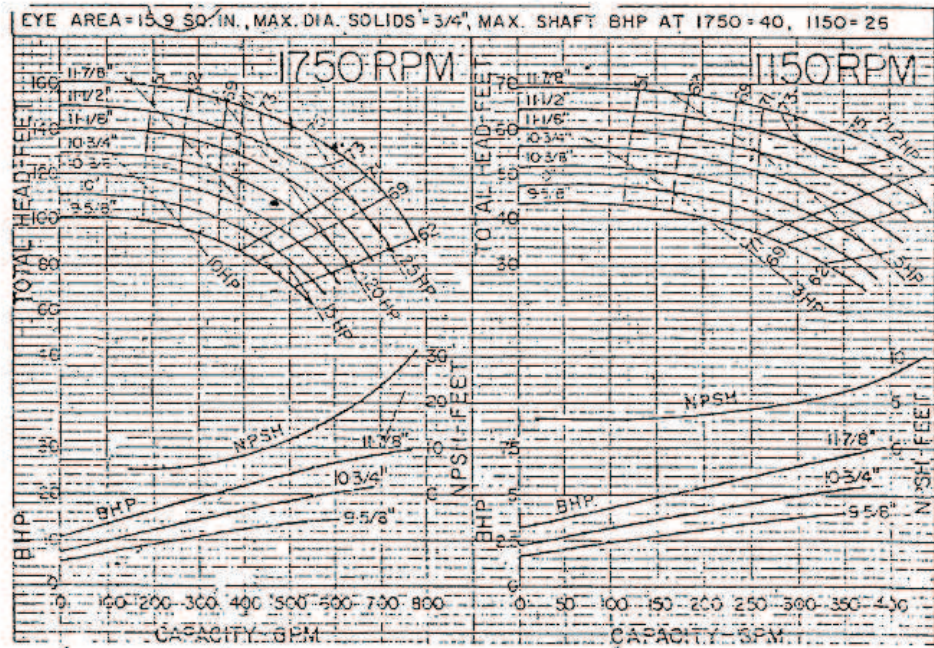
IMPELENTE CERRADO



ANEXO W. Curvas Características, Bomba Worthington 3CNE - 104

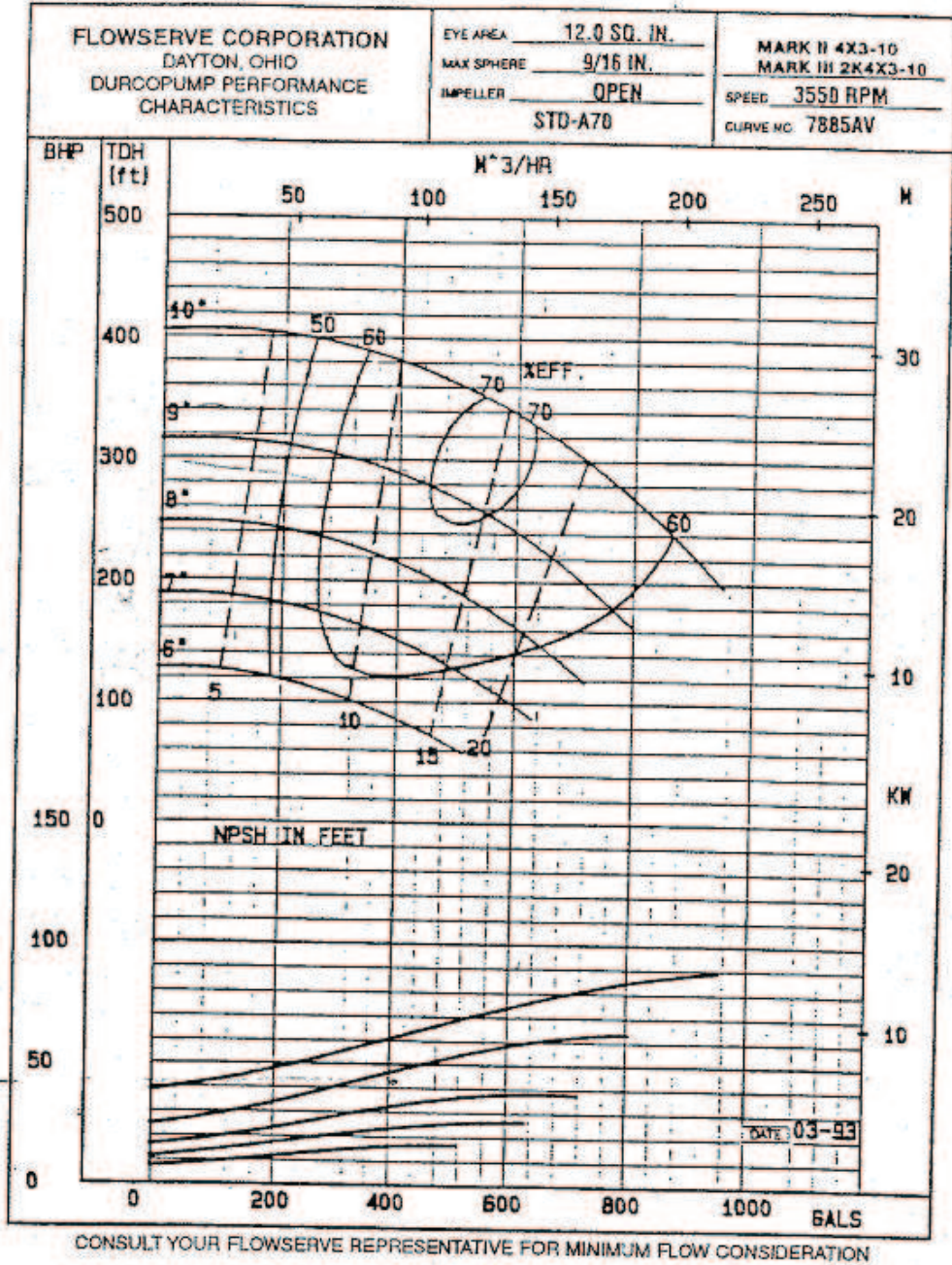


END SUCTION
CENTRIFUGAL PUMPS



3 CNE- DNE - 104

ANEXO X. Curvas Características, Bomba Durco STD - A70



ANEXO Y. Curvas Características, Bomba Wilfley A7 6 x 4

A.R. Wilfley and Sons, Inc.
<http://www.wilfley.com>
 7350 E Progress Place, Suite 200
 Englewood, Colorado, 80111 (USA)
 Phone: (303) 779-1777
 FAX: (303) 779-1277
 E-Mail pumps@wilfley.com



WILFLEY

Model A7

6x4-10 ASME A80-10
 1450.0 RPM SG= 1.4

