

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN TECNO-ECONÓMICA DEL SISTEMA DE SUMINISTRO DE COMBUSTIBLE LÍQUIDO DE LA PLANTA AMPLIACIÓN TACOA

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de
Venezuela
Por el Bachiller:
Mota D., Gabriel A.
Para optar al título de
Ingeniero Mecánico.

Caracas, 2012

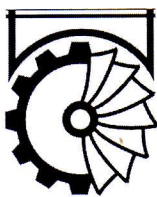
TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN TECNO-ECONÓMICA DEL SISTEMA DE SUMINISTRO DE COMBUSTIBLE LÍQUIDO DE LA PLANTA AMPLIACIÓN TACOA

Tutor Académico: Prof. Perera T., José L.
Tutor Industrial: Ing. Palacios A, Lisbeth C.

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de
Venezuela
Por el Bachiller:
Mota D., Gabriel A.
Para optar al título de
Ingeniero Mecánico.

Caracas, 2012



Facultad de Ingeniería
INGENIERIA MECÁNICA
Universidad Central de Venezuela
DEPARTAMENTO DE ENERGÉTICA

Caracas, 06 de agosto de 2012

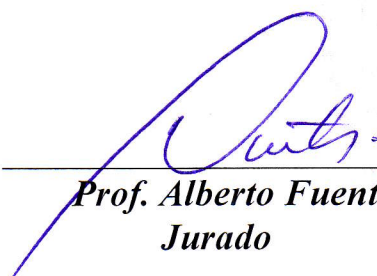
ACTA

Los abajo firmantes, miembros del jurado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el (los) bachiller (es):

Gabriel Alejandro Mota Daza

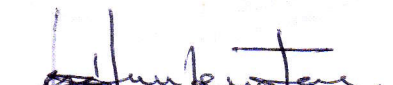
Titulado: “Evolución Técnico-Económica del Sistema de Suministro de Combustible Líquido de la Planta Ampliación Tocoa”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudio conducente al Título de Ingeniero Mecánico.


Prof. Alberto Fuentes
Jurado




Prof. Alfonso Mateo
Jurado


Prof. José Luis Perera
Tutor

DEDICATORIA

A mis padres quienes me han dado todo su apoyo, confianza y motivación; se aseguraron de mantenerme sano y darme educación; quienes me han dado su vida, amor y felicidad.

A mi hermana, quien siempre me ha dado ánimos para seguir adelante.

A mi novia Carolina que me ha dado todo su cariño, amor y lo mejor de si misma en cada momento sin esperar nada a cambio.

A mis amigos quienes creen en la lealtad y fortaleza de una verdadera amistad, y quienes creen en mis pensamientos y ambiciones.

A mis tutores, profesores, profesionales, compañeros y conocidos quienes enriquecen mi formación como persona y profesional integral.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, que ilumina mi camino en las dificultades, gracias por estar a mi lado protegiéndome y dándome la fortaleza necesaria para pasar las pruebas de mi camino y cumplir los objetivos que me he propuesto.

A mis padres Moraima y Alirio, y a mi hermana Mayra, por preocuparse y darme todo su apoyo para el éxito de mis objetivos, y ofrecerme toda su confianza.

A mi familia siempre presentes a través de todas las dificultades de la vida.

A la Universidad Central de Venezuela, así como a los profesores que dejaron en mi, grandes enseñanzas y experiencias que contribuyeron en mi formación académica.

Al Profesor José Luis Perera, por ser la persona que me ha brindado todas sus enseñanzas para obtener ese conocimiento adicional que siempre es útil para mi aprendizaje tanto como persona, como profesionalmente, y ejecutar con éxito este Trabajo Especial de Grado.

A mi novia, por estar junto mi tanto en las buenas como en las malas, apoyándome incondicionalmente, por ponerse en mis zapatos en muchas oportunidades y por ser la persona mas especial en mi vida y la que me incentiva a seguir luchando y seguir cumpliendo todas mis metas.

A la Ing. Lisbeth Palacios, por la oportunidad de trabajar y desarrollar mi tesis en la planta, por creer en mí, y por la confianza en mi depositada.

Por el apoyo, guía y ayuda desinteresada, y a todos quienes contribuyeron a la realización de este trabajo: en general al personal de operaciones de la EDC en la planta Ampliación Tocoa, a mis compañeros tesisistas en Tocoa: Karenny, Karen y Kevyn. Y de manera muy especial a Mareza y al señor Adolfo.

Mota D., Gabriel A.

**EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONOMICA DEL SISTEMA DE SUMINISTRO DE
COMBUSTIBLE LÍQUIDO DE LA PLANTA AMPLIACIÓN TACOA**

Tutor Académico: Prof. Perera T., José L.

Tutor Industrial: Ing. Palacios A, Lisbeth C.

**Tesis. Caracas. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería
Mecánica. 2012 N° de páginas 469.**

Palabras claves: bombas de desplazamiento positivo, fluido viscoso,
redes de tuberías, caída de presión, caudal, fueloil.

El propósito de este trabajo es analizar técnica y económicamente el sistema de almacenamiento y suministro de fueloil utilizado como combustible en el proceso de transformación y producción de energía eléctrica en la planta Ampliación Tocoa.

Se hace necesario identificar y determinar por completo y en detalle el sistema de combustible, por lo que se realizó un levantamiento de información y datos de las líneas de tuberías y accesorios que lo componen, así como los diferentes equipos y dispositivos demás que hacen posible su funcionamiento.

Teniendo los datos planteamos las ecuaciones que representan el sistema, esto según el método de cálculo elegido (método de Hardy-Cross) y las variables que lo representan, para luego resolver los distintos sistemas de ecuaciones. Esto nos permite tener una visión clara de los parámetros del sistema y obtener datos que nos llevan a realizar el análisis del mismo, mediante ello se determinaron los parámetros hidráulicos de funcionamiento del sistema.

El estudio del sistema de suministro de combustible se dividió en cuatro casos o subsistemas, esto se debe a los modos de operación y funcionamiento del mismo.

Todo esto con la finalidad de evaluar su estado actual y proponer cambios al sistema, con los cuales optimizar sus procesos.

En este trabajo se dejan plasmados datos de las variables de funcionamiento y operación del sistema, la interacción entre ellas y como influyen en el funcionamiento del mismo; así como resultados de los diferentes casos propuestos de cálculo y simulación de las redes de tuberías y accesorios que lo componen.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN	vi
ÍNDICE GENERAL	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE GRÁFICOS	xii
LISTA DE ANEXOS	xiv
LISTA DE SÍMBOLOS USADOS	xvi
LISTA DE UNIDADES	xviii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
1.2. OBJETIVOS	7
1.2.1. OBJETIVO GENERAL	7
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
1.3. ALCANCES	9
1.4. LIMITACIONES	10
CAPÍTULO II: FUNDAMENTOS TEORICOS	11
2.1. PRINCIPIOS DE LA MECANICA DE LOS FLUIDOS	12
2.1.1 ECUACION DE CONTINUIDAD	12
2.1.2. ECUACION DE LA ENERGIA	12
2.1.3. LINEA PIEZOMETRICA Y LINEA DE ENERGIA	13
2.2. PROPIEDADES FISICAS DE LOS FLUIDOS	14
2.2.1. VISCOSIDAD	14
2.2.2. DENSIDAD	15
2.2.3. VOLUMEN ESPECÍFICO	15
2.2.4. PESO ESPECÍFICO	15
2.2.5. PRESION DE VAPOR	16
2.2.6. GRAVEDAD API	16
2.3. PÉRDIDAS DE CARGA	17
2.3.1. PÉRDIDAS POR FRICCIÓN EN LA TUBERÍA	17
2.3.1.1. FLUJO LAMINAR Y FLUJO TURBULENTO	18
2.3.1.2. FACTOR DE FRICCIÓN	18
2.3.2. PÉRDIDAS EN LOS ACCESORIOS	20
2.3.2.1. PÉRDIDAS EN LOS ACCESORIOS - PRIMER MÉTODO	21
2.3.2.2. PÉRDIDAS EN LOS ACCESORIOS - SEGUNDO MÉTODO	23
2.4. BOMBAS DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO	24
2.5. CÁLCULO DE REDES DE TUBERÍAS	31

CAPÍTULO III: PRESENTACIÓN DEL SISTEMA DE COMBUSTIBLE	36
3.1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE COMBUSTIBLE	37
3.1.1 PROPÓSITO DEL SISTEMA	37
3.1.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	38
3.1.2.1. TANQUES 4, 6, 7 Y 10.	38
3.1.2.2. SISTEMA DE BOMBEO TANQUE 10.	39
3.1.2.3. SISTEMA DE BOMBEO DE TRANSFERENCIA (NIVEL +26).	40
3.1.2.4. SISTEMA DE GRAVEDAD	41
3.1.2.5. SISTEMA DE COMBUSTIBLE LÍQUIDO CALDERA 7, 8 Y 9.	41
3.1.3. ESQUEMAS DEL SISTEMA DE COMBUSTIBLE	47
3.2. OPERACIÓN DEL SISTEMA DE COMBUSTIBLE	50
3.2.1. LLENADO DEL TANQUE 10 CON FUELOIL DESDE EL TANQUERO.	51
3.2.2. TRASEGADO DE COMBUSTIBLE DE LOS TANQUES 4 Y 6 AL TANQUE 10 (SISTEMA DE TRANSFERENCIA)	52
3.2.3. TRASEGADO A LOS TANQUES EXISTENTES DESDE TANQUE 10	53
3.2.4. RECIRCULACIÓN DEL TANQUE 10	54
3.2.4.1. Recirculación corta.	54
3.2.4.2. Recirculación larga.	55
3.2.5. BOMBEO A PLANTA DESDE TANQUE 10	56
3.2.6. LLENADO DE LOS TANQUES 4, 6 y 7 DESDE EL TANQUERO	57
3.2.7. BOMBEO A PLANTA POR MEDIO DEL SISTEMA DE TRANSFERENCIA	59
3.2.8. SUMINISTRO POR MEDIO DEL SISTEMA DE GRAVEDAD	61
3.2.9. BOMBEO DE ALTA PRESION DE LA CALDERA	63
 CAPÍTULO IV: LEVANTAMIENTO, RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN Y ELABORACIÓN DE LOS PLANOS	 65
4.1. CONSTRUCCIÓN DE LOS PLANOS DEL SISTEMA CON AUTOCAD	66
4.2. ESQUEMAS DE LOS CASOS PROPUESTOS A ESTUDIAR.	67
4.3. CARACTERÍSTICAS DEL FUELOIL N.º 6 USADO PARA LA OBTENCIÓN DE VAPOR EN LA PLANTA.	79
4.3.1. VALORES OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS DEL FUELOIL	81
4.4. DATOS DE DISEÑO Y PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LOS EQUIPOS Y COMPONENTES DEL SISTEMA DE COMBUSTIBLE.	83
4.4.1. CALENTADORES COMBUSTIBLE	84
4.4.2. BOMBAS DEL SISTEMA DE TRANSFERENCIA	86
4.4.3. BOMBAS DEL TANQUE N.º 10	88
4.4.4. BOMBAS DE ALTA PRESIÓN DE LA CALDERA	90
4.4.5. FILTROS DE COMBUSTIBLE	93
4.4.6. BOMBAS DE ARRECIFE	96
4.4.7 DATOS DE LOS TANQUES DEL SISTEMA	97
4.5. DATOS DE LA RED DE TUBERÍAS Y ACCESORIOS	99
4.6. DATA DEL DCS (SISTEMA DE CONTROL DISTRIBUIDO)	109
4.6.1 COMUNES - SISTEMA DE TRANSFERENCIA Y TANQUE N.º 10.	110
4.6.2 UNIDAD TURBO GENERADORA N.º 7 (EQUIPOS CALDERA U7)	127

4.6.3 UNIDAD TURBO GENERADORA N.º 8 (EQUIPOS CALDERA U8)	132
4.6.4 UNIDAD TURBO GENERADORA N.º 9 (EQUIPOS CALDERA U9)	137
4.7. REPORTES DIARIOS DE OPERACIÓN.	143
CAPÍTULO V: DESARROLLO NUMÉRICO Y DE CÁLCULO	160
5.1. CÁLCULOS Y DESARROLLO NUMÉRICO	161
5.2. MEMORIA DE CÁLCULO	174
CAPÍTULO VI: ESTUDIO DE LAS PROPUESTAS DE MEJORA	203
6.1. PROPUESTAS DE MEJORA	204
CAPÍTULO VII: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	211
7.1. RESULTADOS	212
7.1.1. RESULTADOS DEL PRIMER CASO	214
7.1.1.1. GRÁFICOS DE LOS RESULTADOS DEL PRIMER CASO	217
7.1.2. RESULTADOS DEL SEGUNDO CASO	219
7.1.2.1. GRÁFICOS DEL SEGUNDO CASO	220
7.1.3. RESULTADOS DEL TERCER CASO	224
7.1.3.1. GRÁFICOS DEL TERCER CASO	225
7.1.4. RESULTADOS DEL CUARTO CASO	229
7.1.4.1. GRÁFICOS DEL CUARTO CASO	230
7.1.5. PÉRDIDAS Y LONGITUDES EQUIVALENTES DE TUBERÍAS	232
7.2. RESULTADOS CON BASE EN LA DATA DEL DCS	237
7.3. ANALISIS DE RESULTADOS	239
CAPÍTULO VIII: ANÁLISIS ECONÓMICO	242
8.1 ANÁLISIS ECONÓMICO	243
CONCLUSIONES	246
RECOMENDACIONES	247
BIBLIOGRAFÍA	248
REFERENCIAS ELECTRÓNICAS	250
GLOSARIO DE TERMINOS	251
APÉNDICE	256
ANEXOS	343

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Vista del Complejo generador Josefa Joaquina Sánchez Bastidas	7
Figura 2.1	Línea piezométrica y línea de energía	13
Figura 2.2	Diagrama de Moody	19
Figura 2.3	Clasificación de las bombas de desplazamiento positivo	24
Figura 2.4	Curva característica de la bomba de desplazamiento positivo	25
Figura 2.5	Bombas típicas de tornillo	28
Figura 2.6	Curva característica y curva del sistema	29
Figura 2.7	Bombas en serie y en paralelo	30
Figura 2.8	Ejemplo de un sistema para el calculo	33
Figura 3.1	Esquema General del Complejo Generador J.J.S.B.	37
Figura 3.2	Esquema del sistema combustible líquido	49
Figura 3.3	Esquema del sistema combustible de alta presión de la caldera	50
Figura 3.4	Esquema llenado del tanque n.º 10 desde el tanquero	52
Figura 3.5	Esquema trasegado a los tanques existentes desde tanque n.º 10	54
Figura 3.6	Esquema de la operación de bombeo a planta desde tanque n.º 10	57
Figura 3.7	Esquema de bombeo a planta por el sistema de transferencia	60
Figura 3.8	Esquema de suministro por medio del sistema de gravedad	62
Figura 3.9	Esquema de la operación de bombeo de alta presión de la caldera	64
Primer caso		
Figura 4.1	Esquema red de tuberías tanque n.º 10 hasta los tanques diarios	69
Figura 4.2	Esquema red equivalente en caudales para el primer caso	70
Segundo caso		
Figura 4.2	Esquema red de tuberías desde el tanque n.º 10 hasta la caldera	71
Figura 4.4	Esquema red equivalente en caudales para el segundo caso	72
Tercer caso		
Figura 4.5	Esquema red de tuberías tanques diarios hasta la caldera	73
Figura 4.6	Esquema red equivalente en caudales para el tercer caso	74
Cuarto caso		
Figura 4.7	Esquema red de tuberías tanque n.º 7 hasta la caldera de la U/7	75
Figura 4.8	Esquema red equivalente en caudales para el cuarto caso	76
Figura 4.9	Capacidad y niveles de los tanques de almacenamiento de fueloil	100
Figura 6.1	Propuestas instalación de bombas a la descarga tanque 7	210
Figura 6.2	Propuestas instalación de bombas a la descarga tanque 7	211
Figura 6.3	Propuestas instalación de bombas a la descarga tanque 7	212

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Valores de rugosidad absoluta en tuberías comerciales	20
Tabla 4.1	Valores típicos del combustible fueloil	81
Tabla 4.2	Características del combustible	81
Tabla 4.3	Valores de las propiedades del combustible suministrado a planta	83
Tabla 4.4	Datos de las tuberías de fueloil para el primer caso.	102
Tabla 4.5	Datos de las tuberías de fueloil para el segundo caso.	104
Tabla 4.6	Datos de las tuberías de fueloil para el tercer caso.	106
Tabla 4.7	Datos de las tuberías de fueloil para el cuarto caso.	108
Tabla 4.8	Datos de las tuberías de fueloil: puente de tuberías	109
Tabla 4.9	Datos de las tuberías de fueloil: líneas en nivel planta y caldera	110
Tabla 4.10	Reporte diario de operación - Estación de petróleo nivel 26	146
Tabla 4.11	Reporte diario de operación - Nivel tanques de combustible	153
Tabla 4.12	Reporte diario de operación - Estación de petróleo tanque n.º 10	157
Tabla 7.1	Resultados del análisis de la red propuesta en el primer	216
Tabla 7.2	Resultados del análisis de la red propuesta en el primer	217
Tabla 7.3	Resultados del análisis de la red propuesta en el primer caso	218
Tabla 7.4	Resultados del análisis de la red propuesta en el segundo caso.	221
Tabla 7.5	Resultados del análisis de la red propuesta en el tercer caso.	226
Tabla 7.6	Resultados del análisis de la red propuesta en el cuarto caso.	231
Tabla 7.7	Resumen memoria de cálculo longitudes equivalentes 1er caso.	235
Tabla 7.8	Resumen memoria de cálculo longitudes equivalentes 2do caso.	236
Tabla 7.9	Resumen memoria de cálculo longitudes equivalentes 3er caso.	237
Tabla 7.10	Resumen memoria de cálculo longitudes equivalentes 4to caso.	238
Tabla 7.11	Resultados de los cálculos elaborados a partir del DCS.	240
Tabla 8.1	Costos asociados a la adquisición del equipo.	245
Tabla 8.2	Costos operativos y de mantenimiento anuales.	245

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Grafico 4.1	Curva de viscosidad contra la temperatura del fuel oil	
Grafico 4.2	Nivel de llenado del tanque n.º 4	112
Grafico 4.3	Nivel de llenado del tanque n.º 6	113
Grafico 4.4	Nivel de llenado del tanque n.º 7	114
Grafico 4.5	Corriente en el motor de la bomba PP08	115
Grafico 4.6	Corriente en el motor de la bomba PP06	116
Grafico 4.7	Corriente en el motor de la bomba PP05	117
Grafico 4.8	Presión a la descarga de las bombas del sistema de transferencia	119
Grafico 4.9	Nivel de llenado del tanque n.º 10	121
Grafico 4.10	Corriente en el motor de la bomba PP20	122
Grafico 4.11	Corriente en el motor de la bomba PP18	123
Grafico 4.12	Corriente en el motor de la bomba PP17	124
Grafico 4.13	Temperatura del fueloil almacenado en el tanque n.º 10	126
Grafico 4.14	Presión de descarga del grupo de bombas del tanque n.º 10	127
Gráficos – datos DCS combustible U/7		
Grafico 4.15	Temperatura del combustible en el nivel de planta y caldera	129
Grafico 4.16	Presión de combustible en el nivel de planta y caldera	130
Grafico 4.17	Posición vástago de válvula reguladora de presión - nivel planta	131
Grafico 4.18	Flujo de combustible a la descarga de las bombas de la caldera	132
Grafico 4.19	Flujo de combustible a los anillos de quemadores de la caldera	133
Gráficos – datos DCS combustible U/8		
Grafico 4.20	Temperatura del combustible en el nivel de planta y caldera	134
Grafico 4.21	Presión de combustible en el nivel de planta y caldera	135
Grafico 4.22	Posición vástago de válvula reguladora de presión - nivel planta	136
Grafico 4.23	Flujo de combustible a la descarga de las bombas de la caldera	137
Grafico 4.24	Flujo de combustible a los anillos de quemadores de la caldera	138
Gráficos – datos DCS combustible U/9		
Grafico 4.25	Temperatura del combustible en el nivel de planta y caldera	139
Grafico 4.26	Presión de combustible en el nivel de planta y caldera	140
Grafico 4.27	Posición vástago de válvula reguladora de presión - nivel planta	141
Grafico 4.28	Flujo de combustible a la descarga de las bombas de la caldera	142
Grafico 4.29	Flujo de retorno de combustible de la caldera	143
Grafico 4.30	Flujo de combustible a los anillos de quemadores de la caldera	144
Reportes diarios de operación		
Grafico 4.31	Presión en la succión y la descarga de la bomba PP05	150
Grafico 4.32	Presión en la succión y la descarga de la bomba PP08	151
Grafico 4.33	Temperatura a la salida del calentador	152
Grafico 4.34	Nivel llenado de los tanques – reportes de operación	156
Grafico 4.35	Presión en la succión y descarga bombas del tanque n.º 10	158
Grafico 4.36	Presión diferencial filtros a la descarga bombas tanque n.º 10	159
Grafico 4.37	Presión colector succión y descarga bombas del tanque n.º 10	160
Grafico 4.38	Temperatura colector de succión bombas del tanque n.º 10	161

Primer caso		
Gráfico 7.1	Caudal de retorno contra viscosidad y válvula de control	219
Gráfico 7.2	Presión de la bomba contra viscosidad y válvula de control	219
Gráfico 7.3	Rata de llenado contra viscosidad y válvula de control	219
Gráfico 7.4	Eficiencia contra viscosidad y válvula de control	220
Gráfico 7.5	Corriente contra viscosidad y válvula de control	220
Segundo caso		
Gráfico 7.6	Caudal de retorno en reguladora del T10	222
Gráfico 7.7	Presión total de la bomba del T10	222
Gráfico 7.8	Caudal de retorno de las calderas	223
Gráfico 7.9	Eficiencia de la bomba del T10	223
Gráfico 7.10	Corriente en el motor de la bomba del T10	224
Gráfico 7.11	Presión total en la bomba de la caldera	224
Gráfico 7.12	Eficiencia de la bomba de la caldera	225
Gráfico 7.13	Corriente del motor de la bomba de caldera	225
Tercer caso		
Gráfico 7.14	Caudal de retorno reguladora del sistema de transferencia (n26)	227
Gráfico 7.15	Presión total de la bomba del sistema de transferencia (n26)	227
Gráfico 7.16	Caudal de retorno en reguladora presión de la caldera -bypass	228
Gráfico 7.17	Eficiencia de la bomba del sistema de transferencia (n26)	228
Gráfico 7.18	Corriente en el motor bomba del sistema de transferencia (n26)	229
Gráfico 7.19	Presión total en la bomba de la caldera	229
Gráfico 7.20	Eficiencia de la bomba de la caldera	230
Gráfico 7.21	Corriente del motor de la bomba de caldera	230
Cuarto caso		
Gráfico 7.22	Caudal de retorno que se conecta hacia el anillo en tanque 4	232
Gráfico 7.23	Presión total en la bomba de la caldera	232
Gráfico 7.24	Eficiencia de la bomba de la caldera	233
Gráfico 7.25	Corriente del motor de la bomba de caldera	233

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A.

A.1. Cartas MARAVEN – EDC	344
A.2. Datos tanque número 10	348
A.3. Bombas del tanque 10	349
A.4. Informe de pruebas bombas del tanque 10	351
A.5. Curva de la bomba del sistema de transferencia (nivel 26)	353
A.6. Bombas del sistema de transferencia (nivel 26)	355
A.7. Motor de las bombas del sistema de transferencia	359
A.8. Calentador de fueloil del sistema de transferencia	360
A.9. Data de los filtros de combustible (nivel 26)	361
A.10. Curva característica de las bombas de la caldera	363
A.11. MITSUBISHI – Presión de succión bombas de la caldera	365
A.12. Calentador de fueloil de la caldera	366
A.13. Data de los filtros de combustible de la caldera.	370
A.14. Bombas de fueloil de la planta arrecife (en desuso).	372

ANEXO B. ANEXO FOTOGRÁFICO

B.1. Tanque número 10	373
B.2. Estación de bombeo del tanque 10	373
B.3. Bomba de la estación del tanque 10	374
B.4. Filtros en la succión descarga de las bombas de la estación del tanque 10	375
B.5. Filtros a la descarga de las bombas de la estación del tanque 10	375
B.6. Válvula en la quebrada arrecife para seleccionar llenado de tanques	376
B.7. Tanque número 4	376
B.8. Tanque número 7	377
B.9. Estación de bombeo de transferencia (nivel 26)	377
B.10. Bomba de combustible del sistema de transferencia	378
B.11. Retorno de combustible del sistema de transferencia (anillo tanque 4)	378
B.12. Válvula reguladora de presión del sistema de transferencia	379
B.13. Calentadores de combustible del sistema de transferencia	379
B.14. Estación de bombas y calentador de la caldera	380
B.15. Válvula selectora de tres vías	380
B.16. Bombas de combustible de alta presión de la caldera	381
B.17. Mantenimiento a las bombas de alta presión de la caldera	382
B.18. Filtros a la succión de las bombas de la caldera	383
B.19. Filtros a la descarga de las bombas de la caldera	383
B.20. Filtros de retorno de combustible de la caldera	384
B.21. Válvula reguladora de presión de combustible de la caldera (nivel 3)	384
B.22. Calentadores de combustible de la caldera	385
B.23. Válvula reguladora de flujo de combustible (primer piso de la caldera)	385

B.24. Válvula de parada de emergencia (stop valve) de fueloil de la caldera	386
B.25. Disposición de los quemadores en una esquina de la caldera	386
B.26. Quemador de combustible	387
B.27. Sistema de suministro de combustible por gravedad	387
B.28. Retorno del anillo de gravedad en Tacoa	388

ANEXO C.

C.1. Tablas del CAMERON y CRANE	389
---------------------------------	-----

ANEXO D.

D.1. Tablas de datos del DCS de los sistemas comunes de combustible	394
D.2. Tablas de datos del DCS del sistema de combustible unidades 7, 8 y 9.	426

ANEXO E.

E.1. Tablas de datos del combustible	463
--------------------------------------	-----

LISTA DE SÍMBOLOS USADOS

A = Área de la sección transversal de tubería metros cuadrados.
 D = Diámetro interior de tubería en metros.
 d = Diámetro interior de tubería en pulgadas.
 f = Factor de fricción en la ecuación de Darcy-Weisbach (adimensional).
 g = Aceleración de la gravedad (9,81 metros por segundo cuadrado).
 H = Altura total expresada en metros de columna del líquido.
 h = Altura manométrica en un punto determinado, en metros de columna de líquido.
 h_f = Pérdidas primarias en metros de columna de líquido.
 h_p = Pérdidas secundarias en metros de columna de líquido.
 H_B = Altura de la bomba en metros de columna de líquido.
 H_r = Pérdidas totales de carga ($h_f + h_p$) en metros de columna de líquido.
 K = Coeficiente de resistencia o de pérdida de carga por velocidad (adimensional).
 L = Longitud de tubería en metros.
 L_e = Longitud equivalente
 N = Velocidad de giro en revoluciones por minuto (rpm)
 P_{atm} = presión atmosférica.
 P = Presión manométrica en newton por metro cuadrado (pascal).
 P' = Presión absoluta en newton por metro cuadrado (pascal).
 p = Presión manométrica en bars.
 p' = Presión absoluta en bars.
 $Phid$ = Potencia hidráulica, en kW.
 $Pmec$ = Potencia de la bomba, en kW.
 $Pelec$ = Potencia eléctrica, en kW.
 Q = Caudal en metros cúbicos por segundo.
 Qh = Caudal en metros cúbicos por hora.
 Re = Número de Reynolds (adimensional).
 SG = Densidad relativa o gravedad específica (adimensional).
 t = Temperatura en grados Celsius.
 $\bar{v}$ = Volumen específico de fluido en metros cúbicos por kilogramo.
 V = Velocidad media de flujo en metros por segundo.
 Vol = Volumen en metros cúbicos.
 W = Peso, en newton.
 Z = Altura, cota o elevación potencial sobre el nivel de referencia en metros.

Griegas

Δ = Diferencia entre dos puntos.

ε = Rugosidad absoluta de las paredes de las tuberías en milímetros.

γ = Peso específico en newton por metro cubico.

μ = Viscosidad absoluta o dinámica en pascal segundo (también en centipoises)

ν = Viscosidad cinemática en metros cuadrados por segundo (también centistokes).

η = Rendimiento o eficiencia en porcentaje %.

ρ = Densidad del fluido en kilogramos por metro cúbico.

Σ = Suma o sumatoria.

θ = Ángulo.

Otras:

ANSI: American National Standards Institute.

API: American Petroleum Institute.

ASME: American Society of Mechanical Engineers.

ASTM: American Society for Testing and Materials.

AWS: American Welding Society.

DIN: Deutsches Institut für Normung (German Institute for Standardization).

gpm: galones por minuto.

msnm: metros sobre el nivel del mar.

rpm: revoluciones por minuto.

NFPA: National Fire Protection Association.

NEMA: National electrical Manufacturers Association.

OSHA: Occupational Safety and Health Administration.

psi = libra por pulgada cuadrada.

LISTA DE UNIDADES

°API	grados o gravedad API
°C	grados Celsius
A	amperio
bar	bar
cSt	centiStokes
cP	centiPoise
h	hora
kg	kilogramo
kgf	kilogramo-fuerza = kp (kilopondio)
km	kilómetro
J	julio (<i>joule</i>)
m	metro
m.c.l. ó mcl	metros de columna de líquido
m.c.a. ó mca	metros de columna de agua
mm	milímetro
N	newton
Pa	pascal
psi	libras por pulgada cuadrada (<i>pounds per square inch</i>)
s	segundo
W	vatio o <i>Watt</i>

INTRODUCCIÓN

El parámetro básico que debe satisfacer un sistema de bombeo es el transporte de un caudal de un determinado fluido de un lugar a otro. Además, suele ser necesario que el fluido llegue al lugar de destino con una cierta presión, y que el sistema permita un rango de variación tanto del caudal como de la presión.

El diseño de un sistema de bombeo consiste en el cálculo y/o selección de las tuberías, bombas, válvulas, etc., que permitan cumplir las especificaciones de la forma más económica y eficiente posible.

De todas formas, aunque el dinero suele ser una parte muy importante al final de un diseño, para que esté correctamente realizado es necesario contemplar otros aspectos como la seguridad, fiabilidad, facilidad de mantenimiento, impacto ambiental y otros factores humanos, que así y como en muchos casos queda fuera del ámbito del presente estudio.

En cuanto a la operación de un sistema de bombeo, hay que tener en cuenta los sistemas de regulación y control que permitan obtener el caudal y la presión deseados, así como minimizar los problemas de cavitación, inestabilidades y transitorios que se puedan producir.

Este trabajo especial de grado presenta una evaluación técnica y posterior análisis de la red de tuberías que conforman el sistema de almacenamiento, manejo y suministro de combustible líquido de la planta Ampliación Tocoa del complejo generador Josefa Joaquina Sánchez Bastidas, operado por La Electricidad de Caracas (EDC), ubicada en la parroquia Catia La Mar del estado Vargas.

Las unidades de Tocoa se diseñaron para quemar gas, debido a que para ese tiempo la cantidad de gas existente en el país era lo suficiente para mantener trabajando la planta a plena carga sin problemas, sin embargo se instaló un sistema de combustible líquido (fueloil), solo en caso de emergencia, con el pasar de los años, la reserva y disposición de gas en el país disminuyó, lo cual trajo como consecuencia su racionamiento, esto a su vez hizo que se utilizara con mayor frecuencia el fueloil en planta, pasando a ser el combustible de trabajo diario. Y como era de esperar se

era de esperar se produjeron cambios en el sistema instalado tanto en la operación como en el mantenimiento mismo.

Los cambios fueron: aumento del número de calentadores de fueloil, aumento en el número de bombas de combustible y aumento de la temperatura del vapor empleado en los calentadores.

Como ya se indico en Ampliación Tocoa se utiliza gas natural (gas metano) y fueloil número 6 (también llamado bunker c o combustible residual pesado) como combustible, por ello y para disponer correctamente del combustible líquido existen las facilidades necesarias, entiéndase tanques, líneas de tuberías, bombas, intercambiadores de calor, válvulas y demás accesorios, los cuales permiten el funcionamiento y operación del sistema, todo en función de cumplir con los requisitos de la planta y permitir el correcto funcionamiento de las misma.

De aquí la importancia que tiene el sistema de suministro de combustible para el funcionamiento de la planta y su principal proceso la transformación/ producción de energía eléctrica.

Sumado a lo expuesto anteriormente y debido a que en los últimos años el consumo de fueloil ha aumentado debido principalmente al aumento de consumo de gas natural y la disminución de la oferta del mismo a la planta, por lo que se ven en la necesidad de aumentar el consumo de fueloil y garantizar la cuota de producción de energía que se requiere para alimentar a la región capital.

Es por ello que se plantea realizar un estudio técnico del sistema, esto nos permitiría comprender su funcionamiento, determinar los parámetros de operación y realizar propuestas para optimizar y de ser posible mejorar el sistema.

En este trabajo se desarrollan ocho capítulos, en el primero se plantea el problema de la investigación, los objetivos y los alcances que se deben cumplir y las limitaciones que se toman en cuenta para el cumplimiento de los objetivos.

En el segundo capítulo se desarrollan los fundamentos teóricos que sustentan este trabajo y los conceptos asociados con la metodología aplicada para la evaluación del sistema.

En el tercer capítulo se realiza una descripción del sistema de combustible y se exponen a detalle los modos de operación del mismo.

En el cuarto capítulo se muestran los resultados de los levantamientos y recopilación de información realizada en la planta, se detallan los componentes, equipos y parámetros de operación del sistema, las características operacionales, de diseño y funcionamiento de los equipos, las características del combustible fueloil. En este mismo capítulo se detallan y explican los casos y redes objeto del presente estudio.

En el quinto capítulo se detalla la metodología a seguir para realizar los cálculos de las redes propuestas según los casos de operación del sistema de combustible. En este capítulo encontramos la memoria de cálculo para la obtención de los longitudes equivalentes por caso de estudio propuesto.

En el sexto capítulo se presentan las propuestas o alternativas de mejora y optimización del sistema de combustible, según los requisitos y necesidades planteadas como fundamento principal para la realización del presente trabajo.

En el séptimo capítulo se muestran los resultados de los cálculos y evaluación de las redes propuestas de cálculo por el método de Hardy-Cross con Newton-Raphson, también se presentan los resultados de la memoria de cálculo para la obtención de la longitud equivalente. Así como los resultados asociados a los cálculos realizados con la data de Sistema de Control Distribuido DCS, y del mismo modo los cálculos realizados en base a los datos de los reportes diarios de operación del sistema de combustible de la planta.

Dichos resultados son necesarios para realizar el análisis y evaluar el sistema de combustible. Hacia el final del capítulo se realiza un análisis detallado de los resultados obtenidos y se concluye en base a estos.

En el octavo y último capítulo se realiza un breve análisis económico de las propuestas de mejora del sistema, producto de este análisis se toma la decisión de cual propuesta es la más viable tanto técnica como económicamente.

Finalmente se concluye y dan las recomendaciones del presente trabajo.

CAPÍTULO I
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

La planta Ampliación Tocoa perteneciente al conjunto generador Josefa Joaquina Sánchez Bastidas, está en capacidad de utilizar dos tipos de combustible: gas natural y fueloil número 6, en esta planta y durante el proceso de producción ininterrumpida de energía eléctrica las calderas están en capacidad de quemar ambos combustibles al mismo tiempo.

Se dispone diariamente de una cantidad limitada gas para el consumo del conjunto de plantas generadoras propiedad de la EDC, esto incluye las tres plantas del complejo generador Josefa Joaquina Sánchez Bastidas en Catia La Mar (Arrecife, Tocoa y Ampliación Tocoa) y la planta Oscar Augusto Machado (OAM) ubicada en el kilómetro 8 de la carretera panamericana. Las plantas OAM, Arrecife y Tocoa consumen únicamente gas, el restante de gas queda a disposición de Ampliación Tocoa, luego de que se consume esa cantidad de gas la planta debe seguir produciendo energía, por lo que queda consumiendo combustible líquido.

Ampliación Tocoa utiliza los recursos según la demanda energética a cubrir tomando en cuenta las horas de máxima demanda (picos de máxima demanda energética durante el día) y por ello es necesario disponer del combustible rápida y eficientemente para poder seguir cubriendo la demanda energética. Esto implica que el consumo de fueloil no es constante y depende más de las demandas de energía del sistema y de cómo los operadores de la planta distribuyan los recursos (gas y/o fueloil) en las distintas unidades.

Por ello no es posible decir que todos los días se emplea la misma cantidad de gas y de fueloil que los días anteriores, o que la tendencia se mantiene. Tomando por ejemplo el día 24 de enero del 2008, en este día al final de la jornada se contabilizó en la unidad generadora número 9 un consumo de 363,52 toneladas de combustible líquido y 148062,4 metros cúbicos de gas natural.

Según los boletines mensuales de OPSIS (Oficina de Operación de Sistemas Interconectados), para la planta Ampliación Tocoa que comprende la unidades generadoras números 7, 8 y 9, se observa que el consumo total de gas para el año

2007 fue de 1.440 millones de metros cúbicos de gas y que el consumo total para el año 2007 en combustible líquido fue de 564 mil toneladas de fueloil.

Cada unidad posee 32 quemadores (16 a gas y 16 a fueloil), la cantidad de quemadores en servicio dependerá del porcentaje de carga del turbina es decir de la cantidad de energía que generara la turbina y esto depende directamente de la demanda energética.

Una turbina trabajando a 400 MW (86% de su capacidad) consume o requiere 96 m³ por hora de combustible líquido, con esto es necesario la operación de dos bombas de alta presión que forman parte del sistema de combustible líquido de las unidades 7, 8 y 9. Cada unidad dispone de tres bombas de alta presión, 2 de uso normal y 1 de emergencia.

Es importante mencionar que se necesita un tiempo previo a la puesta en funcionamiento total del sistema en donde se hace recircular el fueloil logrando aumentar la temperatura y así lograr el punto óptimo de funcionamiento de las bombas y de los inyectores de combustible a la caldera.

El sistema de almacenamiento y manejo de combustible líquido de la planta, comprende los tanques números 10, 4, 6 y 7, entre todos tienen una capacidad de almacenar 40.000 m³ de combustible. Actualmente se presentan problemas en las bombas del sistema al utilizar el combustible almacenado en el tanque número 7, por lo que se propone solucionar dicho problema, reduciendo daños y costos, así como la posibilidad de fallas en la planta y el suministro de energía eléctrica.

El costo actual de estos equipos y de su mantenimiento es muy alto, por esto se plantea la necesidad de reutilizar los recursos disponibles y realizar un estudio de factibilidad para la adecuación de un grupo de bombas al sistema de manejo de combustible líquido, de manera de reducir las pérdidas producidas por la falla de los equipos, permitiendo a la empresa ser más rentable y recuperar dinero.

Además, es fundamental para la empresa poder contar con sistemas alternos o de respaldo, que permitan la continuidad del servicio haciendo uso de los equipos en caso de emergencia o eventualidades.



Figura 1.1 Vista del Complejo generador Josefa Joaquina Sánchez Bastidas

Fuente: <http://maps.google.es/>

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar y optimizar el sistema de suministro de combustible líquido (fueloil) de la planta Ampliación Tacona perteneciente al conjunto generador Josefa Joaquina Sánchez Bastidas de CORPOELEC anteriormente administrado por La Electricidad de Caracas C.A. (3×460 MW)

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las características y parámetros de funcionamiento de los diferentes equipos que componen el sistema de suministro de combustible.
- Determinar los requerimientos del sistema de suministro de combustible.
- Evaluar las condiciones actuales de operación y funcionamiento de los equipos que componen el sistema de suministro de combustible líquido de la planta, los cuales son: bombas y sus respectivos motores, intercambiadores de calor, válvulas, inyectores y filtros.
- Determinar los parámetros hidráulicos relacionados con el sistema actual de suministro de combustible líquido, así como el balance de la red por medios clásicos. (Datos y cálculos)
- Realizar un análisis técnico al sistema actual de suministro de combustible líquido.
- Elaborar, formar y proponer conceptos e ideas de solución y optimización, utilizando técnicas creativas.
 - : Realizar un estudio de factibilidad técnica y económica para la utilización de una serie de bombas de desplazamiento positivo en el sistema de suministro de combustible líquido del tanque número 7.
- Realizar un estudio técnico y económico de las propuestas de mejora del sistema de combustible líquido.
- Seleccionar una propuesta de mejora en base a los criterios de técnicos, de diseño y económicos adecuados.
- Verificar y determinar que el diseño propuesto cumpla con los requerimientos de operación relacionados a los posibles cambios y mejoras del sistema de suministro de combustible líquido.
- Establecer los parámetros de operación y funcionamiento de los nuevos equipos.

1.3. ALCANCES

Debido a la importancia que supone el suministro de combustible para el proceso de obtención de energía, y a que los sistemas operen de manera satisfactoria reduciendo problemas y posibles fallas, logrando de esta manera que se incremente la rentabilidad y productividad de la planta. Los alcances que se proponen son los siguientes:

- Consultar manuales, libros, catálogos impresos o digitales, normas, relacionados con el tema.
- Realizar el estudio teórico de los componentes del sistema de combustible líquido que van desde el tanque hasta el quemador.
- Determinar las condiciones actuales de operación y funcionamiento de los siguientes equipos: bombas y sus respectivos motores, intercambiadores de calor, válvulas, quemadores y filtros; que conforman el sistema de suministro de combustible líquido (fueloil n.º 6) en la planta Ampliación Tocoa,
- Investigar acerca de las condiciones de las bombas, sus datos, características, requisitos y parámetros de funcionamiento, curva característica; así como de los motores de accionamiento de las mismas.
- Realizar el estudio global del problema de operación de las bombas.
- Analizar los aspectos técnicos y económicos de operación del sistema con el fin de poder establecer las fuentes de fallas motivadas a los cambios realizados al proyecto original.
- Proponer mejoras en base a los criterios técnicos y económicos establecidos.
- Estudiar la posibilidad de adecuación y aplicabilidad de las bombas en el sistema actual de suministro de combustible propuesto para el tanque número 7.
- Realizar un estudio económico de las propuestas.

- Realizar planos isométricos del sistema de suministro de combustible líquido desde los tanques de almacenamiento hasta los quemadores de combustible en la caldera.

1.4. LIMITACIONES

- Poca o escasa información de los parámetros originales de diseño del sistema, esto incluye los distintos equipos (bombas, calentadores, filtros, etc.) que lo conforman. Esto también es debido al tiempo que tiene la planta en funcionamiento y la larga data en tiempo de sus equipos.
- Falta de datos a nivel experimental de las pérdidas en fluidos viscosos, por lo que se reflejan las pérdidas por las tablas experimentales generadas a partir de ensayos con agua.
- Debido a diferentes modificaciones que sufrió el sistema a través del tiempo, para adaptarse a las cambiantes necesidades de la planta, no todas quedaron reflejadas a nivel técnico, de manera que en el presente trabajo y a falta de información precisa y demostrable, se realizan suposiciones en base a la experiencia de los operadores e ingenieros de la planta.
- El programa para cálculo y simulación de redes tuberías FATHOM, del cual posee licencia la EDC y fue utilizado como referencia para este trabajo, no arroja resultados confiables debido a la incompatibilidad con el fluido que se maneja y a la imposibilidad de reflejar el cambio de viscosidad del fluido producto del paso por los calentadores.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. PRINCIPIOS DE LA MECANICA DE LOS FLUIDOS

2.1.1. ECUACION DE CONTINUIDAD

Para fluidos incompresibles en régimen permanente el caudal que atraviesa una sección transversal de tubería es constante, la ecuación de continuidad queda reducida a lo siguiente:

$$Q = \int_A V \cdot dA = V_1 \cdot A_1 = V_2 \cdot A_2$$

Donde, Q es el caudal volumétrico a través de una sección de tubería, V es la velocidad promedio en la sección y A es el área de la sección transversal de tubería.

2.1.2. ECUACION DE LA ENERGIA

A partir de la ecuación del principio de conservación de la energía, para un fluido incompresible en régimen permanente en una tubería y dividiendo por la gravedad de forma que la ecuación quede en términos de altura equivalente (o energía por unidad de peso), nos queda:

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 - H_r + H_B = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2$$

Donde el termino $P/\rho g$ es la altura debida a la presión, $V^2/2g$ es la altura debida a la velocidad (o energía cinética), Z la altura geométrica, H_r es la altura total debida a las pérdidas de energía en la tubería y el termino H_B es la altura debida a la energía añadida o extraída del sistema, por ejemplo mediante una bomba añadimos energía o con una turbina extraemos energía.

Si despreciamos los términos H_r y H_B (ej. en un fluido ideal donde no hay pérdidas) de la ecuación anterior nos queda la ecuación de Bernoulli (en términos de altura), que nos dice que la energía total en un punto cualquiera de por encima de un plano horizontal arbitrario fijado como referencia, es igual a la suma de la altura geométrica, la altura debida a la presión y la altura debida a la velocidad, es decir:

$$C = \frac{P}{\rho \cdot g} + \frac{V^2}{2g} + Z$$

En esta ecuación los términos debidos a la presión y a la altura geométrica son llamados altura estática (piezométrica). El término de debido a la velocidad es llamado altura de velocidad, donde C es la constante de la ecuación de Bernoulli.

2.1.3. LINEA PIEZOMÉTRICA Y LINEA DE ENERGIA

La línea de energía resulta de unir gráficamente los puntos de altura total obtenidos de la suma de los tres términos de la ecuación de Bernoulli para diferentes puntos de un sistema, y esta denota la energía por unidad de peso que hay en un determinado punto del sistema. De la misma forma la línea piezométrica resulta de sumar solamente los términos debidos a la presión y la altura.

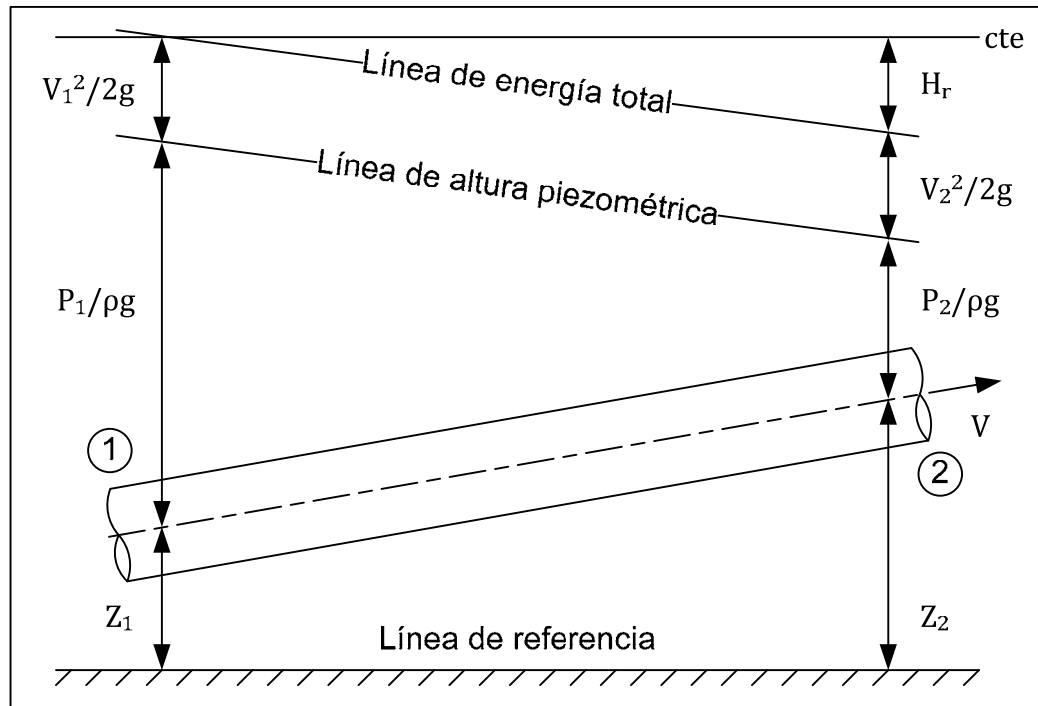


Figura 2.1 Línea piezométrica y línea de energía

(Fuente: elaboración propia)

2.2. PROPIEDADES FISICAS DE LOS FLUIDOS

2.2.1. VISCOSIDAD

La viscosidad es aquella propiedad de un fluido por virtud de la cual ofrece resistencia al corte, es decir que la viscosidad expresa la facilidad que tiene un fluido para fluir cuando se le aplica una fuerza externa. El coeficiente de viscosidad absoluta, o simplemente la viscosidad absoluta de un fluido, es una medida de su resistencia al deslizamiento o a sufrir deformaciones internas.

La ley de viscosidad de Newton afirma que dada una rapidez de deformación angular en el fluido, el esfuerzo cortante es directamente proporcional a la viscosidad.

Por otro lado la viscosidad de un gas aumenta con la temperatura, pero la viscosidad de un líquido disminuye con la temperatura.

Viscosidad absoluta o dinámica: La unidad de viscosidad dinámica en el sistema internacional (SI) es el pascal segundo (Pa s) o también newton segundo por metro cuadrado (N s/m^2), o sea kilogramo por metro segundo (kg/m s).

El poise es la unidad correspondiente en el sistema CGS. El submúltiplo centipoise (cP), 10^{-2} poises, es la unidad más utilizada para expresar la viscosidad dinámica. La relación entre el pascal segundo y el centipoise es:

$$1 \text{ Pa s} = 1 \text{ N s/m}^2 = 1 \text{ kg/(m.s)} = 10^3 \text{ cP}; \quad 1 \text{ cP} = 10^{-3} \text{ Pa s}$$

Viscosidad cinemática: Es el cociente entre la viscosidad dinámica y la densidad. En el sistema internacional (SI) la unidad de viscosidad cinemática es el metro cuadrado por segundo (m^2/s). La unidad CGS correspondiente es el stoke (St), con dimensiones de centímetro cuadrado por segundo y el centistoke (cSt), 10^{-2} stokes, que es el submúltiplo más utilizado.

$$1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^6 \text{ cSt} \quad 1 \text{ cSt} = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Visc. cinemática} = \frac{\text{Visc. absoluta}}{\text{densidad}} \rightarrow \nu (\text{centistokes}) = \frac{\mu (\text{centipoise})}{\rho (\text{gramos/cm}^3)}$$

El efecto de la presión sobre la viscosidad de los líquidos y la de los gases perfectos es tan pequeño que no tiene interés práctico en la mayor parte de problemas para flujo de fluidos.

2.2.2. DENSIDAD

La densidad de un líquido es la cantidad de masa del líquido contenida en una unidad de volumen. Es decir la densidad de una sustancia es su masa por unidad de volumen. La unidad de densidad en el SI es el kilogramo por metro cúbico y se denota por ρ .

$$\rho = \frac{m \text{ (kg)}}{Vol \text{ (m}^3\text{)}}$$

La densidad es función de la temperatura y de la presión. Con la salvedad de que la variación de la densidad de los líquidos por efectos de la presión es muy pequeña, salvo a muy altas presiones, pero aun así y para efectos prácticos de este trabajo se desprecia.

La densidad relativa o gravedad específica es una medida relativa de la densidad. Como la presión tiene un efecto insignificante sobre la densidad de los líquidos, la temperatura es la única variable que se toma en cuenta para obtenerla. La densidad relativa de un líquido es la relación de su densidad a cierta temperatura, con respecto al agua a una temperatura normalizada. La temperatura usada para este propósito es usualmente 60 °F o 15,6 °C, donde la densidad del agua es 999,1 kg/m³.

$$SG = \frac{\rho \text{ (liquido @ } x \text{ temperatura)}}{\rho \text{ (agua a } 15^{\circ}\text{C)}}$$

2.2.3. VOLUMEN ESPECÍFICO

La unidad correspondiente en el sistema SI para volumen específico $\bar{v}$ que es el inverso de la densidad, es el metro cúbico por kilogramo (m³/kg).

$$\bar{v} = \frac{1}{\rho} = \frac{Vol \text{ (m}^3\text{)}}{m \text{ (kg)}}$$

2.2.4. PESO ESPECÍFICO

El peso específico es el peso por unidad de volumen.

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

El peso específico es función de la temperatura y de la presión aunque en los líquidos no varía prácticamente con esta última.

2.2.5. PRESION DE VAPOR

Los líquidos se evaporan debido a que las moléculas se escapan de la superficie del mismo. Las moléculas de vapor ejercen una presión parcial en el espacio conocida como presión de vapor. Si el espacio arriba del líquido es limitado después de un tiempo suficiente el número de moléculas de vapor que golpean la superficie del líquido y se condensan es justamente igual al número que escapa en cualquier intervalo de tiempo, dándose así el equilibrio. Ya que este fenómeno depende de la actividad molecular, que es función de la temperatura, la presión de vapor en un fluido dado depende de la temperatura y aumenta con ella. Cuando la presión arriba de un líquido es igual a la presión de vapor del líquido ocurre la ebullición.

En muchas situaciones donde ocurre el flujo de líquidos, es posible que se produzcan presiones muy bajas en ciertos sitios del sistema. Bajo tales circunstancias las presiones pueden ser iguales a la presión de vapor, o menores. Cuando ocurre esto, el líquido se evapora rápidamente, y a esto se le denomina el fenómeno de cavitación. Se forma una bolsa o cavidad de vapor en rápida expansión, que generalmente es barrida lejos de su punto de origen y penetra regiones donde la presión es mayor que la presión de vapor. La cavidad se desploma. Este crecimiento y descomposición de las burbujas de vapor afecta el desempeño operativo de bombas hidráulicas y turbinas y puede causar erosión de las partes metálicas en la región de la cavitación.

2.2.6. GRAVEDAD API

La gravedad API, es una medida de densidad que describe cuan pesado o liviano es el petróleo o productos derivados comparándolo con el agua. Si los grados API son mayores a 10, es más liviano que el agua, y por lo tanto flotaría en esta. La gravedad API es adimensional.

$$SG (60^{\circ}F/15,6^{\circ}C) = \frac{141,5}{131,5 + \text{grados API}}$$

2.3. PÉRDIDAS DE CARGA

Las pérdidas de carga en tuberías (en este caso de sección circular) se pueden dividir en dos casos:

- Las pérdidas de energía generadas por rozamiento a partir del contacto del fluido con las paredes de la tubería y por el rozamiento de las partículas del fluido entre sí, a estas las llamaremos pérdidas por fricción en la tubería (también llamadas pérdidas primarias).
- Las pérdidas que tienen lugar en las transiciones, codos, válvulas y demás accesorios de la tubería, las llamaremos pérdidas en los accesorios (son también llamadas pérdidas singulares, secundarias o menores).

2.3.1. PÉRDIDAS POR FRICCIÓN EN LA TUBERÍA

La resistencia al flujo de un líquido movido a través de una tubería resulta en la pérdida de carga o presión y es llamada fricción. Esta resistencia al flujo es debida al esfuerzo cortante en el líquido y la turbulencia que ocurre a lo largo de la pared de tubería debida a la rugosidad.

La cantidad de carga pérdida para cada sistema depende de las características del líquido que está siendo manejado, principalmente la viscosidad, así como el diámetro, longitud y rugosidad de la tubería, también se suman las pérdidas a través de válvulas, codos y demás accesorios.

La ecuación que usaremos para determinar el valor de la pérdida por fricción para diferentes condiciones es la de Darcy-Weisbach. Esta ecuación que es válida para flujo laminar y para flujo turbulento, reconoce que la fricción de la tubería depende de la rugosidad y del diámetro interno de la tubería, de la velocidad del líquido y su viscosidad. Se expresa de la siguiente manera:

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

Donde h_f es el valor de pérdida de altura por fricción en la tubería, f es el factor de fricción, L es la longitud de la tubería, V es la velocidad promedio del fluido en una sección transversal de tubería, D es el diámetro interno de la tubería y g es el valor de la aceleración de gravedad.

Con esta ecuación obtenemos el valor de la pérdida de presión debida al rozamiento y se aplica a una tubería de diámetro constante por la que pasa un fluido cuya densidad permanece razonablemente constante, a través de una tubería recta.

2.3.1.1. FLUJO LAMINAR Y FLUJO TURBULENTO

El esfuerzo cortante tiene una dependencia fundamental según el tipo de flujo laminar o turbulento. En el caso de flujo laminar el factor dominante es la viscosidad. Las diferentes capas del fluido fluyen sin mezclarse, ordenadamente. En el flujo turbulento, se origina un fuerte intercambio de masa, cantidad de movimiento y energía en el fluido, lo que da unas características especiales a este tipo de flujo.

El número de Reynolds es un parámetro adimensional que expresa la relación entre las fuerzas viscosas y las de inercia:

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

Donde V es la velocidad del fluido, D es el diámetro interno de la tubería y ν es la viscosidad cinemática.

Cuando $Re < 2000$ el flujo es normalmente laminar, y si $Re > 4000$ turbulento. Entre 2000 y 4000 existe una zona de transición, con flujo inestable.

2.3.1.2. FACTOR DE FRICCIÓN

El factor de fricción es un número adimensional que depende de la rugosidad de la superficie interior de la tubería y del número de Reynolds.

Para flujo laminar (Reynolds por debajo de 2000) la rugosidad de la superficie interior de la tubería no tiene efecto, es decir que solo depende del número de Reynolds por lo que el factor de fricción se convierte en:

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

Para flujo turbulento (Reynolds por encima de 4000) el factor de fricción es afectado por la rugosidad de la tubería y el número de Reynolds, por lo que el factor de fricción se obtiene a partir de la ecuación desarrollada por Colebrook-White.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log_{10} \left(\frac{\varepsilon_0}{3,7 \cdot D} + \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right)$$

Donde ε_0 es la rugosidad absoluta de la tubería, D es el diámetro interno de la tubería, Re es el valor del número de Reynolds y f es el factor de fricción.

La ecuación Colebrook-White tiene el inconveniente de que f no aparece de forma explícita y es necesario iterar para poder obtenerla. El valor de f puede ser obtenido a partir del diagrama desarrollado por Moody. Este grafico muestra la relación entre el factor de fricción, el número de Reynolds y la rugosidad relativa.

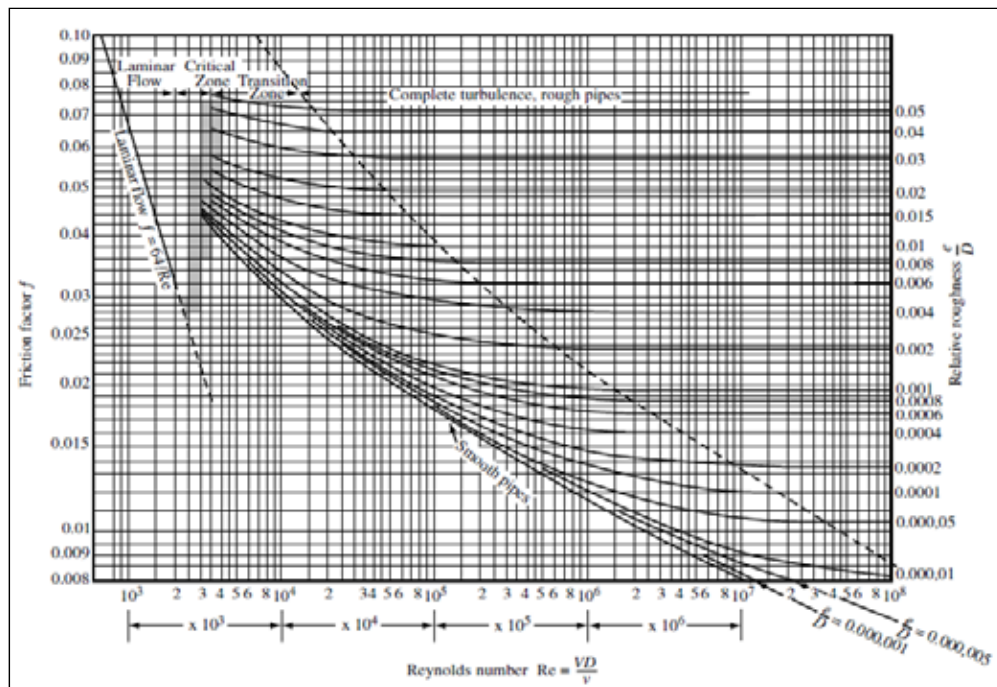


Figura 2.2 Diagrama de Moody. [6]

La rugosidad de la tubería es el parámetro crítico de la ecuación de Colebrook-White. De ser posible, debe obtenerse esta información del fabricante. A continuación en la tabla 1.1 se dan valores orientativos de la rugosidad de las tuberías en condición nueva y limpia.

Tipo de tubería - Material	ϵ_0 [mm]	ϵ_0 [in]
Acero comercial	0,045	0,0018
Concreto	0,30 – 3,0	0,012 – 0,12
Hierro galvanizado	0,15	0,006
Hierro fundido - Asfaltado	0,12	0,0048
Hierro fundido – Sin recubrimiento	0,26	0,010
Tubería drenaje (plástico, vidrio, cobre)	0,0015	0,00006

Tabla 1.1 Valores de rugosidad absoluta en tuberías comerciales. [1]

2.3.2. PÉRDIDAS EN LOS ACCESORIOS

Cualquier obstáculo en el interior tubería cambia la dirección de la corriente del fluido, lo que altera la configuración de flujo y ocasiona turbulencia, causando una pérdida de energía mayor de la que normalmente se produce en un flujo por una tubería recta.

Entonces denominamos pérdidas en los accesorios a aquellas originadas en las entradas y salidas de las tuberías, codos, válvulas, transiciones (reducciones – expansiones) y toda clase de accesorios de tubería. Estos elementos producen una perturbación de la corriente que origina remolinos y desprendimientos, que intensifican las pérdidas. Normalmente son pequeñas comparadas con las pérdidas por fricción, pero para longitudes cortas pueden ser relativamente importantes.

Si la tubería es larga, las pérdidas en los accesorios tienen poca importancia, pudiendo a veces despreciarse; o bien se tienen en cuenta al final, tomando un 5% de las pérdidas principales halladas. Si la tubería es corta y complicada (por ejemplo el flujo de gasolina y aire a través de un carburador) las pérdidas secundarias pueden jugar un papel preponderante, y pueden incluso llegar a ser despreciables en comparación con ellas las pérdidas por fricción en la tubería.

Las pérdidas secundarias se pueden calcular por dos métodos:

- Primer método: usando una ecuación y un coeficiente de pérdidas adimensional de pérdidas secundarias.
- Segundo método: por la misma ecuación de Darcy-Weisbach, sustituyendo en dicha formula la longitud de la tubería L , por la longitud equivalente L_e .

2.3.2.1. PÉRDIDAS EN LOS ACCESORIOS - PRIMER MÉTODO

El flujo por una válvula o accesorio en una línea de tubería causa también una reducción de la altura estática, que puede expresarse en función de la altura de velocidad. El coeficiente de resistencia K (adimensional) en la ecuación,

$$h_p = K \frac{V^2}{2g}$$

se define como la pérdida de altura de velocidad para una válvula o accesorio. Esta siempre asociado con el diámetro al cual se refiere la velocidad, en la mayor parte de las válvulas o accesorios las pérdidas por fricción (debido al rozamiento, rugosidad de la superficie interna de la tubería, diámetro de la tubería, velocidad, densidad y viscosidad del fluido), a lo largo de la longitud real del flujo, son mínimas comparadas con las debidas a los otros factores, como son cambio de dirección en el flujo, obstrucciones en el paso del flujo y cambios repentinos o graduales en la superficie y el contorno del paso del flujo.

Por ello el coeficiente de resistencia K se considera independiente del factor de fricción y del número de Reynolds, por lo que puede tratarse como constante para cualquier obstáculo dado en un sistema de tuberías bajo cualquier condición de flujo, incluido el laminar.

La misma pérdida para una tubería recta se expresa por la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$h_p = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}, \text{ de donde resulta: } K = f \frac{L}{D}$$

El coeficiente de resistencia K, para una línea dada de válvulas o accesorios, tiende a variar con la medida de la misma (diámetro de la tubería, medida del accesorio), en condiciones de flujo que den un factor de fricción constante y que el termino L/D tiende hacia una constante para las diversas medidas de una cierta línea de válvulas o accesorios en las mismas condiciones de flujo.

En el anexo del presente trabajo se muestran los valores experimentales de los coeficientes de resistencia K para cada tipo de válvula y accesorio mostrado. (Tomados bibliografía consultada [1] y [2]).

Las pérdidas por fricción en la tubería tienen lugar en los tramos rectos de tuberías, pudiendo ser estas últimas de diversos diámetros, pero todas se expresan por medio de la ecuación de Darcy-Weisbach: $h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$

Las pérdidas en los accesorios tienen lugar en los distintos accesorios, pero sin importar el tipo de accesorio todas se expresan por la ecuación: $h_p = K \frac{V^2}{2g}$

Entonces las pérdidas totales de altura que denotamos como H_r en un tramo de tuberías de sección constante, serán la suma de las pérdidas de altura por fricción en las tuberías rectas más la sumatoria de las pérdidas de altura asociadas a los accesorios presentes en las mismas.

$$H_r = \sum h_f + \sum h_p = \left(K_1 + K_2 + K_3 + \dots + K_n + f \frac{L}{D} \right) \frac{V^2}{2g} = K_t \frac{V^2}{2g}$$

El coeficiente total de resistencia K_t queda:

$$K_t = K_1 + K_2 + K_3 + \dots + K_n + f \frac{L}{D}$$

Si los tramos de tubería tienen diámetros diferentes, utilizamos la ecuación de continuidad, nos queda:

$$K_t = \left[K_1 + f_1 \frac{L_1}{D_1} + \left(K_2 + f_2 \frac{L_2}{D_2} \right) \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 + \left(K_3 + f_3 \frac{L_3}{D_3} \right) \left(\frac{D_1}{D_3} \right)^2 + \dots \right] \frac{V_1^2}{2g}$$

$$Q = V \cdot A \quad Q_1 = Q_2 \rightarrow V_1 A_1 = V_2 A_2$$

$$V_2^2 = V_1^2 \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 = V_1^2 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2$$

2.3.2.2. PÉRDIDAS EN LOS ACCESORIOS - SEGUNDO MÉTODO

Este método consiste en considerar las pérdidas secundarias como longitudes equivalentes, es decir en longitudes que llamamos equivalentes de una sección de tubería del mismo diámetro que produciría las mismas pérdidas de carga que los accesorios en cuestión. Por lo que cada accesorio será sustituido por su longitud de tubería equivalente, que denotamos como L_e , de la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$h_p = f \frac{L_e}{D} \frac{V^2}{2g}; \text{ por analogía } h_p = K \frac{V^2}{2g}; \text{ de donde } K = f \frac{L_e}{D} \text{ y } L_e = \frac{K \cdot D}{f}$$

Donde h_p es la pérdida expresada en unidad de longitud asociada a los accesorios, f es el factor de fricción, K es el coeficiente de resistencia que depende del diseño, tamaño y tipo de accesorio, D es el diámetro interno de la tubería, L_e es la pérdida por fricción en los accesorios de tuberías en términos de la longitud equivalente de tubería recta, V es la velocidad promedio del fluido en una sección transversal de tubería y g es el valor de la aceleración de gravedad.

$$\text{La ecuación de pérdidas totales nos queda: } H_r = f \frac{(L + \sum L_e)}{D} \frac{V^2}{2g}$$

Donde, H_r es la suma de las pérdidas totales en la tubería, f es el factor de fricción, L es la longitud de tubería recta, $\sum L_e$ es la suma de todas las longitudes equivalentes de los diferentes accesorios, V es la velocidad promedio del fluido en una sección transversal de tubería.

Si los tramos de tubería tienen diámetros diferentes, utilizamos la ecuación de continuidad, nos queda:

$$\begin{aligned} H_r &= f_1 \frac{(L_1 + \sum L_{e1})}{D_1} \frac{V_1^2}{2g} + f_2 \frac{(L_2 + \sum L_{e2})}{D_2} \frac{V_2^2}{2g} + \dots \\ H_r &= f_1 \frac{(L_1 + \sum L_{e1})}{D_1} \frac{V_1^2}{2g} + f_2 \frac{(L_2 + \sum L_{e2})}{D_2} \frac{V_1^2}{2g} \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 + \dots \\ H_r &= \left[f_1 \frac{(L_1 + \sum L_{e1})}{D_1} + f_2 \frac{(L_2 + \sum L_{e2})}{D_2} \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 + \dots \right] \frac{V_1^2}{2g} \end{aligned}$$

En el anexo del presente trabajo se muestran tabulados los valores, de longitudes equivalentes para cada tipo de válvula y accesorio mostrados. Es

importante recalcar que estos valores son hallados experimentalmente y reportados en las bibliografías consultadas. (Tomados bibliografía consultada [1] y [2]).

2.4 BOMBAS DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO

Una bomba de desplazamiento positivo, consiste en una cámara en donde están colocados engranes, excéntricas, tornillos, aspas (álabes), émbolos o elementos similares accionados por la rotación relativa del eje (árbol) de propulsión y la carcasa y que no tiene válvulas separadas para admisión y descarga.

El funcionamiento de las bombas de desplazamiento se basa en el principio del desplazamiento positivo, que consiste en el movimiento de un fluido causado por la disminución de volumen de una cámara.

Las bombas de desplazamiento positivo en donde el órgano transmisor de energía tiene movimiento rotativo se denominan rotoestáticas para diferenciarlas de las rotodinámicas.

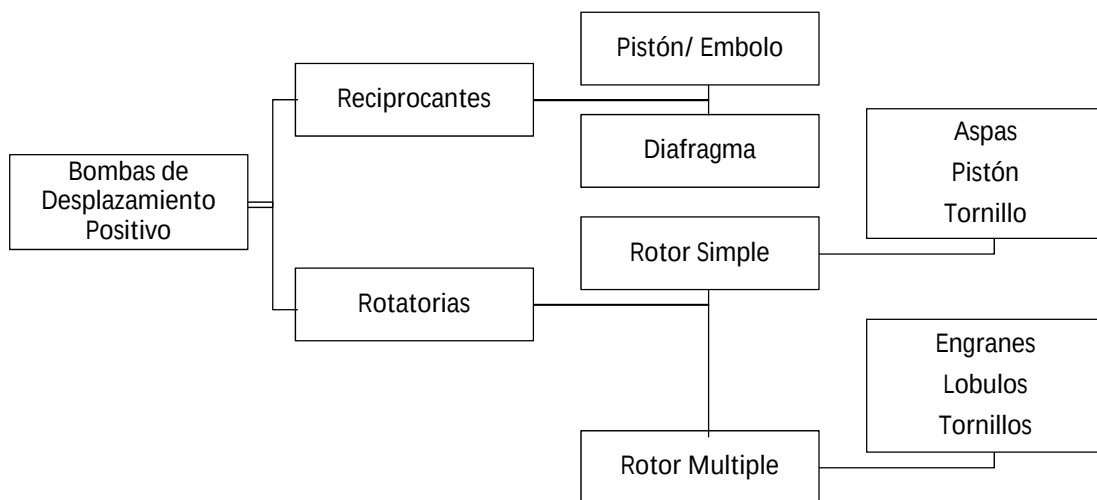


Figura 2.3 Clasificación de las bombas de desplazamiento positivo.

(Fuente [7] y elaboración propia)

En estas maquinas el intercambio de energía de fluido se hace en forma de presión, mientras que en las turbomáquinas los cambios de dirección y el valor absoluto de la velocidad marcan la pauta. Estas bombas no son cinéticas como las centrífugas y no requieren de velocidad para producir presión, pues se pueden obtener presiones altas a bajas velocidades. Esta es una de las ventajas de la bomba desplazamiento positivo en particular para manejar fluidos abrasivos y líquidos muy viscosos.

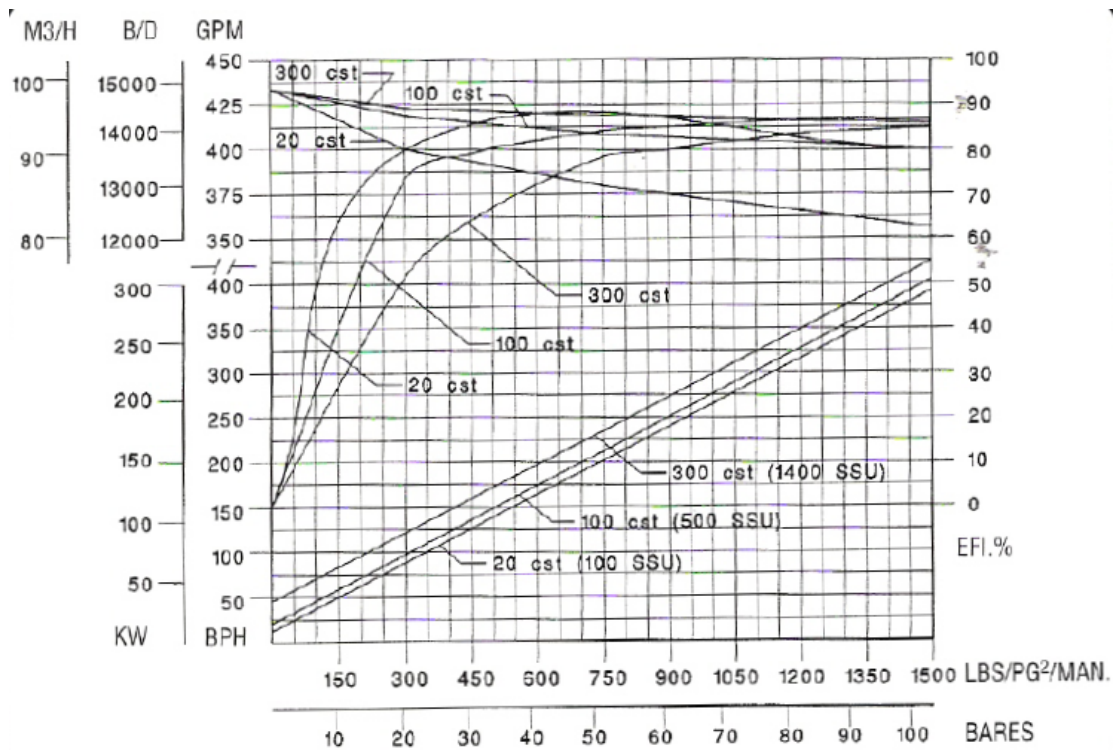


Figura 2.4 Curva característica típica de una bomba de desplazamiento positivo
(Fuente www.allweiler.com)

La curva característica o curva H-Q de una bomba de desplazamiento positivo teóricamente sería una paralela al eje H, debido a que el desplazamiento siempre será el mismo (por cambio o diferencia de volumen) y lo que puede variar es la presión de la bomba y que va a depender principalmente de la robustez de la bomba y de la potencia del motor de accionamiento.

En este tipo de bombas se denomina pérdida, llamada a veces flujo inverso, se puede definir como la diferencia entre el desplazamiento teórico de una bomba dada y la descarga real neta, este es un factor importante porque influye directamente en la descarga neta de la bomba y varía según el tipo de líquido que se maneje.

Las condiciones de la succión en las bombas rotatorias se expresan como carga neta positiva de succión o NPSH (*Net Positive Suction Head*). En estas bombas, como en cualquier otra, se requiere presión positiva en la succión para que se llenen por completo con el líquido.

Aunque muchos tipos de bombas rotatorias tendrán buen funcionamiento durante largo tiempo cuando bombean una mezcla de líquido y gas, la descarga neta de líquido se reducirá mucho si una parte del caudal dentro de la bomba es una mezcla de gas y líquido o de aire y líquido. Por ello, siempre es necesario asegurar una presión o carga adecuada de succión para que la bomba se llene por completo con líquido y funcione sin cavitación.

La carga neta positiva de succión disponible o NPSHd, es la presión total de succión disponible en el sistema en la conexión de succión de la bomba menos la presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo.

La carga neta positiva de succión requerida o NPSHr, es la presión total de succión requerida por la bomba en su conexión de succión, menos la presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo.

La NPSHd, es función del diseño del sistema y sólo se puede determinar si se conocen las características del sistema y del líquido que se va a bombear. La distribución física del sistema, el tamaño de las tuberías y otras pérdidas por fricción en las tuberías que llegan a la bomba, la elevación estática antes de la bomba, la presión de vapor en el líquido bombeado, la viscosidad y su efecto en las pérdidas por fricción en el sistema se reflejan directamente en la determinación de la NPSHd.

Por el contrario, la NPSHr, es función del diseño de la bomba y sólo se puede encontrar mediante las pruebas de la bomba. El fabricante indicará su valor.

En todo caso y al igual que en otras bombas, la NPSHd, debe ser mayor que la NPSHr, si se quiere que la bomba entregue su capacidad nominal y tenga larga duración sin problemas.

La temperatura a la cual se bombea el líquido del proceso no debe exceder del valor máximo de diseño del fabricante de la bomba. Algunas bombas tienen límites entre bajos y medianos para temperaturas de hasta de 150 °C, debido a los materiales para juntas, para las placas no metálicas de desgaste, álabes no metálicos y otras piezas o el material de la carcasa. En estas bombas es importante definir las temperaturas máxima y mínima esperadas en determinada aplicación para poder hacer cálculos exactos de la viscosidad.

En cuanto a la presión de succión y descarga son datos propios del proceso de selección de la bomba, para determinarlos se debe estudiar el diseño propuesto para conocer: la presión máxima de trabajo de la bomba y la presión diferencial máxima permisible.

La capacidad de la bomba se debe expresar para las condiciones reales de funcionamiento que incluyen el máximo y mínimo de temperatura y viscosidad. Este tipo de bomba produce flujo casi constante a una velocidad dada y sólo varía ligeramente con el aumento en la presión o en la viscosidad.

Es por ello, que se selecciona la bomba para la capacidad requerida en las peores condiciones posibles de operación respecto a las pérdidas; la capacidad adicional se obtiene con otras viscosidades, temperaturas o presiones.

La eficiencia mecánica (llamada también eficiencia de la bomba) de una bomba se define como la relación entre la potencia de salida, P_o y la potencia de entrada P_i , y en forma de ecuación es: $\eta_m = \frac{P_o}{P_i}$

BOMBAS DE TORNILLO

En la figura 2.5 se muestran dos tipos de bombas de tornillo, estas admiten un volumen específico de líquido en cada revolución y lo pasan del lado de succión al de

descarga. El volumen que entra solo depende de la forma de los elementos del sistema de bombeo.

La rata teórica de flujo solo depende de la velocidad de la bomba (rpm) por unidad de tiempo. Las bombas de tornillo suelen ser inmunes a la presión diferencial, cosa que no ocurre en las centrífugas, en las cuales ocasiona drásticos cambios.

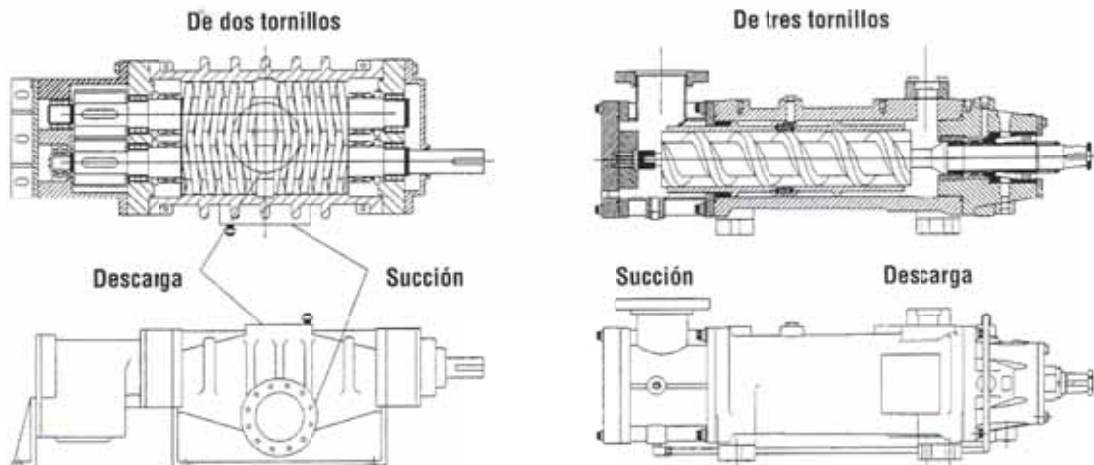


Figura 2.5 Bombas típicas de tornillo. (Fuente www.pumpfundamentals.com)

Las bombas de tornillo son de etapas múltiples para maximizar la eficiencia y minimizar los "retrocesos" internos, o sea la pérdida de flujo (ineficiencia volumétrica) que ocurre a causa de la presión diferencial, la cual hace que parte del flujo que teóricamente se debe desplazar retroceda hacia el lado de succión, a través de las holguras de la bomba. Esta suele ser la fuente principal de pérdida de eficiencia cuando se usan unidades de tornillo para bombear líquidos livianos, de baja viscosidad.

Cada vuelta (paso) del tornillo de bombeo es una verdadera etapa de presión. El objeto principal de las etapas múltiples es controlar el sucesivo aumento de presión para lograr una escala razonable de eficiencia volumétrica, a fin de que la bomba funcione eficiente y económicamente. Las etapas varían de 1 a 20, según sea la presión de operación requerida.

PUNTO DE OPERACIÓN. COMBINACIÓN CON EL SISTEMA

El caudal que circula por la bomba y, por tanto, la altura de elevación que proporciona, están condicionados por la interacción bomba-sistema. El punto de funcionamiento (Caudal Q_B y Altura H_B) vendrá dado por el corte de la curva resistente del sistema con la curva característica de la bomba. En el ejemplo de la figura 2.6 se utiliza una bomba para subir fluido del depósito inferior A al superior B . La altura que proporciona la bomba se emplea en vencer la pérdida de carga y en superar la diferencia de altura entre los depósitos.

Si la resistencia de la tubería fuese mayor (por ejemplo: una válvula en serie algo más cerrada), la bomba tendría que proporcionar más altura, y esto repercutiría en un menor caudal. Lo contrario sucede si se disminuye la resistencia.

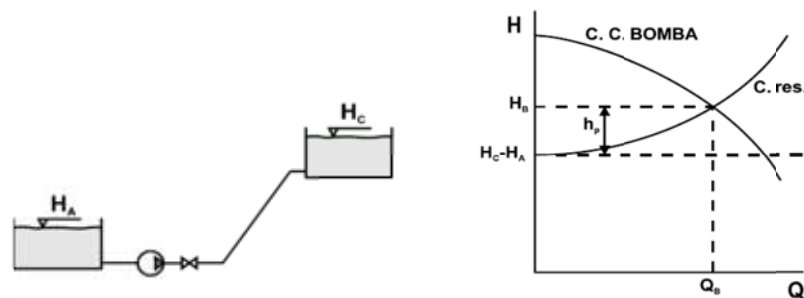


Figura 2.6 Curva característica y curva del sistema, Punto de operación
(Fuente es.scribd.com)

En este trabajo y es práctica común modelar o simular la curva característica de la bomba por un polinomio, normalmente una parábola. Esto se hace con el fin de resolver los sistemas con la ayuda del ordenador. Así, la solución del ejemplo mostrado en la figura 2.6 vendría dada por el siguiente sistema de dos ecuaciones:

$$H_1 + H_B - hp = H_2$$

$$H_B = A + B \cdot Q + C \cdot Q^2$$

Donde A , B y C son los coeficientes de ajuste de la curva característica. También sustituiremos el término hp por la expresión correspondiente, $hp = k \cdot Q^2$ y, realizar las iteraciones adecuadas, para hallar la solución del sistema de ecuaciones.

BOMBAS EN SERIE Y EN PARALELO

En ocasiones se utilizan varias bombas trabajando en serie o en paralelo sobre el mismo circuito. Esto puede resultar útil como sistema de regulación, o cuando se requieren características muy variables.

Cuando varias bombas se colocan en serie, se pueden sustituir, para el cálculo, por otra bomba hipotética que genere una altura suma de las individuales para cada caudal.

De la misma forma, varias bombas en paralelo darán una curva característica conjunta en la que se suman los caudales para cada altura.

Para colocar bombas en serie, y sobre todo en paralelo, es conveniente que sean similares, mejor aún si son idénticas, para evitar que alguna de ellas trabaje en una zona poco adecuada.

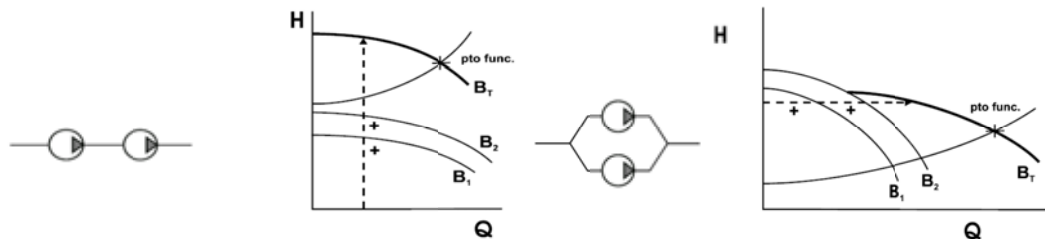


Figura 2.7 Bombas en serie y en paralelo (Fuente es.scribd.com)

Es importante mencionar que cuando en un sistema dado se colocan varias bombas en serie, el punto de funcionamiento no es la suma de las alturas que cada bomba daría si estuviese conectada al circuito ella sola. En el ejemplo de la figura 2.7 se puede ver que ninguna de las bombas que están en serie sería capaz por sí misma de vencer la diferencia de altura inicial. El conjunto de las bombas se representa por la curva característica conjunta, y ésta tendrá su punto de corte con la curva resistente, que no tiene nada que ver con el funcionamiento de cada bomba en solitario con el circuito.

En el caso de bombas en paralelo sucede algo similar, una sola bomba no es capaz de suministrar el caudal requerido, por lo que se colocan en paralelo.

2.5 CÁLCULO DE REDES DE TUBERÍAS

En estos problemas las variables fundamentales son el caudal, la pérdida de carga y el diámetro de la tubería. La solución de estos consiste en calcular una de ellas conociendo las otras dos.

A medida que el sistema es más complejo (tiene más nodos, tuberías, codos y accesorios, etc.) la dificultad aumenta, pero no de forma lineal sino cuadrática, al igual que los sistemas de ecuaciones no lineales que hay que plantear. Para estos casos aplican métodos iterativos de resolución, estos métodos son adecuados para la resolución con asistencia de la computadora.

En el fondo estos métodos son distintas formas de resolver un sistema de ecuaciones, en el que las incógnitas son el caudal por cada tubería y las alturas en los extremos de la tubería, o la pérdida de carga en ella.

Los dos principios básicos, sobre la cual se desarrolla todo el análisis de redes, son:

- Conservación de la masa, o principio de continuidad.
- El principio de trabajo y energía, incluida la ecuación de Darcy-Weisbach, para definir la relación entre la pérdida de carga y la descarga en una tubería.

Las ecuaciones que se desarrollan por el principio de continuidad las llamaremos ecuaciones de continuidad en los nodos, y aquellas que se basan en el principio de trabajo y energía principio se llaman ecuaciones de energía de lazo. El número de estas ecuaciones que constituye un sistema de ecuaciones no redundante se relaciona directamente con las relaciones fundamentales entre el número de tuberías, el número de nodos y el número de lazos independientes que se presentan en las redes de tuberías ramificadas y en los lazos.

Las ecuaciones a resolver son la continuidad en los nudos (uniones de tuberías): $\sum Q = 0$, y la pérdida de carga en las tuberías: $H_r = H_i - H_j = k \cdot Q^2$

Es importante mencionar que la resistencia de la tubería k , no es del todo constante, sino que depende del número de Reynolds (Re). Aunque al plantear las

fórmulas se va a considerar como una constante, se corregirá en las sucesivas iteraciones.

En la definición de estas relaciones NP denotará el número de tuberías en la red, NJ denota el número de uniones o nodos en la red, y NL indicará el número de lazos en torno al cual ecuaciones independientes pueden ser escritas.

Los lazos que comienzan en una fuente y terminan en otra fuente a se llaman pseudolazos, es decir, estos lazos no cierran sobre si mismos. Los pseudolazos ya están enumerados como parte de NL, y son iguales al número de fuentes de suministro menos uno. En la formación de pseudolazos todas las fuentes de suministro deben ser situadas en el extremo de un pseudolazos. En general, es posible formar más bucles que son necesaria para producir un conjunto de ecuaciones independientes. A medida que cada nuevo bucle se forma, ver que a al menos un tubo en el bucle de nuevo no es una parte de cualquier bucle anterior; de esta manera la formación de bucles redundantes por lo general puede ser evitado. Para los dispositivos especiales, tales como reducción de la presión válvulas, esta regla de experiencia debe ser ligeramente modificado, como se describirá más adelante.

Condiciones de contorno:

- La altura en los depósitos permanece siempre constante, sea cual sea el caudal que entre o salga.
- Los caudales ya conocidos y fijos que salen de un nodo también permanecen constantes independientemente de la altura del nodo.

Convenio de signos:

- H_i : altura del nodo i
- H_j : altura del nodo j
- Q_{ij} : caudal por la tubería del nudo i al j (positivo si va en la dirección $i-j$)

MÉTODO DE MALLAS O HARDY-CROSS

Este método se basa en suponer unos caudales e iterar hasta conseguir que se ajusten las pérdidas de carga. La ecuación que se va a forzar es que la suma de las pérdidas de carga alrededor de la llamada malla o camino cerrado, dicha ecuación es nula, es decir igual a cero: $\sum_{malla} H_r = 0$ (las pérdidas son cero en una malla)

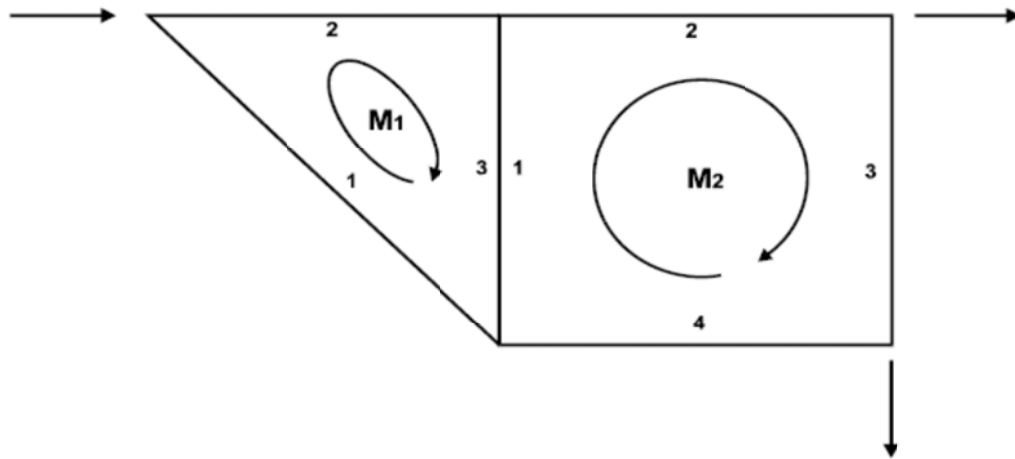


Figura 2.8 Ejemplo de un sistema para el calculo (Elaboración propia)

Para comenzar se divide la red en mallas cerradas, de forma que todas las tuberías formen parte al menos de una malla. Si alguna tubería no se puede encerrar en una malla deberá calcularse aparte.

Se asigna un número a las tuberías de cada malla, y un sentido positivo arbitrario también a cada malla (véase la figura 2.8). Las tuberías se conocen por dos subíndices: el primero corresponde a la malla, y el segundo al número de la tubería dentro de la malla.

El caudal es positivo si tiene la misma dirección que el sentido positivo de la malla. Así se aseguran los signos adecuados en la sumatoria de H_r (A.8).

Puede haber tuberías que tengan no sólo varios nombres (números) sino diferentes sentidos. Debe coincidir entonces el módulo del caudal. Por ejemplo, en la figura 2.8 se cumple: $Q_{13} = -Q_{21}$.

ECUACIONES

Como ya se indico las ecuaciones que se pueden plantear en un sistema de bombeo son las de continuidad en los nudos y las de pérdida de carga:

$$\sum Q = 0; \quad H_r = k \cdot Q^2 \pm HB$$

Las variables de altura H_r se eliminan sumando las pérdidas de carga en mallas cerradas y resulta un sistema con sólo los caudales como incógnitas:

$$\sum_{nudo} Q = 0; \quad \sum_{malla} k \cdot Q^2 = 0$$

En caso de existir alguna bomba, hay que tener en cuenta su dirección: (-) si coincide con la dirección de la malla y (+) al contrario.

HB depende del caudal, pero como aquí es un dato del cálculo (tenemos las curvas de las bombas).

MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON

La idea de fondo consiste en plantear el sistema de ecuaciones global del método de nudos, y resolverlo por medio del método de Newton-Raphson para sistemas de ecuaciones no lineales.

El método de Newton-Raphson permite iterativamente, determinar un mejor estimado de la raíz de una función determinada $F(x)$, por aproximación de formulas de recurrencia.

Para nuestro caso la función es del tipo:

$$Q(m+1) = Q(m) - F(Q(m)) / \frac{dF(Q(m))}{dQ(m)} [1]$$

en donde el índice entre paréntesis indica el número de iteraciones. Esta expresión permite una convergencia cuadrática, Para un sistema de ecuaciones simultaneas (lineales o no lineales), nos queda:

$$Q(m+1) = Q(m) - \frac{F(Q(m))}{D}$$

$$Q(m+1) = Q(m) - D^{-1} \cdot F(Q(m)) [2]$$

donde D^{-1} es el Jacobiano, es decir:

$$Q = \begin{pmatrix} Q_1 \\ \vdots \\ Q_n \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_n \end{pmatrix}, \quad D = \begin{pmatrix} \frac{dF_1}{dQ_1} & \dots & \frac{dF_1}{dQ_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{dF_n}{dQ_1} & \dots & \frac{dF_n}{dQ_n} \end{pmatrix}$$

Transformando la ecuación [2], por medio de un cambio de variable:

$$D^{-1} \cdot F = Z \rightarrow DZ = F \quad [3], \text{ se transforma en: } Q(m) - Z$$

nos queda:

$$\begin{pmatrix} \frac{dF_1}{dQ_1} & \dots & \frac{dF_1}{dQ_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{dF_n}{dQ_1} & \dots & \frac{dF_n}{dQ_n} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Z_1 \\ \vdots \\ Z_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_n \end{pmatrix}$$

con la que se calcula $Z_1, \dots, Z_n$. Finalmente determinamos una mejor aproximación.

PROCEDIMIENTO

1. Se plantean las ecuaciones de perdidas en los circuitos cerrados con o sin pseudolazos (I ecuaciones).
2. Luego se plantean las ecuaciones de continuidad en los nodos, de esta forma se obtienen las Q_i ecuaciones.
3. Al igualarse a cero se obtienen las ecuaciones F.
4. Se determina el Jacobiano: $D = \begin{bmatrix} F'_1 & F'_n \\ I'_1 & I'_n \end{bmatrix}$
5. Se asumen los caudales de inicialización y se sustituyen en los vectores y matrices F y D.
6. Se calculan las $Z_1, \dots, Z_n$, por medio de la ecuación [3]
7. De la ecuación [4] se calculan $Q_1(m), \dots, Q_n(m)$
8. Se comparan con las Q iniciales y se repite el proceso, pero ahora con los Q obtenidos, hasta obtener un error minimo.

CAPÍTULO III
PRESENTACIÓN DEL SISTEMA DE COMBUSTIBLE

3.1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE COMBUSTIBLE

3.1.1. PROPÓSITO DEL SISTEMA

El sistema de transferencia y almacenamiento está diseñado para satisfacer los siguientes requisitos:

1. Para transferir fueloil desde el tanquero hasta los tanques de almacenamiento.
2. Tener capacidad de almacenamiento que permita autonomía de la planta para las unidades 7, 8 y 9.
3. Para alimentar las bombas de alta presión de las calderas 7, 8 y 9 con fueloil en las condiciones de requeridas por el fabricante de la caldera (Mitsubishi).

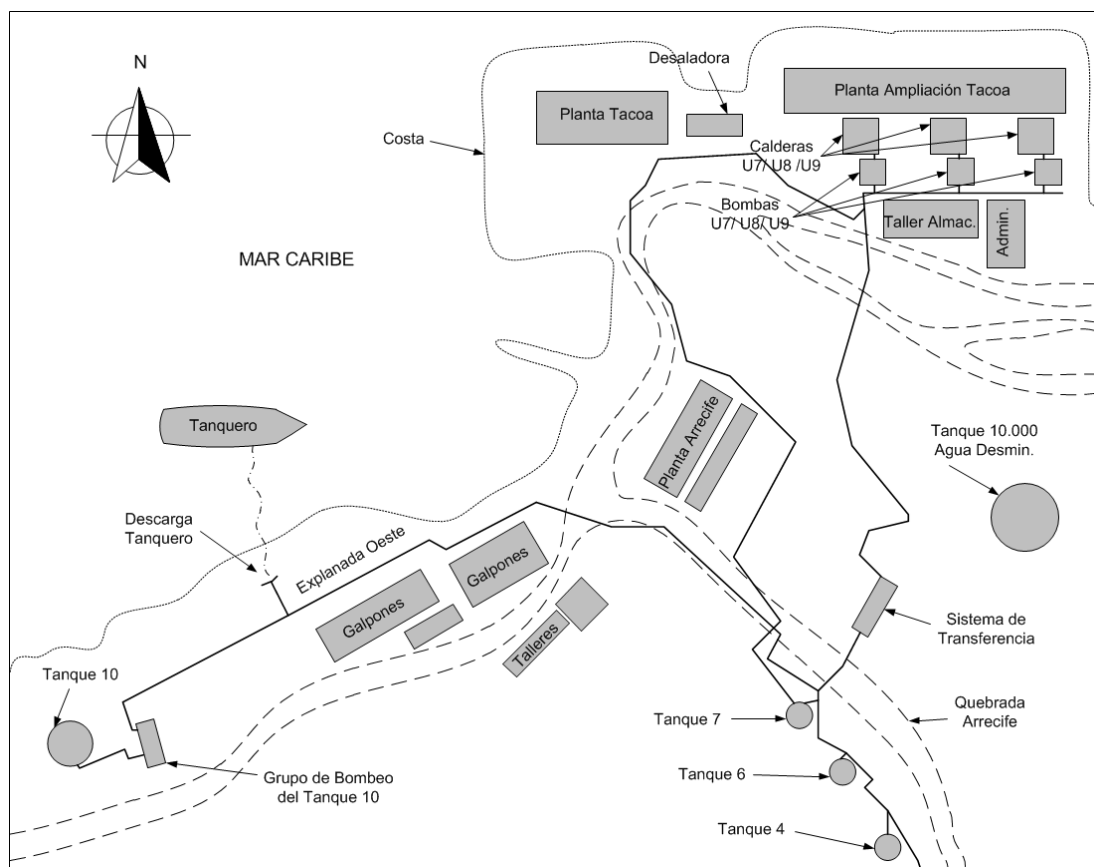


Figura 3.1 Esquema General del Complejo Generador Josefa Joaquina Sánchez Bastidas

3.1.2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema de combustible líquido está formado básicamente por los siguientes elementos:

3.1.2.1. TANQUES 4, 6, 7 Y 10.

En sistemas de combustibles pesados, cuando la distancia es considerable entre el tanque de almacenamiento y el punto de utilización, es práctico la instalación de un tanque diario cerca de la caldera, entre las ventajas se encuentran: la eliminación de un largo retorno de los quemadores para las líneas de regreso al tanque de almacenamiento.

Los tanques números 4, 6, 7 y 10 son los tanques de almacenamiento de combustible en funcionamiento de la planta, el tanque 10 está más alejado de las calderas y es utilizado para la recepción del combustible suministrado por los buques tanqueros, los tanques 4, 6 y 7 son utilizados como tanques diarios, ya que por estar más cerca de la planta se disminuye la distancia entre los tanques y las calderas y también se descarta la posibilidad de un largo retorno.

Los tanques 4 y 6 poseen una línea para el suministro y el retorno del combustible del grupo de bombeo de transferencia (ubicado en el nivel 26), una línea para el llenado que viene desde la explanada oeste, en donde conecta con las mangueras de conexión con el tanquero y con la línea de descarga del tanque 10, lo que permite trasegar combustible del tanque 10 a los tanques diarios, así como también trasegar directamente del tanquero a los tanques diarios.

El tanque 7 posee una línea de suministro o descarga hacia las calderas por medio de la gravedad y una línea de llenado que viene de la explanada oeste en donde está la conexión con las mangueras submarinas y el tanque 10.

Cada uno de los tanques diarios tiene una capacidad de aproximadamente 5.000 toneladas, están dispuestos a un lado de la quebrada arrecife, rodeado por un talud de tierra y concreto que contendría el volumen almacenado de dichos tanques en

caso de derrame, de dichos tanques el único tanque que posee sistema contra incendio es el número 4.

El tanque 10 tiene una capacidad de aproximadamente 25.000 toneladas, posee sistema contra incendio y está ubicado en la zona más al oeste del complejo, rodeado por un talud de tierra y concreto que almacenaría una y media veces el volumen del tanque en caso de derrame. La línea de llenado de este tanque viene desde el punto de conexión con las mangueras submarinas; tiene una línea de recirculación para evitar la concentración de sólidos; tres líneas de drenaje de aguas aceitosas y tres líneas de suministro hacia el sistema de bombeo que posee el tanque; no tiene retorno hacia el tanque sino a la succión de las bombas.

3.1.2.2. SISTEMA DE BOMBEO TANQUE 10.

El sistema está constituido principalmente por 4 bombas de refuerzo o booster, 4 pares de filtros dúplex (ubicados en la descarga de cada bomba), 4 filtros tipo cono (colocados en el interior de la tubería y en la succión de cada bomba), 2 pares de válvulas reguladoras de presión dispuestas en paralelo (también llamada configuración en cascada) entre el colector de succión y descarga de las bombas, un tanque para lavar los filtros y depositar los residuos del lavado, y dos calentadores de vapor que se encuentran en el nivel +26 (llamado de esa manera por estar a 26 metros sobre el nivel mar, al nombrarlo también hacemos referencia la sistema de transferencia) cuyo vapor proviene de los colectores de 25 kgf/cm² de las unidades 7, 8 y 9 mantiene la temperatura a 65 °C.

La función de este grupo de bombeo es hacer posible el trasegado del combustible almacenado en el tanque 10 hacia los tanque diarios.

Su diseño admite que en caso de ser necesario sea capaz de suministrar combustible (del tanque 10) a las calderas con los valores de presión y temperatura requeridos para la operación de las mismas. Para este caso el sistema cuenta con un retorno de combustible no quemado hacia la succión de las bombas del mismo tanque.

3.1.2.3. SISTEMA DE BOMBEO DE TRANSFERENCIA (NIVEL +26).

Este sistema está constituido principalmente por 4 bombas de refuerzo o “*booster*”, 4 pares de filtros dúplex (colocados en la succión de cada bomba), una válvula de control que regula la presión a la salida de las bombas y un par de calentadores de vapor, cuyo vapor proveniente de los colectores de 25 kgf/cm² de las calderas 7, 8 y 9 que mantienen la temperatura a 65 °C.

Su función principal es hacer posible el suministro del combustible proveniente de los tanques diarios (tanques 4 y 6) hasta las calderas, con los valores de presión y temperatura necesarios para la operación de las mismas.

Los tanques no tienen calentadores internos, por lo que la temperatura del combustible almacenado es de 30 °C (viscosidad 3.300 cSt).

Cada bomba tiene la capacidad suficiente (140 m³/h) para cubrir los requerimientos de combustible de una caldera (2 x 58 m³/h).

Las válvulas de control neumático están localizadas cerca de las bombas y mantienen la presión a la descarga de las bombas entre 10 y 12 kgf/cm².

Es necesario mantener una bomba adicional en operación para asegurar el flujo suficiente a las calderas, aun cuando una de las bombas de la caldera deje de funcionar.

La válvula de control reguladora de presión FU-CV-102 esta dimensionada para un caudal de 2 x 140 m³/h, de manera que la presión requerida puede mantenerse en caso de que se interrumpa el suministro a una caldera. La válvula está conectada con otra más pequeña en paralelo, que controla los cambios de presión ocasionados por variaciones menores de flujo.

El exceso de caudal se transfiere por una línea que conduce el total de fueloil desviado hasta la recirculación formada por una larga línea de tuberías y una válvula de paso en las cercanías del tanque número 4, con la finalidad de que el circuito de recirculación contenga un máximo de volumen de combustible.

El combustible que retorna no está caliente y no reingresa al tanque.

3.1.2.4. SISTEMA DE GRAVEDAD.

El combustible almacenado en el tanque número 7 (nivel 27) se transfiere a la estación de bombeo de alta presión de la caldera en Ampliación Tacoa por gravedad.

Está conformado por una línea de tubería que parte del tanque 7 y llega a la succión de las unidades 7, 8 y 9 con una presión aproximada de 3 kgf/cm².

El retorno del sistema de gravedad se realiza por medio de una línea de tubería de 10" que lleva el combustible por el largo retorno hasta la planta Tacoa, en donde se dispuso una válvula que conecta con la línea de suministro por gravedad, esto se realiza con el fin de elevar la temperatura del fueloil suministrado, con el combustible no quemado que retorna de la caldera a mayor temperatura.

Dado que la presión es baja en el retorno, se garantiza que el combustible no retorna al tanque por la línea de descarga del mismo.

3.1.2.5. SISTEMA DE COMBUSTIBLE LÍQUIDO CALDERA 7, 8 Y 9. BOMBEO DE ALTA PRESIÓN DE FUELOIL Y ATOMIZACIÓN

Cada unidad (caldera-turbina) dispone de un grupo de bombeo y calentamiento de combustible propio, esto es debido a que cada unidad es autónoma y opera según la demanda y requisitos del sistema eléctrico.

Cada uno de estos sistemas de combustible y calentamiento posee los siguientes componentes principales:

- Dos (2) válvulas esféricas de tres (3) pasos accionadas por un motor, una para la línea de suministro y otra para la línea de retorno de combustible, estas válvulas son usadas para seleccionar la fuente y retorno del combustible, es decir cambiar del fueloil que es suministrado y retornado por el sistema de transferencia al que es entregado y retorna por el sistema de gravedad (también usada para el suministro por tanque 10) y viceversa.
- Un (1) filtro de combustible tipo dúplex de cesta dispuesto a la succión de las bombas de alta presión de la caldera.

- Tres (3) bombas de combustible de alta presión tipo espiral, dos (2) de uso normal y una (1) de emergencia (arranca automáticamente en caso de disparo de la bomba en operación), que elevan la presión del fluido para el correcto funcionamiento de los quemadores.
- Dos (2) calentadores de combustible que elevan y mantienen la temperatura del fluido, procurando el valor de viscosidad requerido por los mecanismos de ajuste de flujo y temperatura de los quemadores.
- Medidores de flujo para el monitoreo y control del combustible en la caldera.
- Válvula de control de presión de descarga de la bomba de combustible de alta presión.
- Válvula de control de flujo, controla y mantiene el flujo de alimentación de combustible, para satisfacer la demanda correspondiente a la carga de la caldera y a la relación de mezclas de los combustibles.
- Válvula de cierre en caso de peligro al detectar caída de presión en la entrada del quemador (disparo de las bombas), la válvula cierra la fuente de combustible que conduce al horno.
- Válvula esférica del quemador de fueloil para encender y apagar el quemador.
- Sistema de aditivo: es utilizado para disminuir los daños de corrosión por alta o baja temperatura, atacando el vanadio. Consiste en inyectar compuestos de magnesio o calcio en el horno de tal forma que reaccionen contra el vanadio y aumente el punto de fusión del mismo.
- Vapor de atomización: del colector de 25 kgf/cm² sale una línea que alimenta el sistema de vapor para atomización con el fin de separar el combustible en partículas con el tamaño más pequeño posible para poder ser quemado y limpiar el quemador después de ser usado. Este sistema posee una válvula reguladora de atomización y válvulas de apertura y cierre.
- Quemadores: posee un sistema de encendido de ángulo tangencial. El aire es descargado en los cuatros quemadores, en una dirección tangencial hacia un pequeño círculo imaginario en el centro generándose una turbulencia,

permitiendo una mejor distribución y aprovechamiento de la energía térmica producto de la combustión.

La presión de normal combustible en el quemador es de 18 a 20 kgf/cm² para asegurar una buena combustión del fueloil, mientras que la máxima y mínima presión de combustible en el quemador son de 25 kgf/cm² y 12 kgf/cm² respectivamente.

En la práctica una caldera a máxima carga (400 MW) operando solamente con fueloil consume aproximadamente 96 t/h ó 96.000 kg/h de combustible (6 t/h por cada quemador – 16 quemadores en total), lo que se traduce en 240 gr de combustible quemado por cada kilovatio generado (1 kW).

$$\frac{96.000 \frac{kg}{h}}{400.000 kW} = 0,24 \frac{kg}{kW.h}$$

Entonces, si consideramos un rendimiento del combustible de 0,240 kg/kW-h, la capacidad actual de almacenamiento de 40.000 m³ representaría unos 166,7 GW-h de generación, es decir, apenas unos 5,8 días de generación con toda la carga, utilizando fueloil. Por ello y en caso de falla del suministro de gas se contarían con aproximadamente 5 días a plena carga, consumiendo fueloil almacenado en los tanques.

$$\frac{40.000 m^3 \times \frac{1000 kg}{1 m^3}}{0,24 \frac{kg}{kW.h}} = 166,66 GW.h$$

$$166,67 GW.h \times \frac{1}{1,2 GW} \times \frac{1 dia}{24 h} = 5,78 dias$$

A continuación algunas aclaratorias necesarias sobre el sistema de combustible de la caldera para comprender su funcionamiento.

Válvula de tres vías

Suministro: válvula motorizada de tres (3) pasos, que selecciona el paso en la línea de suministro de combustible a la succión de las bombas de la caldera, permite elegir entre el suministro por el sistema de transferencia (lado izquierdo de la válvula) o el suministro por la línea de gravedad (lado derecho de válvula), esta última línea de tubería también sirve para el suministro desde las bombas del tanque 10.

Retorno: igualmente una válvula de tres pasos motorizada, que permite seleccionar la línea de retorno de combustible, retorno hacia el sistema de transferencia (lado izquierdo) y el retorno por el sistema de gravedad que también comunica con el retorno hacia el tanque 10 (lado derecho).

Filtros a la succión de las bombas de alta presión de combustible de la caldera

Los filtros de succión están situados antes de la succión de las bombas de fueloil, son de malla gruesa, para retener impurezas que puedan causar daños en las bombas, sin oponer mucha resistencia al paso del fueloil, que debido a su temperatura es muy viscoso.

Bombas de alta presión de combustible de la caldera

Bombas de desplazamiento positivo, del tipo doble tornillo, cuyo objetivo es elevar la presión del combustible para cumplir con los requerimientos de los quemadores y asegurar la combustión completa del fueloil en la caldera.

Válvula de calentamiento de las bombas de combustible de la caldera

Válvula de compuerta manual 100% abierta en todo momento, que desvía el flujo por la válvula de retención a la descarga de las bombas de alta presión de fueloil, es decir es un bypass de la válvula de retención (válvula check), lo que

permite el flujo de combustible en sentido contrario por la bomba a la presión de la línea del retorno (esto por supuesto solo para las bombas fuera de funcionamiento o en espera), permitiendo que el eje de la bomba gire a muy baja velocidad y se mantenga en movimiento (llamado calentamiento de la bomba) evitando así el asentamiento del fueloil en la bomba.

Válvula bypass de las bombas de alta presión de la caldera

Válvulas motorizadas y con control automático que dan el permisivo de arranque de la bomba, ajustando la presión para mejorar las condiciones de arranque de la bomba. Tanto en encendido como en parada de la bomba, trata de igualar las presiones a la descarga y succión de la bomba. Están en la línea de retorno hacia el tanque por lo tanto trabajan a la presión de retorno de combustible.

Solo abren durante el arranque de la bomba al 100%, luego cierran automáticamente. Esto es el único permisivo de las bombas, ya que el arranque de las mismas no se limita por la temperatura o la presión del combustible.

Válvula reguladora de presión de combustible de la caldera

Válvula neumática cuya función es ajustar y mantener la presión de combustible en la línea de descarga de las bombas en un valor de 30 kgf/cm², la válvula controla la presión desviando parte del flujo de combustible hacia la línea de retorno. Esta válvula opera hacia el cierre, por lo que si está completamente cerrada tengo el flujo 100% hacia los quemadores y todo ese flujo se estaría “quemando”. Este modo de operación implica una condición insegura de la maquina por lo que se enciende una segunda bomba y la válvula se ve forzada a abrir y disminuir la presión, desviando combustible por la línea de retorno para regular la presión.

No debe de pasar de 95% de cierre, ya que pierde maniobrabilidad y deja de ser confiable el manejo de la caldera. En ese momento se enciende la segunda bomba para asegurar el flujo y la presión.

Calentadores de combustible de la caldera

Intercambiadores de calor alimentados por la línea de vapor de servicio, elevan la temperatura del fueloil entre 100 y 120 °C, temperatura necesaria para reducir la viscosidad del combustible, y cumplir con el requisito del quemador, para una buena combustión del fueloil en la caldera.

Válvula reguladora de flujo de la caldera

Válvula neumática que ajusta y mantiene la presión de entrada a los quemadores en 20 kgf/cm², luego pasa a las válvulas de cierre (*stop valve*) y de allí a los quemadores.

Válvulas de calentamiento en las esquinas de la caldera

Cuando está afuera de servicio la combustión de fueloil y para mantener el mismo en “punta y caliente”, se utilizan estas válvulas que permiten la circulación del fueloil por las tuberías adyacentes o que rodean las paredes de la caldera a fin de ganar temperatura y mantenerlo en óptimas condiciones de temperatura.

Bypass de arranque de la caldera

Estas también ayudan a calentar el fueloil en la línea de gravedad, al pasar por los calentadores de alta y aprovechar al retornar por el sistema de gravedad (se une en el anillo en Tamakún con el combustible más frío que fluye por gravedad del tanque). Lo que permite que llegue el combustible a la succión de las bombas de alta presión a 55°C aproximadamente.

3.1.3. ESQUEMAS DEL SISTEMA DE COMBUSTIBLE (FUELOIL)

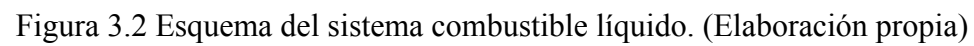
A continuación una esquematización de la red de tuberías, equipos, accesorios y demás componentes que conforman el sistema de almacenamiento, manejo (trasegado, bombeo y calentamiento) y suministro de combustible de la planta Ampliación Tocoa.

Los esquemas son de elaboración propia y fueron construidos con fines académicos y de cumplir los objetivos del presente trabajo, fueron elaborados por medio del programa de dibujo AutoCad.

En la Figura 3.2, presentamos el esquema general de la planta, incluyendo el suministro de combustible por parte de los buques tanqueros, en el mismo se aprecian el grupo de bombeo del tanque 10, las bombas del sistema de transferencia y las bombas de alta presión de la caldera.

En la figura 3.3, se muestra con detalle el esquema del sistema de bombeo de alta presión de la caldera de la unidad 7 (aplica para las otras dos U/8 y U/9).

Mas adelante se verán los esquemas de los subsistemas que conforman el sistema completo de suministro de combustible de la planta, así como los esquemas correspondientes a los modos de operación del sistema según sea el caso.



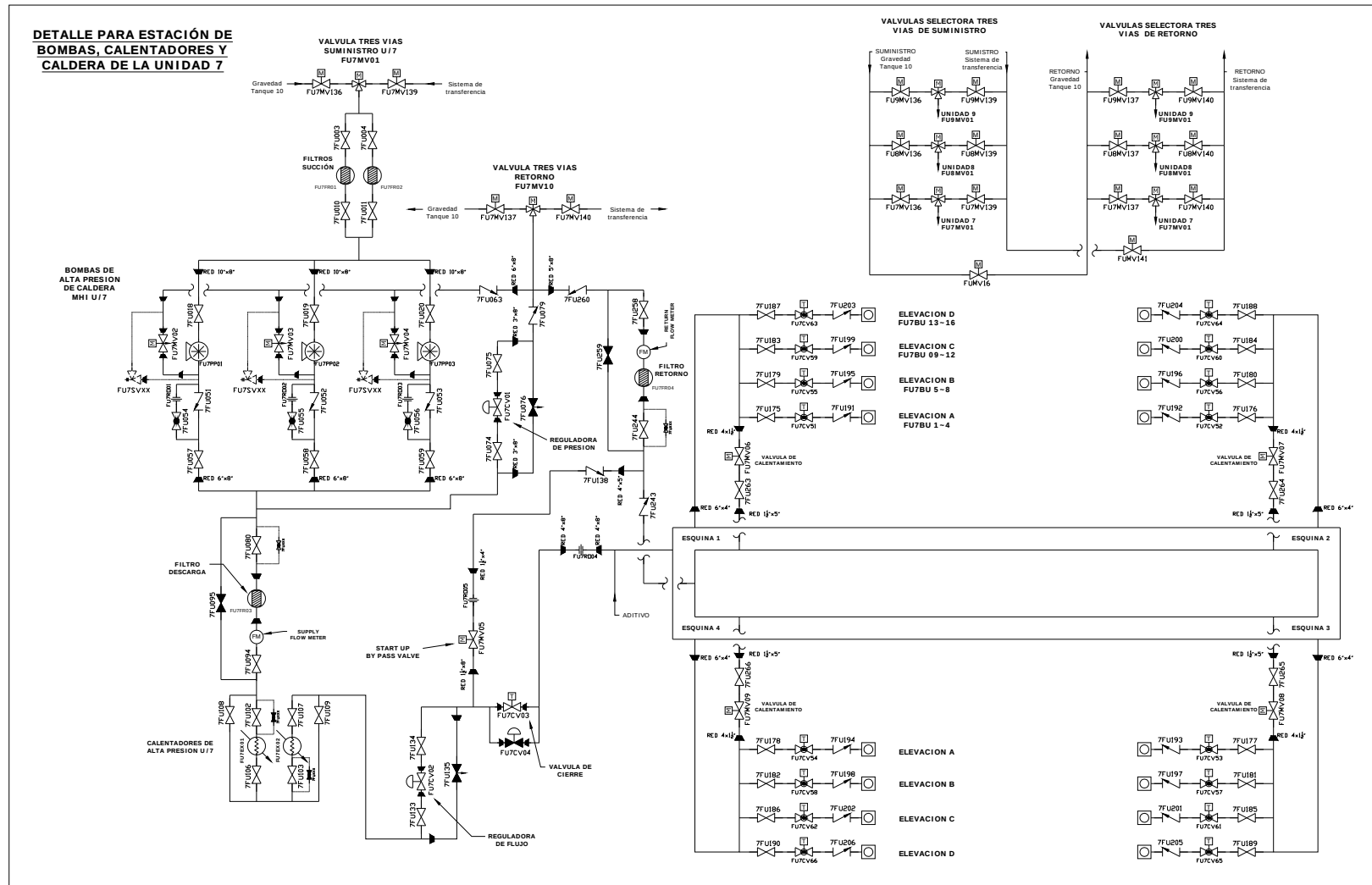


Figura 3.3 Esquema del sistema combustible de alta presión de la caldera. (Elaboración propia)

3.2. OPERACIÓN DEL SISTEMA DE COMBUSTIBLE

Antes de describir las operaciones del sistema es importante aclarar la nomenclatura usada para el etiquetado de las válvulas y líneas de tuberías del sistema.

Las primeras dos letras son una abreviatura y están referidas al fluido que transporta la tubería o accesorio, en nuestro caso fueloil (las dos primeras en mayúscula).

Para las tuberías: a continuación de la sílaba FU, encontramos un número de hasta tres dígitos en correlativo que sirve para distinguirlas, inmediatamente sigue el diámetro de la tubería en pulgadas.

Para las válvulas: a continuación de la sílaba FU, encontramos las letras MV (del inglés “*motorized valve*” o válvula motorizada) que nos indica que dicha válvula posee un actuador eléctrico que puede ser accionado a distancia desde la sala de control, a continuación un número correlativo de hasta tres dígitos asignado a cada válvula para diferenciar las mismas; en el caso de ser una válvula sin actuador solo se omiten las letras MV lo demás permanece sin cambios.

A continuación se describen los modos de operación del sistema de combustible de la planta. Se dividen en:

- Llenado del tanque n.º 10 con fueloil desde el tanquero.
- Trasegado de combustible de los tanques 4 y 6 al tanque n.º 10.
- Trasegado a los tanques existentes desde tanque n.º 10.
- Recirculación del tanque n.º 10.
- Bombeo a planta desde tanque n.º 10.
- Llenado de los tanques n.º 4, 6 y 7 desde el tanquero.
- Bombeo a planta por medio del sistema de transferencia.
- Suministro por medio del sistema de gravedad.
- Bombeo de alta presión de la caldera.

Los esquemas utilizados a continuación, con el fin de explicar los modos de operación, son extractos de los mostrados anteriormente en las figuras 3.2 y 3.3.

3.2.1. LLENADO DEL TANQUE 10 CON FUELOIL DESDE EL TANQUERO.

A continuación en la figura 3.4 se muestra el esquema de operación y se describe el procedimiento para el caso mostrado.

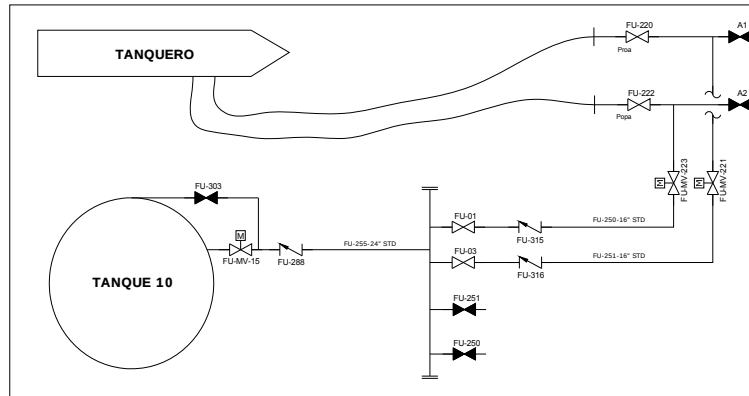


Figura 3.4 Esquema de operación de llenado del tanque n.º 10 con combustible desde el tanquero. (Elaboración propia)

PROCEDIMIENTO:

1. Desde la sala de control se procede a abrir la válvula motorizada FU-MV-15 (entrada de combustible al tanque 10).
2. En la línea FU-255-24" situado en la parte trasera sala de bombas se procede a abrir las válvulas manuales FU-03 popa y FU-01 proa.
3. En la salida de las mangueras de suministro de fueloil se abren las válvulas manuales FU-220 proa y FU- 222 popa.
4. Sobre las líneas FU-200 proa y FU-201 popa de 16" se encuentran situadas las válvulas B1 y B2 de 8" que se comunican con el tanque lastre a través de una tubería de 8". Estas válvulas deben ser abiertas antes de comenzar el bombeo. Al iniciar el bombeo las mangueras submarinas se encuentran llenas de agua de mar la cual es conducida hacia el tanque de lastre (el agua contenida en el tanque de lastre es posteriormente pasada a la planta de desechos aceitosos). El inicio del bombeo es lento, con una presión de 2 kgf/cm². Para poder desplazar el agua contenida en las mangueras.

5. Se cierra la válvula testigo, al comenzar a salir combustible.
6. Se da la orden y desde la sala de control se da la señal que acciona la apertura de las válvulas motorizadas FU-MV-221 y FU-MV-223.
7. Se cierran las válvulas B1 y B2 en la tubería de 8".
8. Al finalizar el bombeo de fueloil al tanque 10, el jefe de guardia se comunica con el tanquero para dar inicio al bombeo de agua que desalojara el fueloil de las mangueras. Este proceso se realiza a baja presión.

Nuevamente y como el procedimiento de llenado del tanque, al constatar la presencia de agua por las válvulas testigos se suspende el bombeo de esta. Se procede a cerrar las válvulas motorizadas FU-MV-221 y FU-MV-223 que se encuentran en la línea FU-250 y FU-251 de 16" y la FU-MV-15. Se cierran las válvulas manuales FU-222 popa y FU-220 proa.

3.2.2. TRASEGADO DE COMBUSTIBLE DE LOS TANQUES 4 Y 6 AL TANQUE 10 (SISTEMA DE TRANSFERENCIA)

En el nivel 26 la salida de los calentadores del sistema de bombeo de transferencia se interconectó con la línea de retorno (FU-254-10") de fueloil del tanque 10, permitiendo trasegar combustible de los tanques 4 y 6 al tanque 10.

PROCEDIMIENTO:

1. Bombas del sistema de transferencia operando.
2. Abrir las válvulas motorizadas FU-MV-09, FU-MV-10 y FU-MV-11. Esta operación puede ser efectuada localmente (en la válvula) o desde el panel.
3. Abrir las válvulas manuales FU-401, FU-403 y FU-07.
4. Abrir la válvula manual FU-400 porcentualmente.
5. Después de completada la operación, cerrar la válvula manual FU-400.

3.2.3. TRASEGADO A LOS TANQUES EXISTENTES DESDE TANQUE 10

A continuación en la figura 3.5 se muestra el esquema de operación y se describe el procedimiento para el caso mostrado.

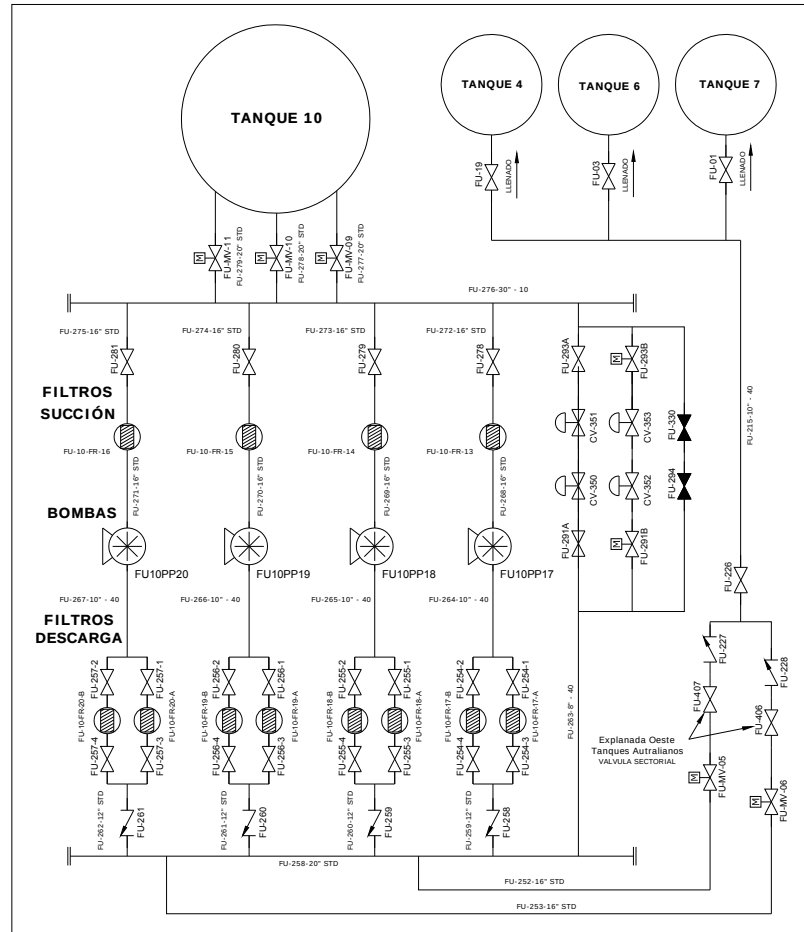


Figura 3.5 Esquema de la operación de trasegado a los tanques existentes desde tanque n.º 10. (Elaboración propia)

PROCEDIMIENTO:

1. Las válvulas manuales FU-250 y FU-251 cerradas.
2. Abiertas las válvulas motorizadas FU-MV-05 y FU-MV-06.
3. Abiertas las válvulas de sectorización FU-406 y FU-407.
4. Cerradas las válvulas manuales FU-304, FU-310, FU-404 y FU-405.

5. Abrir las válvulas motorizadas FU-MV-09, FU-MV-10 y FU-MV-11. Esta operación puede ser efectuada localmente o desde el panel.
6. Abrir válvula manual FU-226.
7. Abrir la válvula manual de llenado del taque existente seleccionado. Taque 4 con válvula de llenado 19, tanque 6 con válvula 03 y tanque 7 con válvula 01.
8. Proceder a encender la(s) bomba(s) seleccionada(s) en la E/B (Estación de Bombeo) del tanque 10. Esta operación puede ser efectuada localmente o desde el panel.
9. Una vez completado el trasegado:
 - Apagar la(s) bomba(s).
 - Cerrar la válvula manual de llenado del tanque existente seleccionado.
 - Cerrar la válvula manual FU-226.

3.2.4. RECIRCULACIÓN DEL TANQUE 10

3.2.4.1. Recirculación corta: esta recirculación es hacia el propio tanque 10, con el objeto de evitar la estratificación del combustible, que puede ocurrir si el sistema está inactivo por mucho tiempo.

PROCEDIMIENTO:

1. Válvulas motorizadas FU-MV-09, FU-MV-10 y FU-MV-11 abiertas. Esta operación puede ser efectuada localmente o desde el panel.
2. Válvulas motorizadas FU-MV-15, FU-MV-05 y FU-MV-06, cerradas.
3. Abrir las válvulas manuales FU-250, FU-251 y FU-303.
4. Proceder a encender la(s) bomba(s) seleccionada(s) en la E/B del tanque 10. Esta operación puede ser efectuada localmente o desde el panel.
5. Una vez completada la recirculación:
 - Apagar la(s) bomba(s).
 - Cerrar las válvulas FU-250, FU-251 y FU-303.

3.2.4.2. Recirculación larga: esta se efectúa con la finalidad de mantener el combustible en condiciones óptimas para su consumo en las calderas.

En esta recirculación se debe garantizar presión 10 kgf/cm² y temperatura 55°C a la entrada de las unidades 7, 8 y 9.

PROCEDIMIENTO:

1. Disponibilidad de vapor en los calentadores del nivel 26.
2. Válvulas manuales de sectorización FU-406, FU-407, FU-304, FU-310, FU-408, FU-402, FU-401, FU-403, FU-07, abiertas.
3. Válvulas motorizadas FU-MV-05 y FU-MV-06, FU-MV-09, FU-MV-10 y FU-MV-11 abiertas. Esta. operación puede ser efectuada localmente o desde el panel.
4. Válvulas manuales FU-404 y FU-405, cerradas.
5. Válvula motorizada FU-MV-16, abierta (bypass de calentamiento de fueloil).
6. Verificar el funcionamiento del sistema de aire comprimido en la E/B y en área de calentadores.
7. Colocar en servicio un calentador (abrir válvula de compuerta FU-317, FU-318, FU-319 y FU-320) según corresponda.
8. Proceder a encender una bomba en la E/B del tanque 10.
9. Después de verificar la presencia de presión de fueloil en los calentadores, abrir las válvulas manuales del sistema de suministro y de retomo de condensado de vapor en el calentador que está en servicio.
10. Al culminar las operaciones se debe sacar de servicio la fase de vapor de los calentadores, cerrando las válvulas manuales de compuerta y el aire de suministro.
11. Apagar la bomba.

3.2.5. BOMBEO A PLANTA DESDE TANQUE 10

A continuación en la figura 3.6 se muestra el esquema de operación y se describe el procedimiento para el caso mostrado.

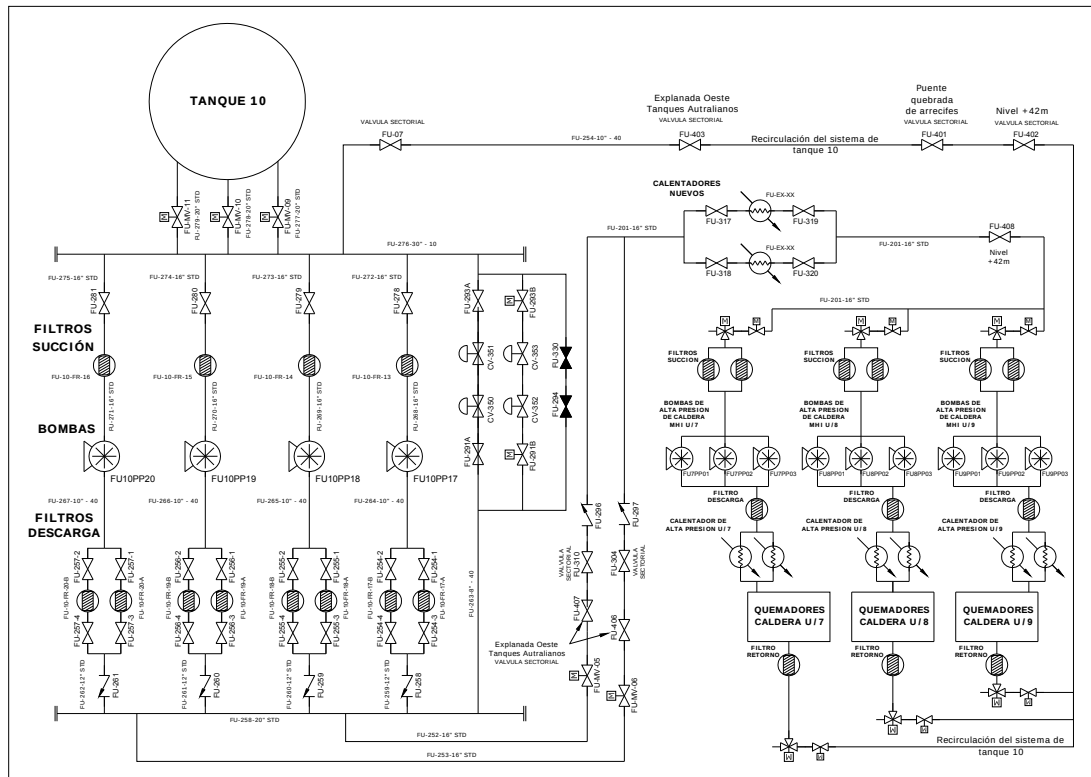


Figura 3.6 Esquema de la operación de bombeo a planta desde tanque n.º 10.

(Elaboración propia)

PROCEDIMIENTO:

1. Disponibilidad de vapor en los calentadores del nivel 26.
2. Válvulas manuales de sectorización FU-406, FU-407, FU-304, FU-310, FU-408, FU-402, FU-401, FU-403, FU-07, abiertas.
3. Válvulas motorizadas FU-MV-05 y FU-MV-06, FU-MV-09, FU-MV-10 y FU-MV-11 abiertas. Esta operación puede ser efectuada localmente o desde el panel.

4. Válvulas manuales FU-404 y FU-405, cerradas.
5. Válvula motorizada FU-MV-16, abierta.
6. Verificar el funcionamiento del sistema de aire comprimido en la E/B y en el área de calentadores (nivel 26).
7. Colocar en servicio un calentador (abrir válvula de compuerta FU-317, FU-318, FU-319 y FU-320) según corresponda.
8. Proceder a encender una bomba en la E/B del tanque 10.
9. Después de verificar la presencia de presión de fueloil en los calentadores, abrir las válvulas manuales del sistema de suministro y de retomo de condensado de vapor en el calentador que está en servicio.

En el momento que las condiciones de presión = 10 kgf/cm² y temperatura = 55°C son las requeridas en planta, se puede proceder al arranque del sistema de combustible líquido de la caldera.

Cerrar la válvula motorizada FU-MV-16, la cual interconecta la línea de suministro a la caldera con la de retomo al tanque 10, con el objeto de calentar el combustible de recirculación.

3.2.6. LLENADO DE LOS TANQUES 4, 6 y 7 DESDE EL TANQUERO

PROCEDIMIENTO:

1. Se abre la válvula manual del tanque que se va a llenar, la 01 en el tanque 7, la 03 en el tanque 6 o la 19 en el tanque 4.
2. Se abre la válvula manual FU-226 en la quebrada de Arrecifes y se cierran las FU-304 y FU-310.
3. Se abren las válvulas manuales FU-220 (Proa), FU-222 (Popa), FU-404 (Popa), FU-405 (Proa), FU-406 y FU-407 (ubicadas en la explanada oeste).
4. Deben estar cerradas las válvulas motorizadas FU-MV-05, FU-MV-06, FU-MV-221, FU-MV-223. Esta operación puede ser efectuada localmente o desde el panel.

5. Sobre las líneas FU-200 proa y FU-201 popa de 16" se encuentran situadas las válvulas B1 y B2 de 8" que se comunican con el tanque de lastre a través de una tubería de 8". Estas válvulas deben ser abiertas antes de comenzar el bombeo.

Al iniciar el bombeo las mangueras submarinas se encuentran llenas de agua de mar la cual es conducida hacia el tanque lastre.

El inicio del bombeo es lento, con una presión de 2 kgf/cm². Para poder desplazar el agua contenida en las mangueras.

6. Se cierra la válvula testigo, al comenzar a salir combustible, y se manda a parar el bombeo.
7. Se cierran las válvulas manuales "B1" y "B2", abriéndose luego las válvulas "A1" y "A2" comenzándose de nuevo el bombeo.
8. Al finalizar el bombeo de fueloil al tanque 10, el jefe de guardia se comunica con el tanquero para dar inicio al bombeo de agua para desalojar el fueloil de las mangueras hacia el tanque 10. Esto se realiza a baja presión.

Al constatar la presencia de agua por las válvulas testigos se suspende el bombeo de esta. Se cierra la válvula manual de llenado del tanque seleccionado, y las válvulas manuales: FU-226, FU-404, FU-405, A1, A2, FU-220 y FU-222.

NOTA: Para la realización de esta maniobra se debe tener en servicio el sistema de combustible de transferencia si se va a llenar el tanque 7 o el sistema de gravedad si se van a llenar los tanques 4 y 6.

3.2.7. BOMBEO A PLANTA POR MEDIO DEL SISTEMA DE TRANSFERENCIA

A continuación en la figura 3.7 se muestra el esquema de operación y se describe el procedimiento para el caso mostrado.

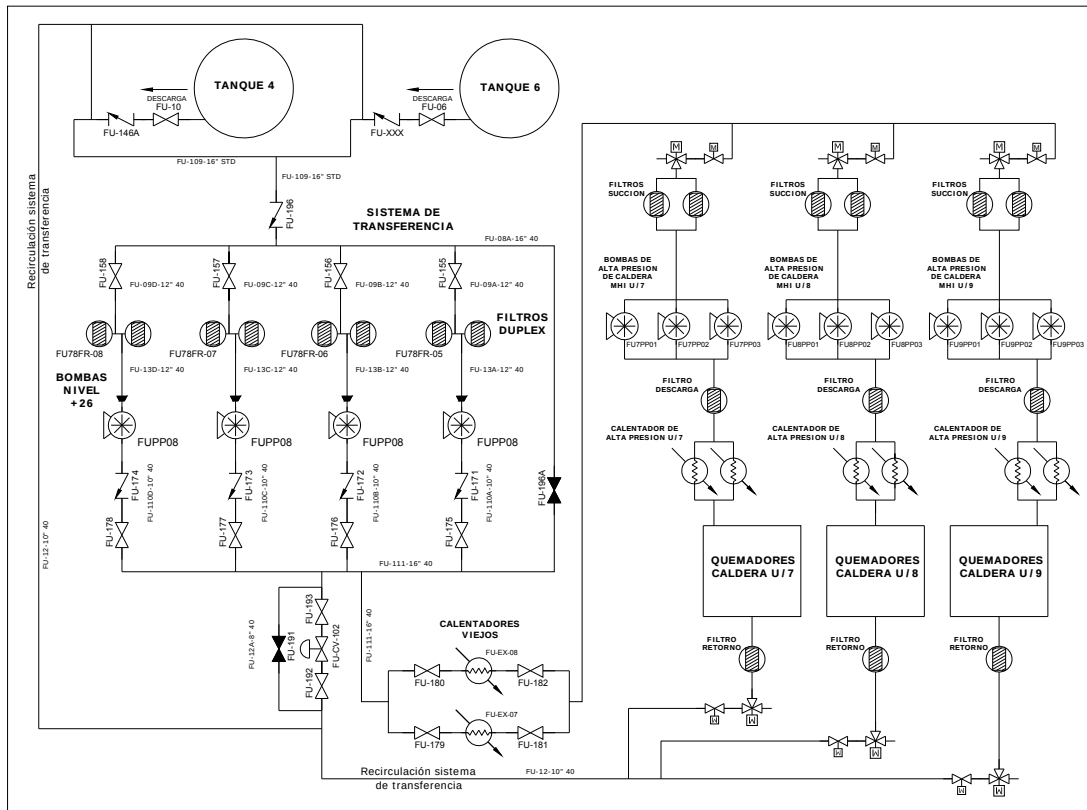


Figura 3.7 Esquema de la operación de bombeo a planta por medio del sistema de transferencia. (Elaboración propia)

El objetivo del sistema es transferir el combustible líquido, de los tanques diarios 4 y 6 a los sistemas de alimentación de las unidades 7, 8 y 9 de la planta Ampliación Tocoa, mediante una estación de bombeo y calentamiento.

PROCEDIMIENTO:

1. Se abre la válvula de compuerta manual en la descarga del tanque que se va a colocar en servicio hacia la planta, la 06 en el tanque 6 o la 10 en el tanque 4.

2. Válvulas manuales FU-191, FU-196A y FU-400 cerradas.
3. Verificar que las válvulas manuales FU-192 y FU-193 estén abiertas.
4. Colocar en servicio un calentador (abrir válvula de compuerta FU-180, FU-182, FU-179 y FU-181) según corresponda.
5. Verificar las válvulas de succión y descarga de las bombas estén totalmente abiertas. La presión en el colector de succión de las bombas debe ser mayor a 4 m.c.a. (metros de columna de agua) ó 0,4 kgf/cm².
6. Proceder a encender la(s) bomba(s) FUPP05, FUPP06, FUPP07 y FUPP08 en la estación de bombeo del sistema de transferencia, el mando se realiza desde sala de control o desde el mando local.
7. Después de verificar la presencia de presión de fueloil en los calentadores, abrir las válvulas manuales del sistema de suministro y de retorno de condensado de vapor en el calentador que está en servicio. Los calentadores poseen unas válvulas reguladores del flujo vapor y de esta manera se controla la temperatura del combustible. El punto de ajuste de los calentadores es de 55 °C, el sistema arroja alarma de temperatura baja a los 50 °C y de temperatura alta a los 65 °C.
8. Antes de reiniciar la alimentación a las calderas, y desde la sala de control abrir la válvula motorizada de calentamiento de combustible FU-MV-141, para purgar la línea del fueloil frío que queda en la tubería producto del tiempo que no está en operación el sistema.

La válvula debe permanecer abierta hasta que el combustible recirculante alcance la temperatura requerida (50 °C). Solo cuando alcanza la temperatura indicada, se procede a cerrar la válvula FU-MV-141.
9. Al alcanzar la temperatura y antes de cerrar la válvula de calentamiento, se posiciona la válvula de tres vías de suministro y la válvula de tres vías de retorno, para recibir y retornar respectivamente el fueloil proveniente del sistema de transferencia.

3.2.8. SUMINISTRO POR MEDIO DEL SISTEMA DE GRAVEDAD

A continuación en la figura 3.8 se muestra el esquema de operación y se describe el procedimiento para el caso mostrado.

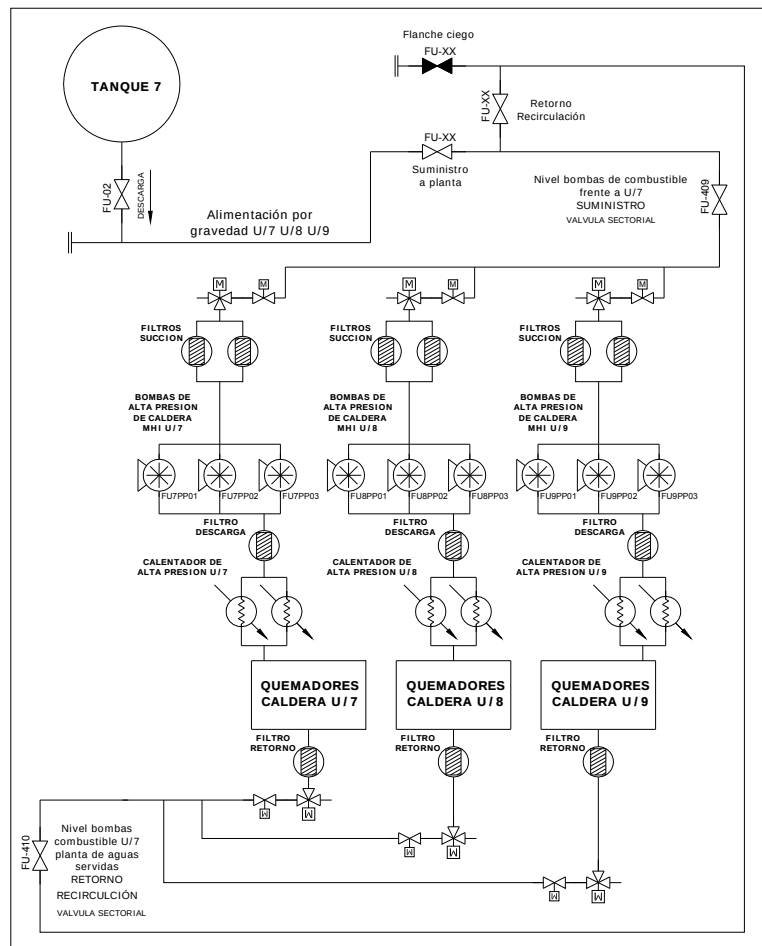


Figura 3.8 Esquema de la operación de suministro por medio del sistema de gravedad. (Elaboración propia)

El objetivo del sistema es transferir el combustible líquido, del tanque diario número 7 a los sistemas de alimentación de las unidades 7, 8 y 9 de la planta Ampliación Tocoa, por medio de la gravedad.

PROCEDIMIENTO:

1. Se abre la válvula manual FU-02 a la descarga del tanque 7.
2. Se abren las válvulas sectoriales FU-409 y FU-410 en el nivel de bombas de la caldera, frente a la unidad 7, y a la planta de aguas servidas respectivamente.
3. Se cierra la válvula sectorial FU-402 en el puente de tuberías del nivel 42.
4. Con el objetivo de mejorar las condiciones del combustible a la succión de la bombas de la caldera, se da la señal de apertura de la válvula motorizada FU-MV-16, que funciona como un bypass y permite mediante un largo retorno hacia el anillo de recirculación en Tacoa (esquina de Tamakun) el calentamiento del combustible. Logrando así subir la temperatura del fueloil, hasta unos 50 °C a la succión de las bombas, como permisivo para dar inicio al bombeo de combustible a la caldera.
5. Se posicionan las válvulas de tres vías de suministro y de retorno en el sistema de transferencia/ tanque 10.
6. Luego de lograr la temperatura necesaria se cierra la válvula FU-MV-16, para no permitir el retorno de combustible por esa línea. Esta válvula está ubicada en la estación de bombas de combustible de la caldera en la unidad.

3.2.9. BOMBEO DE ALTA PRESIÓN DE LA CALDERA

A continuación en la figura 3.9 se muestra el esquema de operación y se describe el procedimiento para el caso mostrado.

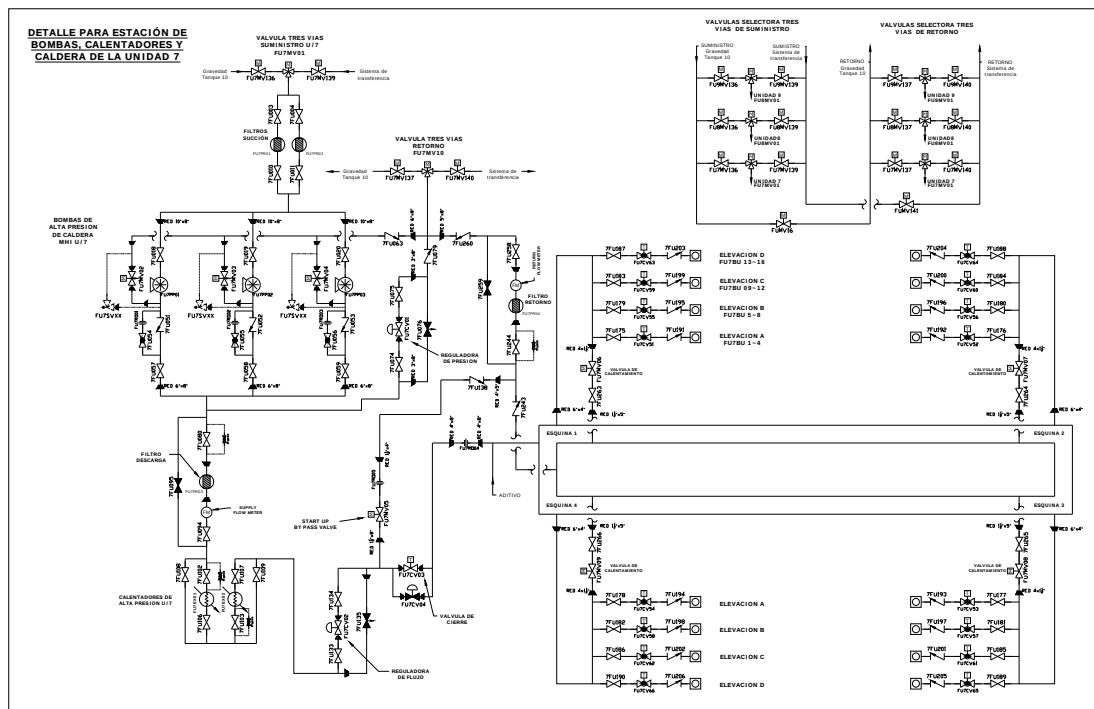


Figura 3.9 Esquema de la operación de bombeo de alta presión de la caldera.

(Elaboración propia)

Dadas la condiciones de presión y temperatura (óptimas para la combustión en el quemador) a la succión de las bombas de la caldera, se da la señal de arranque de unas de las bombas.

PROCEDIMIENTO:

1. Se verifica la operación de los filtros de combustible ubicados en la estación de bombeo (succión, descarga y retorno). Observando los manómetros diferenciales entre la entrada y salida de los mismos, para determinar la

pérdida, cuando esta es mayor a un cierto valor establecido, se saca el filtro de servicio y se prepara para su limpieza.

2. Entra en servicio una bomba de combustible dimensionada para una capacidad de $58 \text{ m}^3/\text{h}$, por lo que con dos bombas se satisface la necesidad de la caldera de $96 \text{ m}^3/\text{h}$ a carga completa y todos los quemadores a fueloil.
3. Si el sistema estaba fuera de servicio se apertura la válvula de calentamiento de la caldera o bypass de arranque de la caldera FU-MV-05, para purgar el fueloil más frío y eliminar el que pudiera haber quedado asentado en la tubería, de esta manera se deja el fueloil en condiciones óptimas y preparado para su entrada en servicio. Esta válvula puede quedar abierta a la espera de la puesta en servicio.
4. A medida que se van colocando en servicio los quemadores de fueloil, en las esquinas de la caldera, se cierra la válvula FU-MV-05. Se encienden los quemadores de las elevaciones superiores, y se va balanceando el encendido de los mismos en esquinas opuestas.
5. A medida que se van colocando o entrando en servicio más quemadores a fueloil (según la necesidad de la planta, la carga de la turbina y los quemadores que se coloquen a gas), la válvula reguladora de presión se va cerrando automáticamente (según su acción de control), hasta que llega a un 5% de apertura y se enciende la segunda bomba de combustible para elevar la presión de combustible debido a la demanda de los quemadores.
6. El combustible no quemado es llevado por la línea de retorno hacia la válvula selectora de tres vías de retorno.

CAPÍTULO IV
LEVANTAMIENTO, RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN Y
ELABORACIÓN DE LOS PLANOS

4.1. CONSTRUCCIÓN DE LOS PLANOS DEL SISTEMA CON AUTOCAD

Con la necesidad de determinar las longitudes y diámetros de las tuberías, número de accesorios, y componentes de la red de tuberías, se realizó un levantamiento planimétrico de las líneas de tuberías en la planta.

Resultado de este levantamiento se completó la información para elaborar los planos del sistema de combustible presentados en este trabajo. Los planos están en los anexos del presente trabajo.

De estos planos construimos el esquema de la red principal o sistema completo de almacenaje, de manejo y suministro del combustible. Luego valiéndonos de dicho esquema construimos los diagramas de los subsistemas y casos propuestos de estudio.

En este capítulo se presentan los esquemas elaborados por caso, datos, parámetros de diseño, operación y funcionamiento de los equipos y accesorios de las tuberías que componen el sistema de suministro de combustible de la planta.

También se muestran los datos del sistema de combustible arrojados por el Sistema de Control Distribuido (DCS), y los datos de los reportes diarios de operación del sistema de combustible de la planta.

4.2. ESQUEMAS DE LOS CASOS PROPUESTOS A ESTUDIAR.

Para la evaluación del sistema de combustible líquido (fueloil) de la planta Ampliación Tocoa, se resolvió dividir el sistema en cuatro subsistemas y plantear la red de tuberías de cada uno de estos.

Estos casos responden a los usos por parte de operaciones en planta y los modos de operación explicados anteriormente. Primero se esquematiza la red y luego se muestra el esquema propuesto de nodos y caudales para el cálculo por el método de Hardy-Cross. A continuación se muestran los casos propuestos:

1. Trasegado de combustible del tanque n.º 10 a los tanques de almacenamiento diario (tanques n.º 4, 6 y 7), mediante la estación de bombeo del tanque 10. Mostrado en la figura 4.1 y 4.2.
2. Bombeo de combustible del tanque n.º 10 a las calderas de las unidades 7, 8 y 9, mediante la estación de bombeo y calentadores del tanque 10, las bombas y calentadores del nivel planta, incluyendo el retorno a la succión de las bombas del tanque 10 (retorno largo). Mostrado en la figura 4.3 y 4.4.
3. Bombeo de combustible de los tanques diarios (n.º 4 y 6) a las calderas de las unidades 7, 8 y 9, por medio de las bombas y calentadores del sistema de transferencia, las bombas y calentadores del nivel planta, incluyendo el retorno hacia el anillo en el tanque 4. Mostrado en la figura 4.5 y 4.6.
4. Suministro de combustible desde el tanque n.º 7 a la caldera de la unidad 7, por medio del sistema de gravedad, las bombas y calentadores del nivel planta, incluyendo el retorno hacia el anillo de calentamiento en frente a la planta Tocoa. Mostrado en la figura 4.7 y 4.8.

Primer caso: Trasegado de combustible del tanque n.º 10 a los tanques de almacenamiento diario

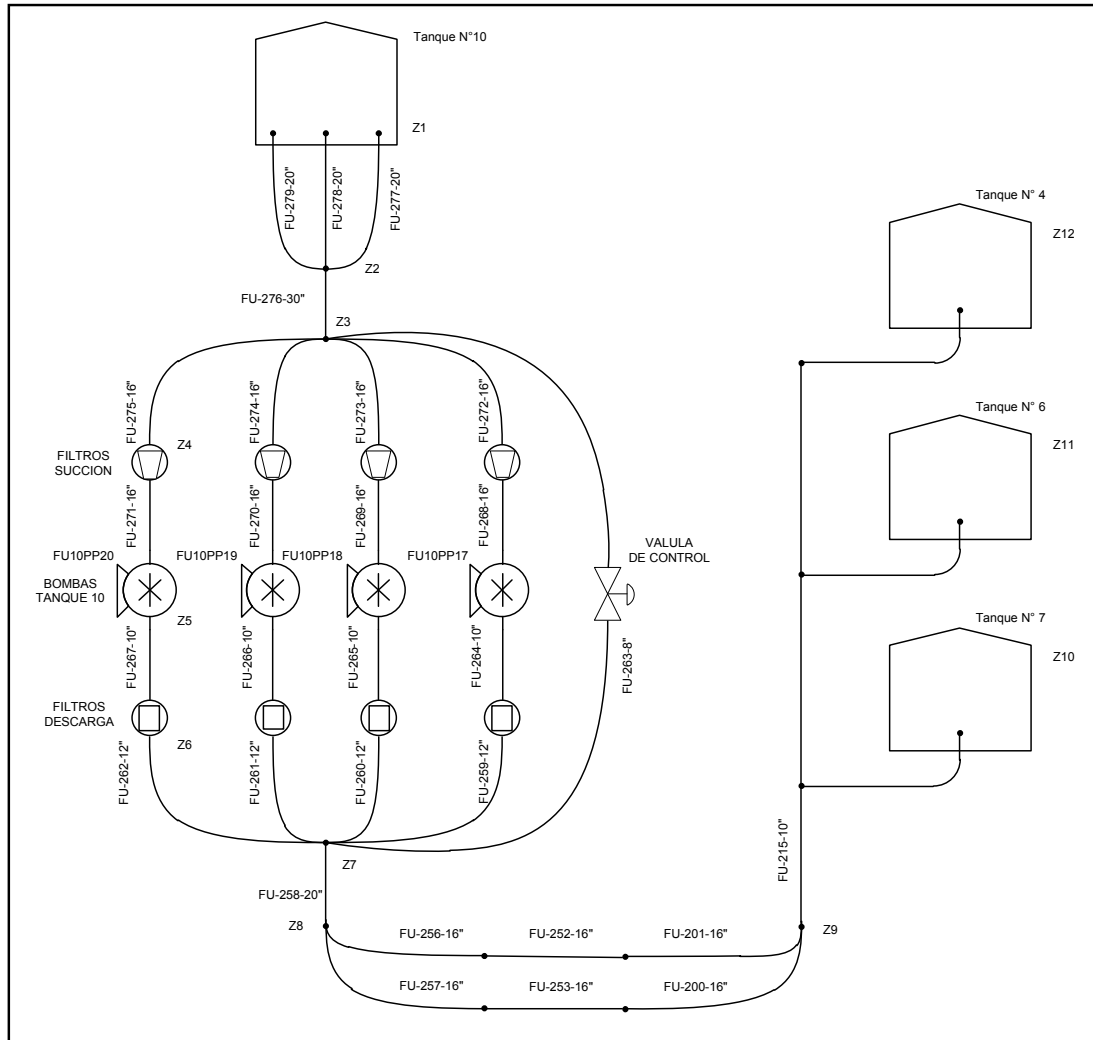


Figura 4.1. Esquema de la red de tuberías desde el tanque n.º 10 hasta los tanques diarios. (Elaboración propia)

Primer caso:
Trasegado de combustible del tanque n.º 10 a los tanques de almacenamiento diario

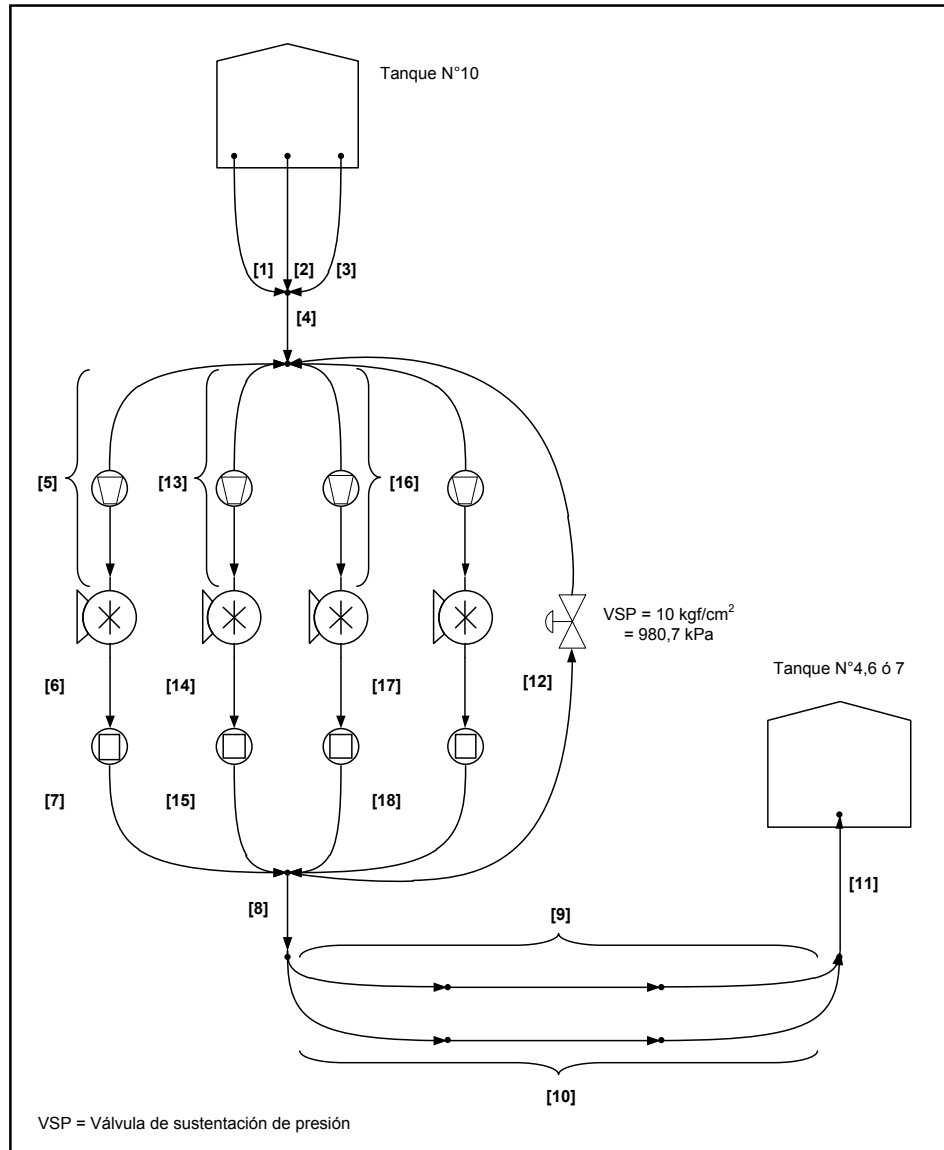


Figura 4.2. Esquema de la red equivalente en caudales para el primer caso de estudio por medio del método Hardy-Cross. (Elaboración propia)

Segundo caso: Bombeo de combustible del Tanque n.º 10 a las calderas de la unidades 7, 8 y 9.

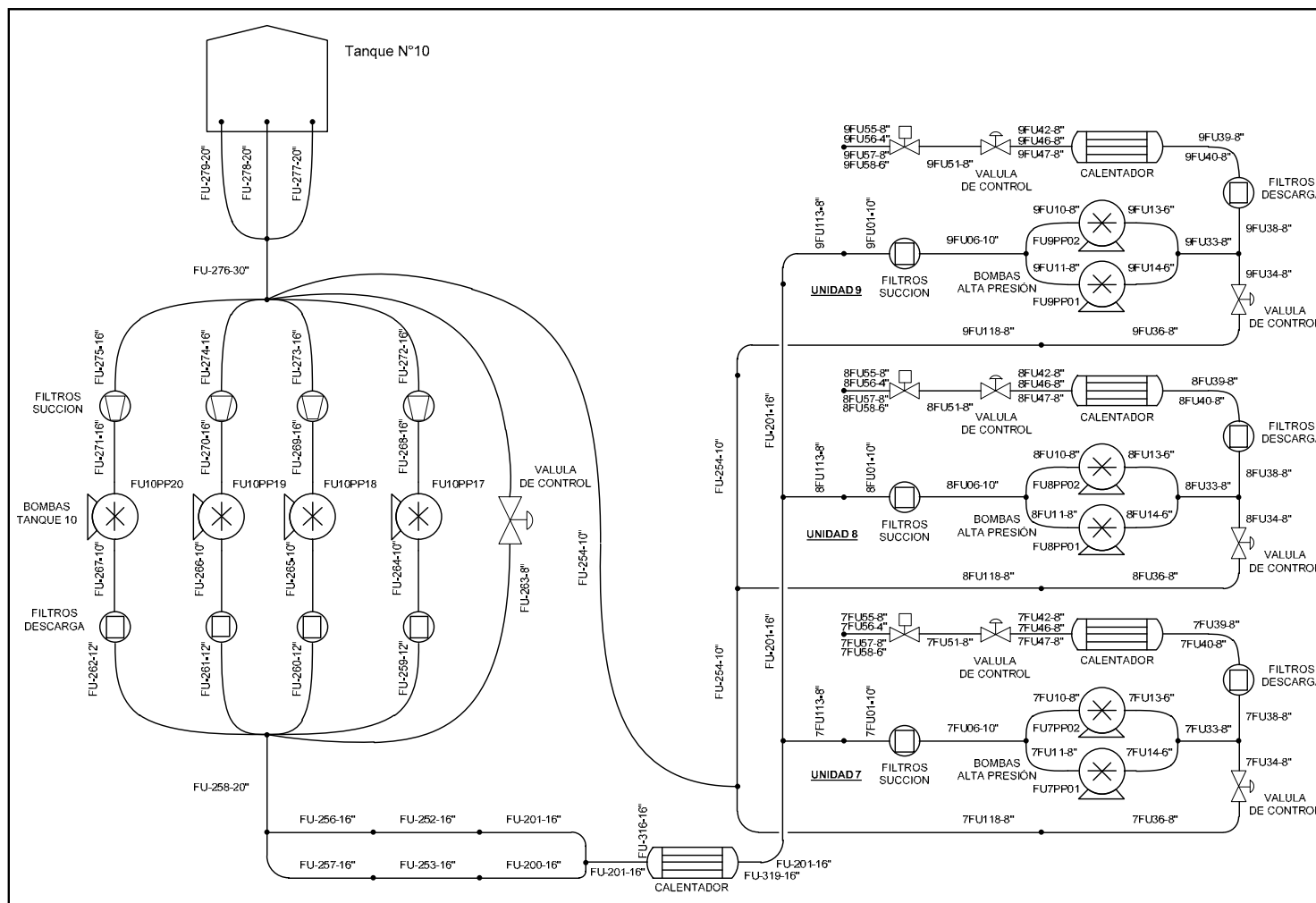


Figura 4.3. Esquema de la red de tuberías desde el tanque n.º 10 hasta los quemadores de la caldera, de las unidades 7, 8 y 9. (Elaboración propia)

Segundo caso: Bombeo de combustible del Tanque n.º 10 a las calderas de la unidades 7, 8 y 9.

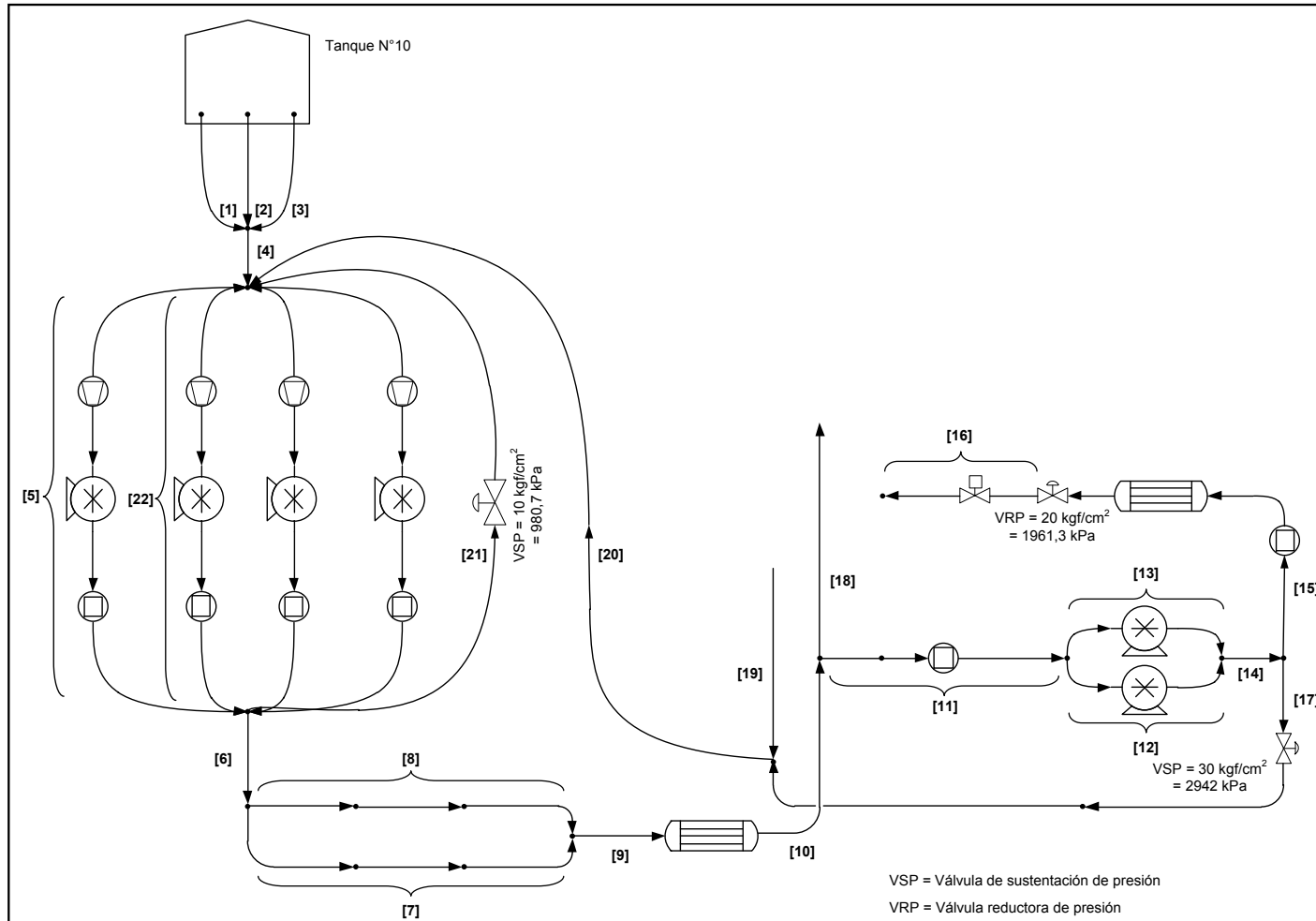


Figura 4.4. Esquema de la red equivalente en caudales para el segundo caso de estudio por medio del método Hardy-Cross. (Elaboración propia)

Tercer caso: Bombeo de combustible de los tanques diarios n.º 4 y 6 a la caldera de las unidades 7, 8 y 9, por medio del sistema de transferencia

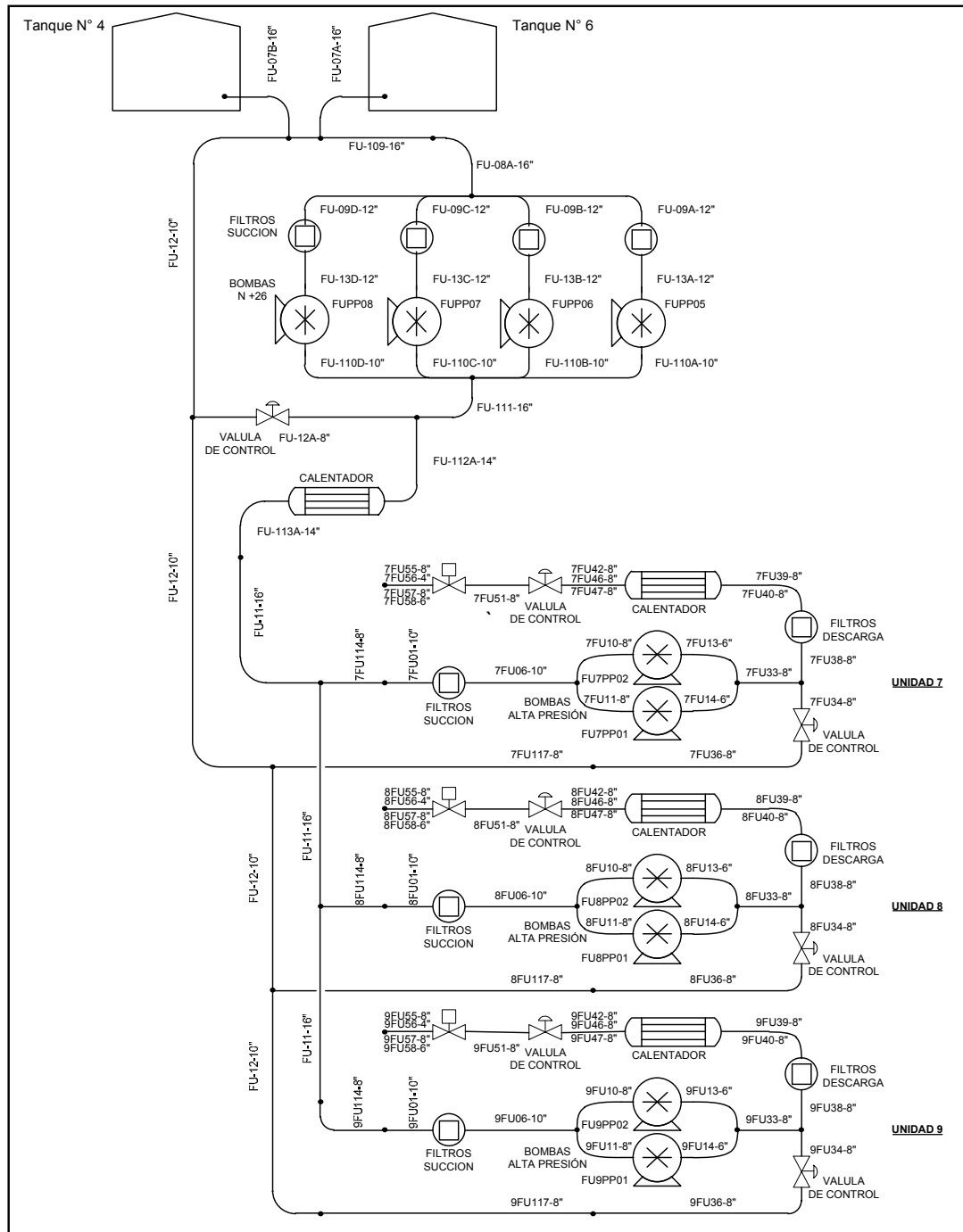


Figura 4.5. Esquema de la red de tuberías desde los tanques diarios hasta los quemadores de la caldera, de las unidades 7, 8 y 9. (Elaboración propia)

Tercer caso: Bombeo de combustible de los tanques diarios n.º 4 y 6 a la caldera de las unidades 7, 8 y 9, por medio del sistema de transferencia

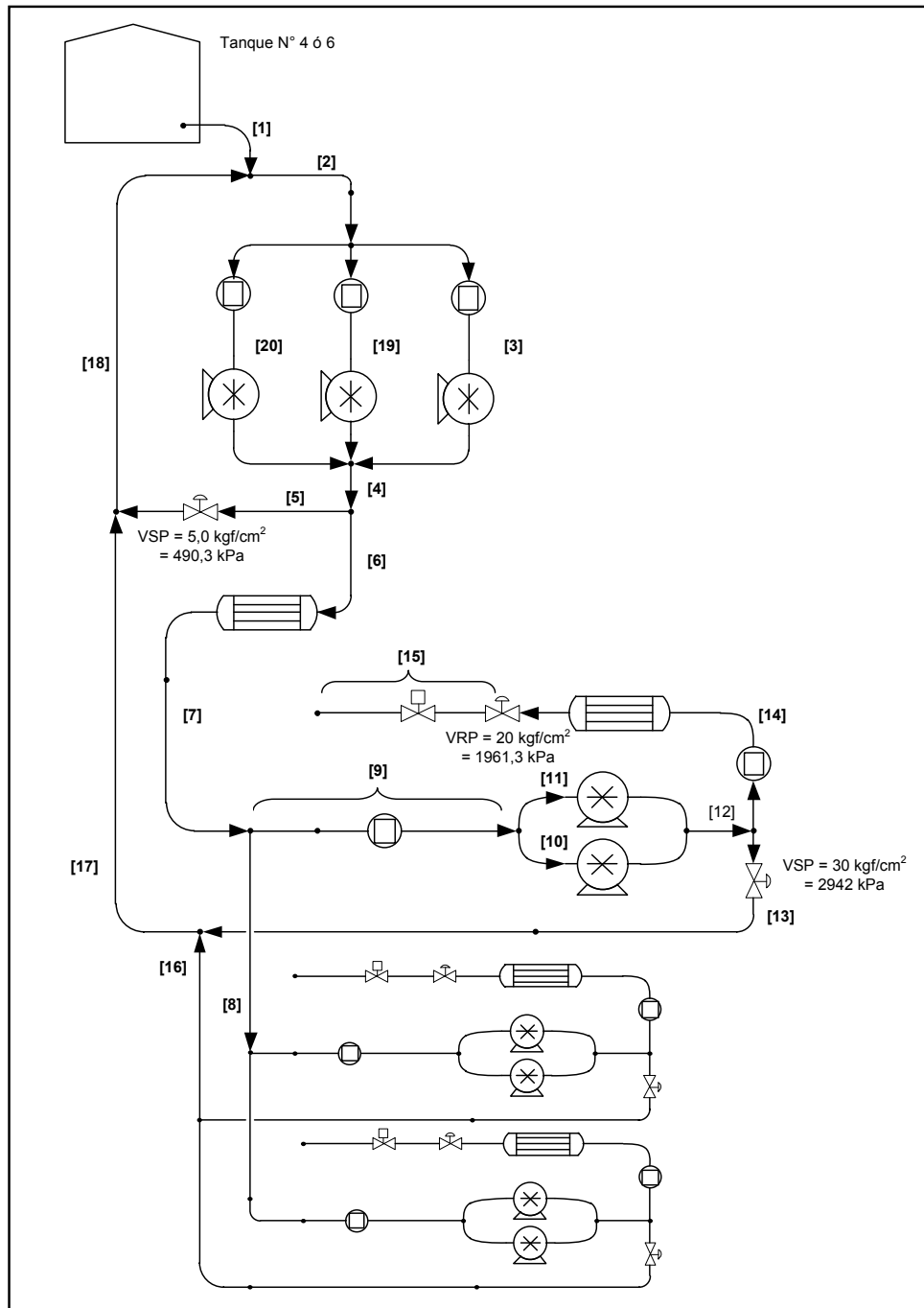


Figura 4.6. Esquema de la red equivalente en caudales para el tercer caso de estudio por medio del método Hardy-Cross. (Elaboración propia)

Cuarto caso: Suministro de combustible desde el tanque n.º 7 a la caldera de la unidad 7, por medio del sistema de gravedad

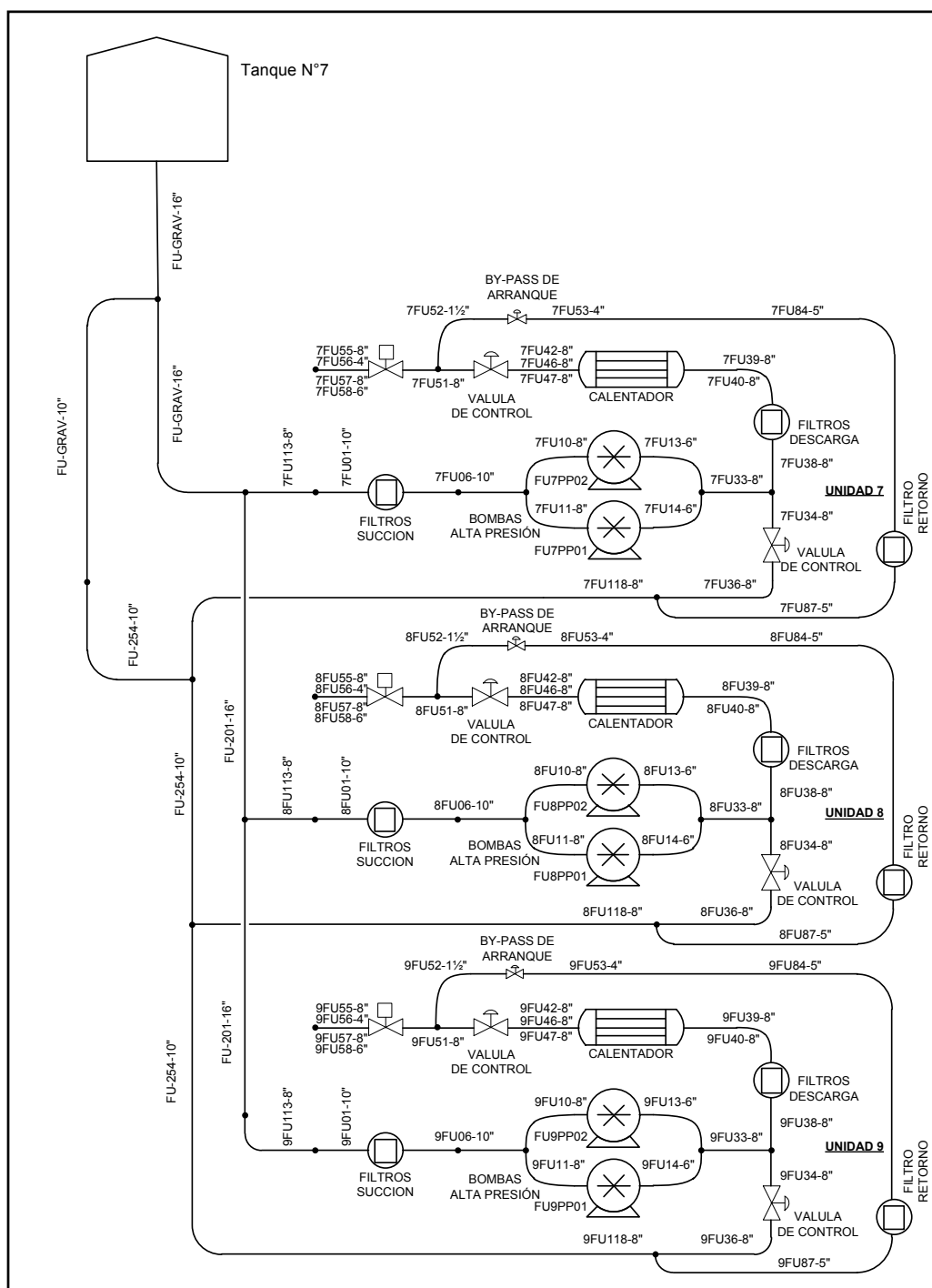


Figura 4.7. Esquema de la red de tuberías desde el tanque n.º 7 hasta los quemadores de la caldera de una de las unidades generadoras. (Elaboración propia)

Cuarto caso: Suministro de combustible desde el tanque n.º 7 a la caldera de la unidad 7, por medio del sistema de gravedad

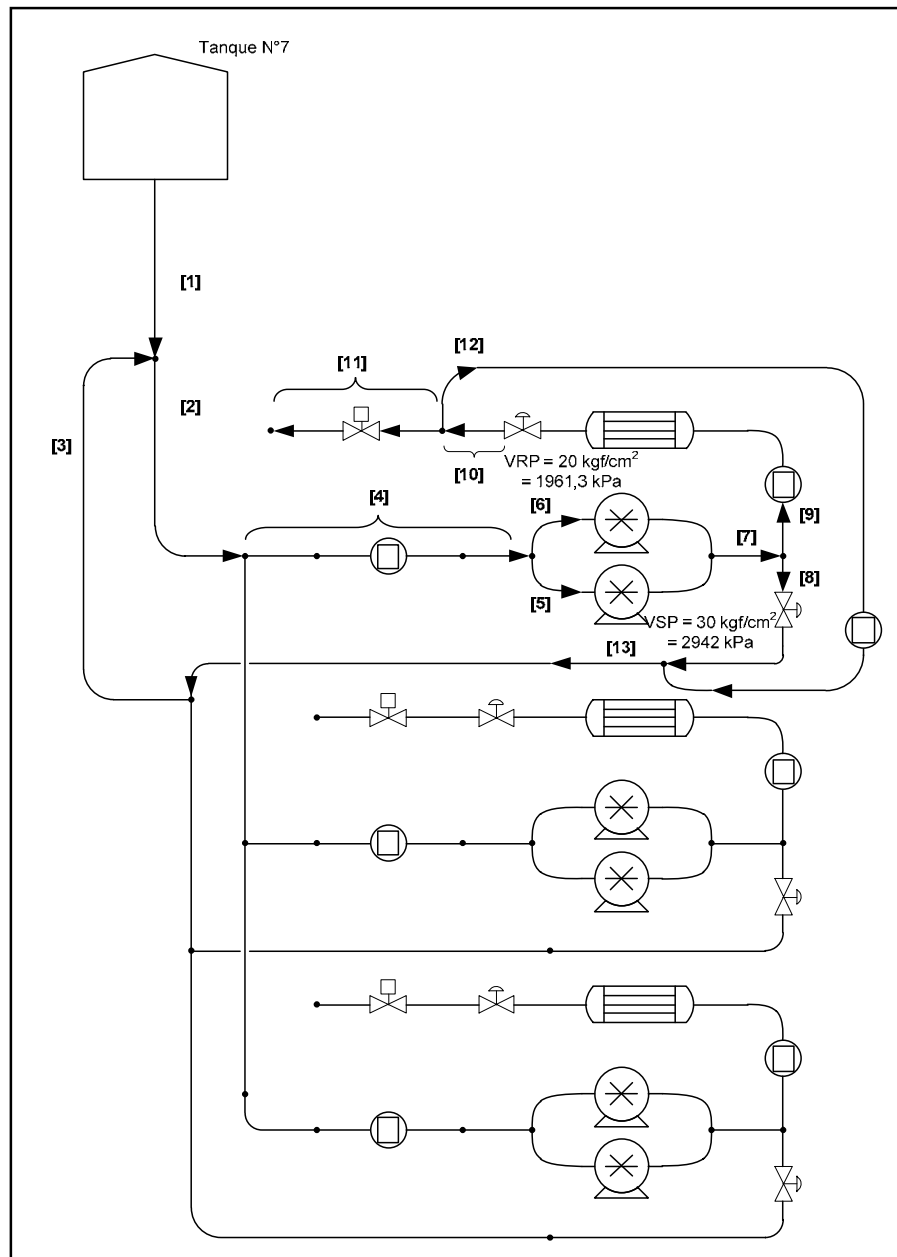


Figura 4.8. Esquema de la red equivalente en caudales para el cuarto caso de estudio por medio del método Hardy-Cross. (Elaboración propia)

Casos de operación a tomar en cuenta:

A bajas cargas.

El consumo de fueloil a bajas cargas de la turbina es pequeño, e incluso llega a ser mínimo, debido a que si existe gas disponible, las unidades pueden ser manejadas a bajas cargas totalmente con gas, el manejo a bajas cargas de las unidades con gas se prefiere antes de quemar fueloil en esas condiciones. El sistema de suministro de combustible líquido se mantiene en funcionamiento para ubicar combustible en “punta” y en condiciones óptimas (de presión y temperatura requisito del quemador) para entrar en servicio en cualquier momento, debido a la variabilidad de la demanda y por tanto de la carga de la turbina (respuesta del sistema de control, al aumentar la demanda de energía automáticamente aumenta la generación, se requiere un mayor flujo de vapor, que implica mayor temperatura en la caldera y por lo tanto un aumento en el consumo de combustible).

La temperatura y presión en las líneas es la misma que en condiciones de operación debido a que se debe cumplir con los permisivos de los quemadores y de las bombas del nivel planta antes de poder colocarlos en servicio, así que indiferentemente del caso o alternativa de servicio la condición debe ser la óptima, a fin de permitir la puesta en servicio en cualquier instante de los quemadores a fueloil.

La temperatura en la línea de retorno es más alta debido a que no se quema fueloil y el flujo de retorno es obviamente mayor, este combustible no quemado retorna y al combinarse con el flujo más frío del tanque se consigue elevar un poco más la temperatura que cuando hay menos flujo de retorno.

Si bien es cierto que si hay gas disponible (lo cual es bastante regular) y el gas disponible es suficiente para operar a bajas cargas las tres unidades, pero cuando la demanda aumenta, el gas no es suficiente y se completa el suministro de combustible a la caldera con fueloil, es importante hacer notar que la operación de la caldera es dual, es decir tiene la capacidad de quemar gas y fueloil al mismo tiempo, pero no en la misma ubicación física (esquina y nivel), es decir un quemador a gas del nivel B

(elevación B) esquina uno (1) operando implica que no es posible operar el quemador de fueloil con la misma ubicación, mientras el de gas este operando.

Así que la operación del sistema de combustible (a bajas cargas) se podría resumir en una bomba del sistema de transferencia y una bomba de alta presión (nivel de bombas) por unidad operando con las otras de respaldo. Esto en condición normal de operación de suministro de combustible líquido a planta por medio del sistema de transferencia, al aumentar la carga es necesario mayor cantidad de combustible por lo que se colocan en servicio más bombas.

Los quemadores tienen permisivo por presión y temperatura del fueloil. Se puede operar sin presión de la línea de vapor de atomización. Las bombas tienen permisivo por medio de la válvula de calentamiento para encendido y apagado de la bomba. Disparo por alta temperatura de la carcasa bomba-motor.

Por debajo de 120 MW la operación es manual en el conjunto caldera-turbina, por la situación actual de la demanda y generación de energía en el país es poco común encontrar días con operación de los equipos a bajas cargas cercano o por debajo de los 200 MW, solo sucede en caso donde es necesario limitar las maquinas por emergencia o servicio en caliente.

A medias cargas.

En general y no como regla sino como modelo, el nivel más bajo de la caldera siempre se enciende y opera con gas, debido al goteo y mala combustión, incapacidad de los sopla tiros llegar tan abajo para eliminar el hollín de los tubos.

Son en total dieciséis quemadores de fueloil y dieciséis quemadores alimentados a gas, ahora bien el total de quemadores encendidos en cualquier momento dado en una caldera no debe ser mayor de 16 sin importar el tipo de combustible. El retorno continúa operando y la temperatura es mucho menor que la condición a baja carga.

A carga máxima.

A carga máxima el número de quemadores en servicio es de 16, si están disponibles y en funcionamiento apropiado, con todos los permisos, restricciones, requisitos y controles pasados y cumplidos.

El flujo por el retorno es menor y depende de la cantidad de bombas en servicio, con dos bombas de alta presión en servicio se cubre el requisito de los 16 quemadores totalmente a fueloil, son solamente necesarias tres bombas del sistema de transferencia para el caso de las tres unidades consumiendo únicamente fueloil y a toda capacidad, es decir dos bombas de alta presión por unidad operando.

El aproximado es de 96 t/h de fueloil para una carga de 400 MW y 16 quemadores a fueloil.

4.3. CARACTERÍSTICAS DEL FUELOIL NÚMERO 6 USADO PARA LA OBTENCIÓN DE VAPOR EN LA PLANTA.

El combustible líquido utilizado en la planta es el comúnmente conocido como fueloil número 6, suministrado por PDVSA. El combustible producido por PDVSA es una mezcla de diferentes residuales ajustado a especificaciones con distintos cortes de refinados intermedios.

Este combustible se elabora a partir de distintos residuos obtenidos en los diversos procesos de refinación, mezclados con fracciones provenientes de la destilación atmosférica, destilación al vacío y componentes livianos del Cracking Catalítico, para obtener la viscosidad requerida. Debido a la presencia de cortes de refinados, presenta características de "Boil Over", siendo esta circunstancia determinante para el diseño de los sistemas de almacenamiento y manejo.

El combustible residual número 6 es un producto de alta viscosidad y alto contenido de azufre que encuentra aplicación en hornos industriales y en calderas diseñadas para quemar combustible residual con alto contenido metálico, también puede usarse eficientemente en quemadores industriales que estén equipados con precalentadores de altas temperaturas.

La EDC tiene una tabla de valores estimados de lo que debe ser el combustible que reciben, para que el proceso de combustión sea lo más eficiente y provechoso posible, sin mencionar el daño al medio ambiente producido por las emisiones de gases producto de una buena o mala combustión.

Es también importante el porcentaje de azufre en el combustible, ya que este pasa a ser un subproducto de la combustión, pudiendo formar ácido sulfúrico dentro de la caldera y deteriorando y acortando la vida de la misma.

A continuación en la tabla 4.1 se presentan los valores típicos de las propiedades para el combustible residual número 6 o fueloil número 6.

Luego, en la tabla 4.2 se presentan las características del combustible utilizadas para el cálculo y diseño del sistema de almacenamiento.

Valores típicos de las propiedades del combustible Fueloil

PROPIEDAD	VALORES
Gravedad API a 15,6 °C	12 °API (promedio)
Punto Inflamación	91,0 °C (promedio)
Viscosidad Cinemática	425 cSt a 50 °C (promedio)
Valor Calorífico	18320 BTU/lb
Presión Vapor	0,6 psia

Tabla 4.1. Valores típicos del combustible Fueloil.
(Fuente: Manual de operación del sistema de combustible)

Especificaciones del Fueloil para la Electricidad de Caracas

Gravedad API	10.0 a 14.0 °API
Viscosidad Cinemática 50 °C	350 a 650 cSt
Gravedad específica a 15,6 °C	No mayor a 1 No menor a 0,9659
Punto de Inflamación	> 65,50 °C
Agua y Sedimentos	< 1,3% V/V
Agua de Destilación	< 1% V/V
Poder Calorífico	> 18.000 BTU/lb
Vanadio	< 450 ppm
Sodio	< 60 ppm
Carbón Conradson	< 15 % en peso
Azufre	< 3% en peso
Cenizas	< 0,1% en peso

Tabla 4.2. Características del combustible utilizadas para el cálculo y diseño del sistema de almacenamiento
(Fuente: Manual de operación del sistema de combustible)

- Características del combustible N° 6 de 650 cSt, suministrado por MARAVEN a La Electricidad de Caracas. Carta OSMT/3-MET-440 del 18/06/1985 (Ver Anexo).
- Carta OSMT/3-MET-440 del 24/01/1986 (Ver Anexo).

4.3.1. VALORES OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS DEL FUELOIL

A continuación se presenta la tabla 4.3 con los valores típicos encontrados en las mediciones y pruebas realizados por los laboratorios que ensayan el combustible suministrado a la planta (laboratorio de la EDC, laboratorio de PDVSA y un tercero contratado para certificar los resultados). Dicha tabla fue facilitada por el personal de los laboratorios de la planta.

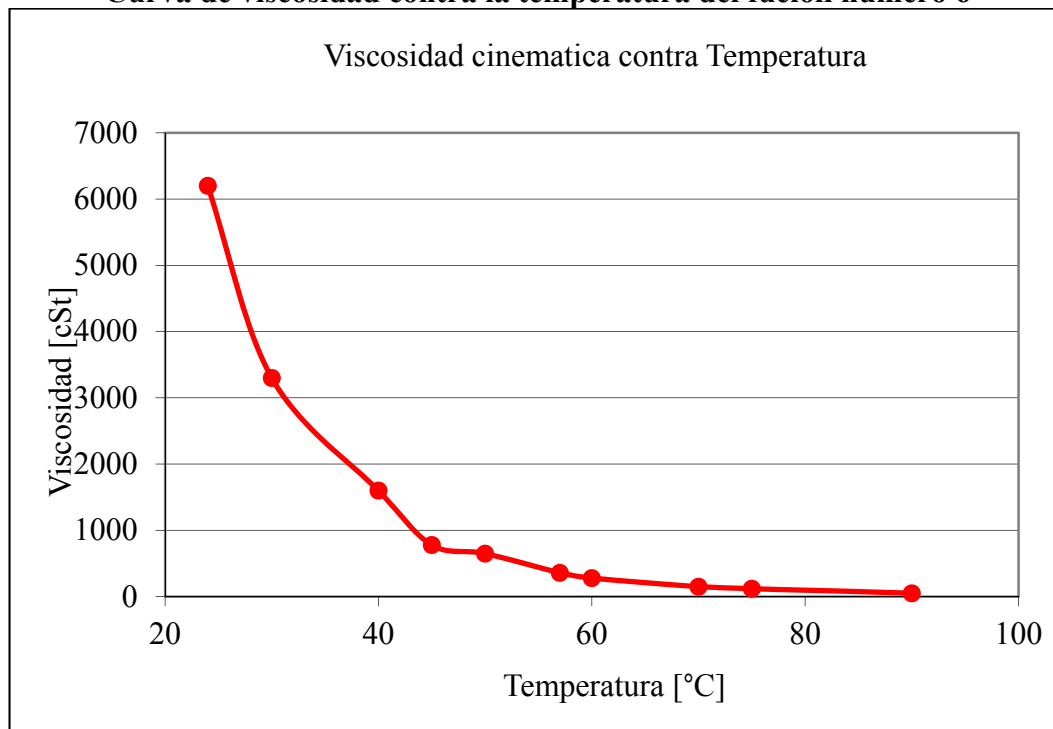
Es importante mencionar que no todos los fueloil's o combustibles residuales tienen las mismas características y propiedades ya que dependen del proceso de elaboración, componentes y porcentajes de mezcla.

Las fechas corresponden a la llegada de tanqueros con el combustible a Tocoa, todos los embarques provienen de la refinería de AMUAY con el combustible para quemar en las calderas.

En el anexo de este trabajo se muestran tablas con más datos respecto a las entregas de combustible, cantidades almacenadas y consumidas de fueloil.

FECHA	PUNTO DE INFLAMACIÓN °C (> 65°C)			API (60° F) 10.0 - 14,0			% AGUA (< 1 %)			VISCOSIDAD (< 650 cSt)			VANADIO (8 < 450 PPM)		AZUFRE (< 2,5%)		PODER CALORIFICO (>1800 BTU/lb)	
	PDVSA	EDC	AIVPET	PDVSA	EDC	AIVPET	PDVSA	EDC	AIVPET	PDVSA	EDC	AIVPET	PDVSA	EDC	PDVSA	AIVPET	PDVSA	AIVPET
30-1-07	91	94	94	12,5	13,2	13,2		0,4	0,5		317	318						
16-2-07	96	96	110	14,8	11,9	11,7	0,4	0,5	0,5	434	476	503	268	265	2,52	2,84	18486	18299
2-4-07	88	96	93	12,3	12,1	12,3	0,4	0,3	0,05	345	356	378	360	319	2,77	2,8	18335	18322
16-4-07	104	99	93	12,8	12,8	12,7	0,4	0,3	0,05	217	229	218	307	270	2,65	2,69	18367	18360
27-4-07	113	114	96	13,1	13,1	12,8	1,2	0,5	1,4	204	237	202	271	319	2,59	2,74	18386	18365
4-5-07	86	99	95	13,4	13,3	13,1	0,7	0,6	0,75	162	211	226	317	243	2,62	2,8	18300	18381
15-5-07	104	101	97	13,8	13,4	13,4	0,3	0,6	0,65	186	201	188	324	318	2,62	2,73		
22-5-07	104	99	105	12,8	12,8	12,7	0,8	0,5	0,5	180	200	205	326	320	2,62	2,72		
3-6-07	102	105	97	11,8	11,7	11,9	0,6	0,9	0,8	250	350	345	417	280	2,56		18250	18400
9-6-07	93	99	96	13,0	12,0	12,0	0,8	0,6	0,6	437	392	330	330	320			18272	18313
23-6-07	91	96	96	13,2	12,4	12,8	0,4	0,5	0,5	444	405	390		310			18294	18402
17-7-07	91	88	97	12,4	12,6	13,8	0,8	0,6	0,8	269	199	100	328	248	2,57	2,51	18346	18428
1-8-07	88	88	100	12,6	12,1	11,7	0,8	1,0	1,1	217	333	318	339	290	2,54	2,75	18358	18301
19-8-07	90	96	94	11,6	11,7	12,3	0,5	0,4	0,7	343	362	276	389	310	2,73	2,67	18296	18336
31-8-07	78	88	88	11,3	11,4	11,3	0,4	0,25	0,4	401	445	443	446		2,74	2,79	18278	18277
1-8-07	87	88	99	12,6	12,1	11,7	0,8	1	1	217	333	318	339		2,54	2,75	18.358	18.301
7-8-07	89	85	102	11,5	12,3	12,3	0,4	0,1	0,65	378	340	306	369	320	2,69	2,7	18.310	18.337
19-8-07	90	96	94	11,6	11,7	12,3	0,5	0,4	0,7	343	362	376	389	310	2,73	2,67	18.296	18.338
1-9-07	81	88	88	11,3	11,3	11,3	0,4	0,25	0,4	401	445	442	446		2,74	2,79	18.278	18.277
22-9-07	87	88	88	12	11,8	11,8		0,1	0,1	601	590		302		2,57		18.330	18.332
3-10-07	86	86	87	12,2	12,8	12,3	0,5	0,4	0,55	390	390	388	469		2,72		18.331	18.337
16-10-07	84	88	87	13,2	13,8	12,6		0,8	0,5	575	300	612	442		2,62	2,7	18.331	18.354
27-10-07	83	90	84	12,3	12,1	12		0,8	0,85	567	604	557	463		2,61	2,72	18.278	18.319
3-11-07	88	91	94	13,3	13,3	13,4		0,3	0,15	574	534	568	453		2,58	2,68		18.395
13-11-07	70	74	77	14,1	14,2	13,5		0,4	0,3	244	392	381	463		2,54	2,67		18.407
28-11-07	93	83	96	12,7	12,7	12,7		0,5	0,65	538	557	517	428		2,66	2,7		18.343
1-12-07	91	90	91	12,9	13,2	13,2	0,3	0,5	0,5	336	318	318	427		2,6	2,6	18.378	18.359
11-12-07	94	85	94	13	13,2	13,5		0,8	0,5	476	373	267	448		2,49	2,54		18.393
21-12-07	90	79	90	12,1	12,1	12,1		0,6	0,8	553	536	492	431	398	2,53	2,62	18.329	18.327
17-1-08	90	93	85	12,7	12,3	12,4	0,4	0,7	0,7	444	423	412	419	292	2,46	2,6	18.366	18.345
28-1-08	94	96	96	12,7	12,3	12,3	0,9	0,7	1	444	542	514	427	332	2,57	2,67	18.363	18.337

Curva de viscosidad contra la temperatura del fueloil número 6



Temperatura [°C]	24	30	40	45	50	57	60	70	75	90
Viscosidad cinemática [cSt]	6200	3300	1600	780	650	360	280	150	120	52

Grafico 4.1. Curva de viscosidad contra la temperatura del fueloil.

(Fuente tabla: Manual de operación del sistema de combustible)

(Gráfica elaboración propia)

4.4. DATOS DE DISEÑO Y PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LOS EQUIPOS Y COMPONENTES DEL SISTEMA DE COMBUSTIBLE.

A continuación se presentan las principales valores característicos de los equipos que conforman el sistema de manejo, almacenamiento, suministro y trasiego de combustible líquido en la planta, entiéndase los datos de placa de los equipos, datos de diseño y demás parámetros de operación. Estos son:

- Bombas de combustible (tanque n.º 10, nivel 26 y bombas de la caldera)
- Calentadores de combustible – Intercambiadores de calor
- Tanques
- Filtros

Es importante mencionar que la recopilación y levantamiento de la información que se presenta a continuación, fue debida al esfuerzo de buscar e indagar sobre los datos de los equipos; dichos valores fueron obtenidos del manual de operación del sistema de combustible, de informes y reportes publicados por los fabricantes de los equipos, de las hojas de datos de los equipos y de las placas de identificación de los equipos. Tarea ardua debido al tiempo que tienen los equipos en uso y la falta de resguardo y registro de los documentos técnicos de estos equipos.

Las tablas de datos de los equipos fueron elaboradas en base a la data recopilada, de allí y para fines del presente trabajo se construyeron las respectivas las gráficas mostradas a continuación.

4.4.1 CALENTADORES DE COMBUSTIBLE

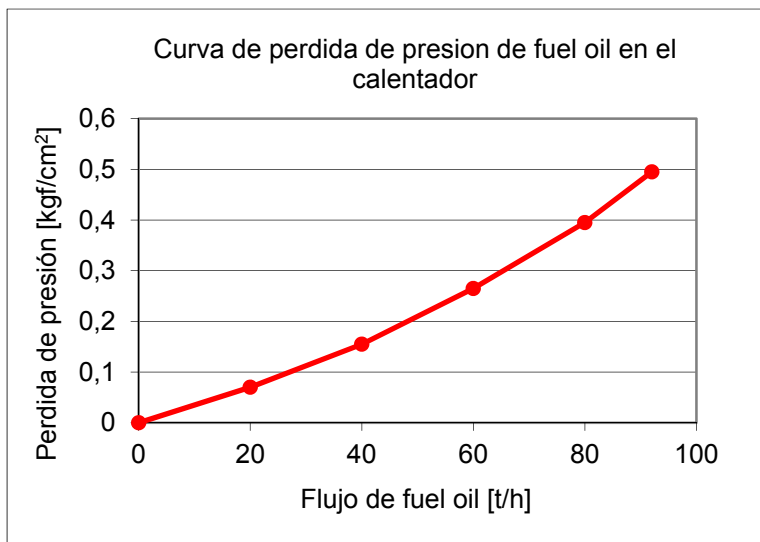
Intercambiadores de calor (calentadores de fueloil) de la estación de combustible de alta presión de la caldera

Fabricante: SEO KOATSU KOYGO CO LTD
 Cantidad: 6 (2 por unidad)
 Superficie por carcaza 235 m²
 De tubos en U, con vapor en los tubos

Etiquetas
FU7EX01-02
FU8EX01-02
FU9EX01-02

Datos de placa y diseño	Lado de la carcaza	Lado del tubo
Flujo circulante	Fueloil	Vapor
Caudal [kg/h]	92000	9784
Presión de operación [kgf/cm ² man]	---	22,5
Temperatura de entrada [°C] (diseño)	75	680,1 Kcal/kg
Temperatura de salida [°C] (diseño)	170	219,66
Temperatura de entrada [°C] (actual)	50 - 60	
Temperatura de salida [°C] (actual)	100 - 120	
Presión de diseño [kgf/cm ² man]	88	26,5
Temperatura de diseño [°C]	200	250
Número de pasadas	1	2
Corrosión permitida [mm]	1,6	1,6
Presión hidrodinámica [kgf/cm ² man]	132	39,75
Pérdida de presión [kgf/cm ²]	0,5 (valor de pérdida de diseño)	

Tabla de datos de pérdida de presión contra flujo de fueloil en el calentador



Flujo de fueloil [t/h]	Pérdida de presión [kgf/cm ²]
0	0
20	0,07
40	0,155
60	0,265
80	0,395
92	0,495

Intercambiadores de calor (calentadores de fueloil) de la estación de bombeo de combustible del sistema de transferencia

Fabricante Manning & Lewis engineering
Cantidad: 4 (2 pares)

Etiquetas
FU78EX07 - FU78EX08 (Sistema de transferencia)
FU78EX09 - FU78EX10 (Suministro tanque 10)

Datos de placa y diseño	Lado de la carcaza	Lado del tubo
Fluido	Fueloil n.º 6	Vapor
Rata de flujo [t/h]	172	4,2
Temperatura de entrada [°C]	30	225
Temperatura de salida [°C]	55	225
Temperatura de diseño [°C]	60	250
Presión de diseño [bar]	20	26
Presión de operación [bar]	18	25
Velocidad [m/s]	0,113	-
Pérdida de presión [kgf/cm ² man]	0,51	0,07
Transferencia de calor [kcal/h]	1.866.609	
Número de pasos	1	2

4.4.2 BOMBAS DEL SISTEMA DE TRANSFERENCIA

Bombas de la estación de bombeo de combustible del sistema de transferencia

Bombas de desplazamiento positivo tipo doble tornillo
 Condición: 3 en servicio una en alerta
 Cantidad: 4 en total (a la fecha una fuera de servicio)
 Fabricante: ALLWEILER HUOTLIN
 Números de serie: 31973 - 28680 - 28681 - 28682
 Año de construcción: 1983

Etiquetas
FU78PP05
FU78PP06
FU78PP07
FU78PP08

Datos de placa y diseño	Valores	
	Desde	Hasta
Tipo	216.150/092.500.40	
Capacidad [m ³ /h]	140	145
Viscosidad [mm ² /s] ó [cSt]	a 30°C - 3300	
Velocidad de giro [rpm]	1150	
NPSH requerido [m]	7	8
Temperatura de bombeo [°C]	30	83
Temperatura de diseño [°C]	120	
Presión de descarga [bar]	15	
Presión de succión [bar]	0,9	
Carga total manométrica [bar]	14	
Potencia requerida bomba [kW]	92	
Presión prueba hidrostática [bar]	21	
Eficiencia [%]	60	

Diámetro de la brida de succión 10" (250 mm) ASA 300 RF (ANSI B 16,5)

Diámetro de la brida de descarga 10" (250 mm) ASA 300 RF (ANSI B 16,5)

Datos de placa motor de la bomba

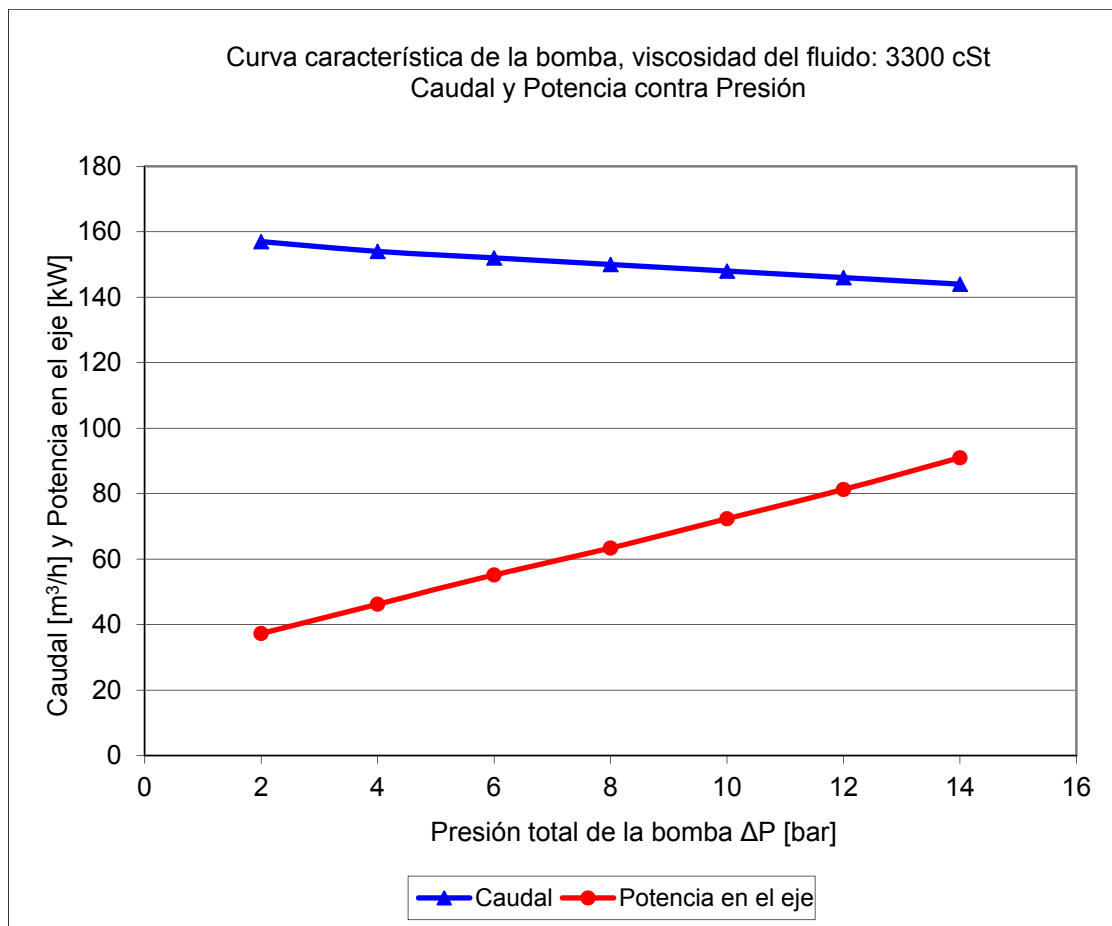
Motor fabricante: ELIN UNION

Número serial del fabricante	701261	Motor	
Serial del motor	Mot-Mkg 935 J06 F98	Carga %	100
Potencia del motor [kW]	110	Effic. %	92,5
Voltaje [V]	460 Trifásico (60 Hz)	Corriente [A]	323
Total pérdidas [kW]	7,15	Factor Potencia	0,8
Torque a carga total [kgf.m]	89	Velocidad	1188
Número de polos	4		
Velocidad de embalamiento [rpm]	1425,6 (20%)		

Detalles de la curva de la bomba

Datos de la curva característica proporcionada por el fabricante de las bombas ubicadas en la estación de bombeo de combustible del sistema de transferencia

Q [m ³ /h]	157	154	152	150	148	146	144
ΔP [bar]	2	4	6	8	10	12	14
Ni [hp]	50	62	74	85	97	109	122
Ni [kW]	37,3	46,2	55,2	63,4	72,3	81,3	91,0



4.4.3 BOMBAS DEL TANQUE N° 10

Estación de bombeo de combustible del tanque n.º 10

Bombas de desplazamiento positivo tipo doble tornillo (twin screw pumps)
 Condición: 3 en servicio y una de respaldo
 Cantidad: 4 en total
 Fabricante: BORNEMANN PUMPS
 Números de serie: 70494-95-96-97

Etiquetas
FU10PP17
FU10PP18
FU10PP19
FU10PP20

Datos de placa y diseño	Valores	
	Desde	Hasta
Tipo de bomba (modelo)	W7T.3z-67	
Temperatura °C	30	57
Viscosidad [mm ² /s]	370	3300
Densidad [kg/dm ³]	0,97	
Presión de vapor [bar]	0,02	
Sólidos [%]	1,3	
Tamaño grano [mm]	0,8	
Capacidad [m ³ /h]	145	155
Presión a la succión [bar]	0,8	2,7
Presión a la descarga [bar]	30,3	
Presión diferencial [bar]	29,5	27,6
Velocidad [rpm]	1185	
Potencia en el eje [kW]	185	208 (*)
Potencia del motor [kW]	250	
NPSH requerido [m]	2,7	

(*) 208 kW a 3300 cSt y una presión diferencial de 29,5 bar
 Diámetro de la brida de succión 10" (250 mm) 150 lb (ANSI B 16,5)
 Diámetro de la brida de descarga 10" (250 mm) 300 lb (ANSI B 16,5)

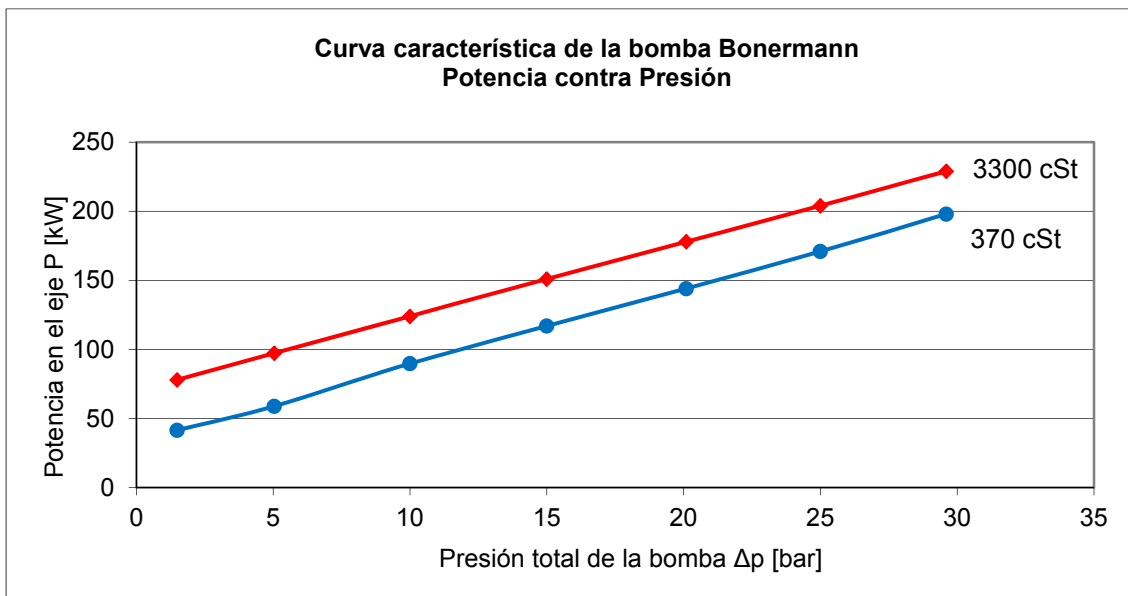
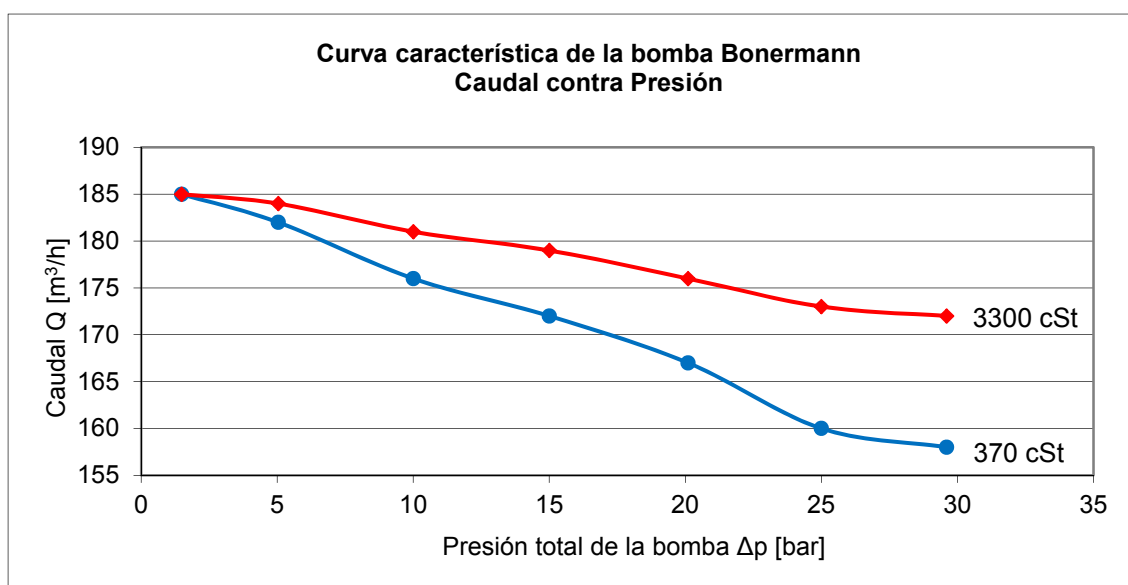
Datos de placa motor de la bomba

Fabricante	Loher
Tipo de motor (modelo)	ANGK-355 LB-06
Serial del motor	5123011-12-13-14
Potencia motor [kW]	250
Velocidad [rpm]	1180
Voltaje [V]	460 Trifásico (60 Hz)
Corriente [A]	380
Temperatura ambiente [°C]	40
Incremento de temperatura [°C]	60
Cos φ / Factor de Potencia	0,86

Detalles de la curva de la bomba

Datos de las pruebas de las bombas de la estación de bombeo del tanque n.º 10

N r	n rpm	Visc mm ² /s	T °C	ps bar	pd bar	Δp bar	Q m ³ /h	M Nm	P kW	n rpm	Visc mm ² /s	Q m ³ /h	P kW
1	1186	370	31,6	0,19	1,68	1,49	185	334	41,5	1185	3300	185	78
2	1184	370	31,8	0,23	5,26	5,04	182	475	58,9	1185	3300	184	97,3
3	1185	370	31,8	0,29	10,3	10	176	723	89,8	1185	3300	181	124
4	1185	370	32,0	0,36	15,4	15	172	944	117	1185	3300	179	151
5	1186	370	32,2	0,45	20,5	20,1	167	1161	144	1185	3300	176	178
6	1187	370	32,4	0,52	25,6	25	160	1380	171	1185	3300	173	204
7	1185	370	32,4	0,55	30,1	29,6	158	1597	198	1185	3300	172	229



4.4.4 BOMBAS DE ALTA PRESIÓN DE LA CALDERA

Bombas de la estación de bombeo de combustible de alta presión de la caldera

Bombas de desplazamiento positivo tipo doble tornillo
 Condición: 2 en servicio y una en alerta (por unidad)
 Cantidad: 3/Caldera, Total: 9 bombas
 Fabricante: KOSAKA LABOATORY LTD

Etiquetas
FU7PP01-02-03
FU8PP01-02-03
FU9PP01-02-03

Datos de placa y diseño	Valores	
	Desde	Hasta
Tipo	GH-60-1056	
Capacidad en [m ³ /h] a 120 [cSt]	58	
Presión de descarga en [kgf/cm ² man]	34	
Presión a la succión [kgf/cm ² man]	10	15
Delta de presión total [kgf/cm ² man]	24	19
Número de revoluciones [rpm]	1200	
Potencia del Motor [kW]	110	
Viscosidad [cSt]	25	780
Temperatura de entrada del Fueloil n.º 6 [°C]	48	74
Ajuste de la válvula de seguridad [kgf/cm ² man]	3,6	11
Presión dif. válvula de cierre [kgf/cm ² man]	40	
Fecha de fabricación	Marzo de 1988	

Diámetro de la brida de succión 8".

Diámetro de la brida de descarga 6".

Datos de placa del motor de la bomba

Motor trifásico de inducción a la intemperie

Tipo SF-E Código HERRTIZUO 60	Rotor Jaula	Norma: NEMA
Régimen: continuo Armazón 355L	6 Polos	Clase aislamiento B
Temperatura Ambiente 40 °C	Voltios 4160	110 KW
Limite aumento de temperatura 80 °C	RPM 1170	Corriente 19 A
Fecha de fabricación marzo de 1977	Factor de potencia 0,80	

Mitsubishi Electric Corporation Japan

Datos de diseño y selección de las bombas de la estación de bombeo de combustible de alta presión de la caldera, según manual del generador de vapor Mitsubishi Heavy Industries - MHI

Capacidad de la bomba	
Temperatura de entrada del combustible [°C]	50
Gravedad específica del combustible	0,9554
Max. Consumo de combustible [kg/h]	90,79
Flujo hacia la caldera [m ³ /h]	95,93
Número de bombas en servicio	2
Capacidad de la bomba (60% Flujo m ³ /h)	57

Presión de descarga de la bomba (Atomización por vapor)	
Presión de suministro a la caldera [kgf/cm ² man]	21
Caída de presión (Descarga bomba ~ quemador) [kgf/cm ²]	7,5
Margen [kgf/cm ²]	2,5
Presión de descarga [kgf/cm ² man]	31

Capacidad el motor	
Condición de operación de la bomba	Válv. seg. abierta
Método de atomización del quemador	Vapor
Viscosidad del fluido a la succión de la bomba [cSt]	780
Presión descarga de la bomba [kgf/cm ² man]	36
Potencia al freno [kW]	115
Margen %	4,3
Capacidad del motor seleccionado [kW]	120
Eficiencia del motor [%]	95

Según carta anexa de Mitsubishi Heavy Industries (MHI) anexa al final de este informe.

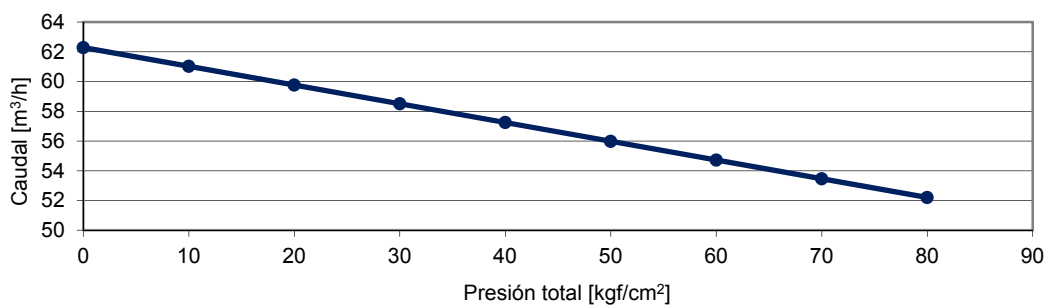
Si la presión de descarga es de 24 kgf/cm² la mínima presión a la succión permisible será de 0 kgf/cm².

Detalles de la curva de la bomba

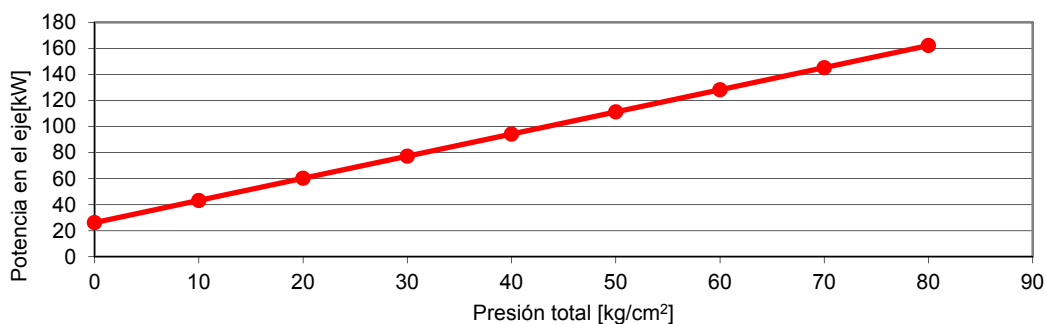
Datos de la curva característica proporcionada por el fabricante de las bombas de la estación de bombeo de combustible de la caldera (combustible a 300 cSt)

Viscosidad del Fueloil n°. 6 [cSt]	300								
Presión total [kgf/cm ²]	0	10	20	30	40	50	60	70	80
Caudal [m ³ /h]	62	61	60	59	57	56	55	53	52
Eficiencia de la bomba [%]			58	65	69	71	72	73	72
Potencia eje de la bomba [kW]	26	43	60	77	94	111	128	145	162

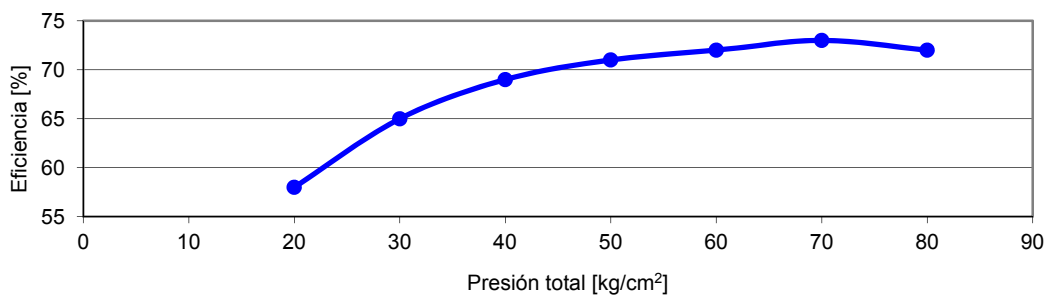
Curva característica de la bomba de combustible de alta presión de la caldera



Curva característica de la bomba de combustible de alta presión de la caldera



Curva característica de la bomba de combustible de alta presión de la caldera



4.4.5 FILTROS DE COMBUSTIBLE

Filtros a la descarga de las bombas de la estación de bombeo del tanque 10

Fabricante: Plenty products, Inc
 Modelo: MDTM 4170-3 16" 300# Model 150
 Cantidad: 8 filtros (2 filtros por bomba)
 Condición: 1 filtro en servicio y otro en alerta
 Tipo cesta dúplex vertical
 Año de construcción: 1997

Etiquetas	
FUFR17A - FUFR17B	
FUFR18A - FUFR18B	
FUFR19A - FUFR19B	
FUFR20A - FUFR20B	

Datos de placa y diseño	Valores	
	Desde	Hasta
Temperatura de diseño [°C]	120	
Presión máxima de trabajo permisible (MAWP) [psi]	580	
Presión de diseño [bar man]	30,88	
Área de filtrado (por cesta) [m ²]	1,64	
Caudal de operación [m ³ /h]	148	
Gravedad específica del fluido	0,97	
Caída de presión (filtro limpio) [bar man]	0,8	
Caída de presión máxima operacional [bar man]	1,2	
Presión de operación [bar man]	8	10
Temperatura de operación [°C]	24	57
Viscosidad máxima y mínima [cSt]	6200	360
Señal de alarma de limpieza [bar man]	1,2	
Señal de alarma de alta caída de presión [bar man]	1,5	

Filtros a la succión de las bombas de la estación de bombeo del tanque n.º 10

Filtros tipo cono
 Cantidad 4 (1 por bomba)
 Máxima caída de presión admisible: 1 [psi] = 0,07 [bar man]

Etiquetas	
FUFR13	FUFR14
FUFR15	FUFR16

Filtros a la succión de las bombas de la estación de bombeo de alta presión caldera

Cantidad: 6 filtros (2 por unidad)
 Tipo: cesta dúplex

Etiquetas
FU7FR01-02
FU8FR01-02
FU9FR01-02

Datos de placa y diseño	Valores
Capacidad [m ³ /h] (por cedazo)	140
Relación de área	11,14:1
Malla	250 (malla 60)
Pérdida de presión [kgf/cm ² man] (malla tapada en 70%)	0,2
Presión de diseño [kgf/cm ² man]	15,5
Temperatura de diseño [°C]	100
Tamaño brida de entrada y salida	ANSI 150 libras, 250 mm

Filtros a la descarga de las bombas de la estación de bombeo de alta presión caldera

Cantidad: 6 filtros (2 por unidad)
 Tipo: cesta
 Máxima caída de presión admisible: 0,2 [kgf/cm² man]

Etiquetas
FU7FR03-A / FU7FR03-B
FU8FR03-A / FU8FR03-B
FU9FR03-A / FU9FR03-B

Filtros ubicados en la línea de retorno de combustible no quemado de la caldera

Cantidad: 3 filtros (1 por unidad)
 Tipo: cesta
 Máxima caída de presión admisible: 0,2 [kgf/cm² man]

Etiquetas
FU7FR04
FU8FR04
FU9FR04

Filtros a la succión de la estación de bombeo de combustible del sistema de transferencia (Nivel +26)

Fabricante: BOLL & KIRCH

Número del modelo: 2.62.9.520.1000.8.300

Cantidad: 4 filtros (1 filtro doble por bomba)

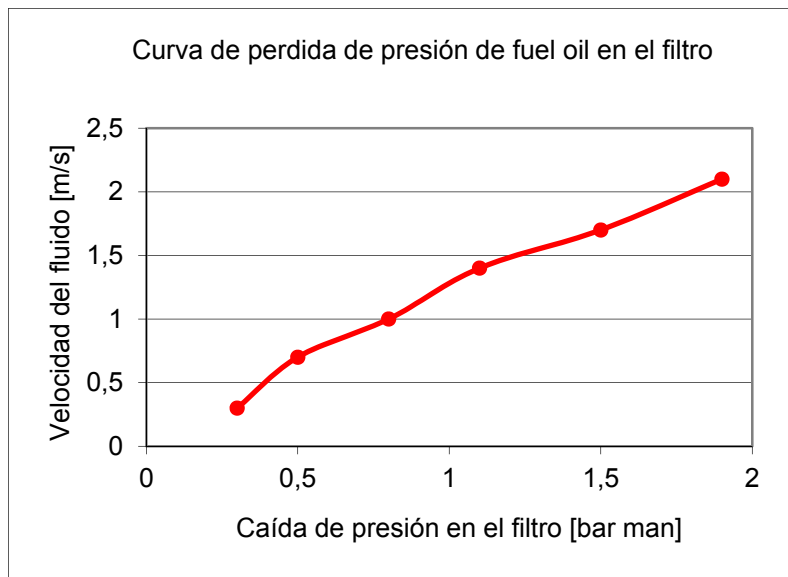
Tipo: dúplex

Etiquetas	
FU78FR05	FU78FR06
FU78FR07	FU78FR08

Datos de placa y diseño	Valores
Capacidad máxima [kg/h]	145000
Tamaño de malla [mm]	0,5
Temperatura mínima en sitio [°C]	26
Temperatura de operación [°C]	30
Máxima presión de operación [bar]	3
Temperatura máxima permisible [°C]	50
Prueba hidrostática [bar]	13
Temperatura de diseño [°C]	120
Presión de diseño [bar]	10
Área total de filtrado [cm ²]	16435
Tamaño Brida de entrada	300 Flanged
Tamaño Brida de salida	300 Flanged

Curva del filtro sistema de transferencia

v [m/s]	DP [bar]
2,1	1,9
1,7	1,5
1,4	1,1
1	0,8
0,7	0,5
0,3	0,3



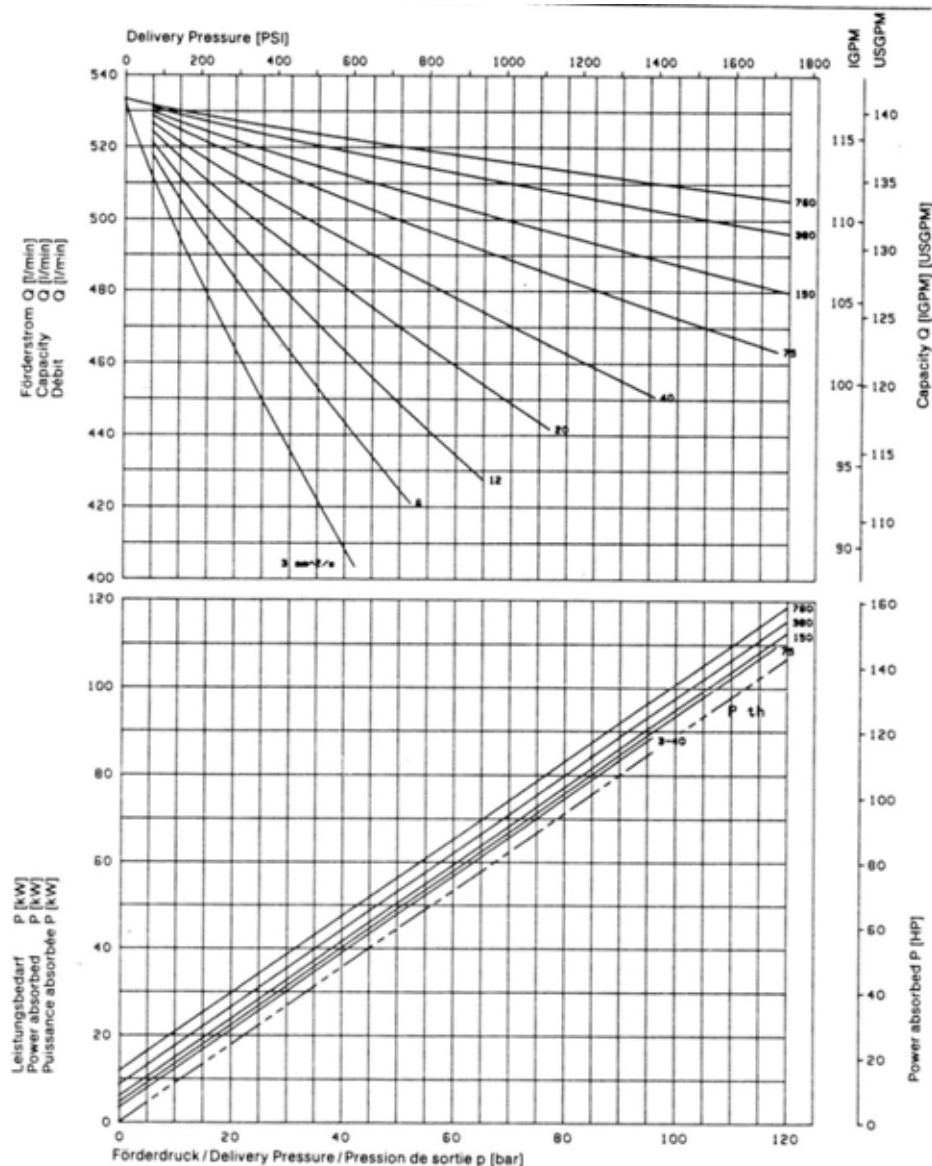
4.4.6 BOMBAS DE ARRECIFE

Bombas de la estación de bombeo de combustible de la Planta Arrecife

Fabricante/ marca: ALLWEILER	Motor ASEA
Potencia = 54 kW = 72,42 hp	n = 1760 rpm
Q = 485-517 L/min = 0,008 m ³ /s = 128,1 gpm	Voltaje = 440 Volts
$\Delta P = 50 \text{ bar} = 725,2 \text{ psi} = 5 \text{ MPa}$	Corriente = 121 A
$v = 37 - 380 \text{ mm}^2/\text{s} \text{ (cSt)}$	Factor de Potencia = 0,87

Detalles de la curva de la bomba

Curva característica proporcionada por el fabricante de las bombas



4.4.7 DATOS DE LOS TANQUES DEL SISTEMA

Tanques de almacenamiento de combustible líquido Fueloil 6 de la planta JJSB

Capacidad de almacenamiento en los tanques de fueloil número 6

Cantidad: 4 tanques.

Ubicación: 3 en la quebrada de Arrecifes y 1 en la explanada oeste.

Características

Tanque número	Altura de referencia [m]	Altura máxima de llenado [m]	Volumen total [m³]	Volumen muerto [m³]	Volumen útil [m³]
4	12,735	11,35	5107,9	432,285	4675,649
6	12,583	11,95	5290,0	348,498	4919,218
7	12,560	11,90	5251,0	290,787	4938,136
10	21,270	20,50	24403,4	1950,285	22453,114

Capacidad total de almacenamiento del complejo	40052,3 metros cúbicos
	251528,6 barriles

Volumen útil total almacenado del complejo	36986,12 metros cúbicos
	232272,8 barriles

1 barril de petróleo equivale a $0,15899 \text{ m}^3$, por lo que 1 m^3 equivale a 6,289 barriles.

Tanque número	Altura de referencia [m]	Radio del tanque [m]	Altura máxima de llenado [m]	Altura máxima de vaciado (boca de descarga) [m]	Volumen total [m³]
4	12,735	11,9	11,35	0,77	5107,9
6	12,583	11,9	11,95	0,77	5290,0
7	12,560	11,9	11,90	0,77	5251,0
10	21,270	19,5	20,50	0,86	24403,4

Alturas con referencia al piso del tanque.

Capacidad de los tanques para el almacenamiento
del Fuel Oil #6 existentes en el CGJJSB

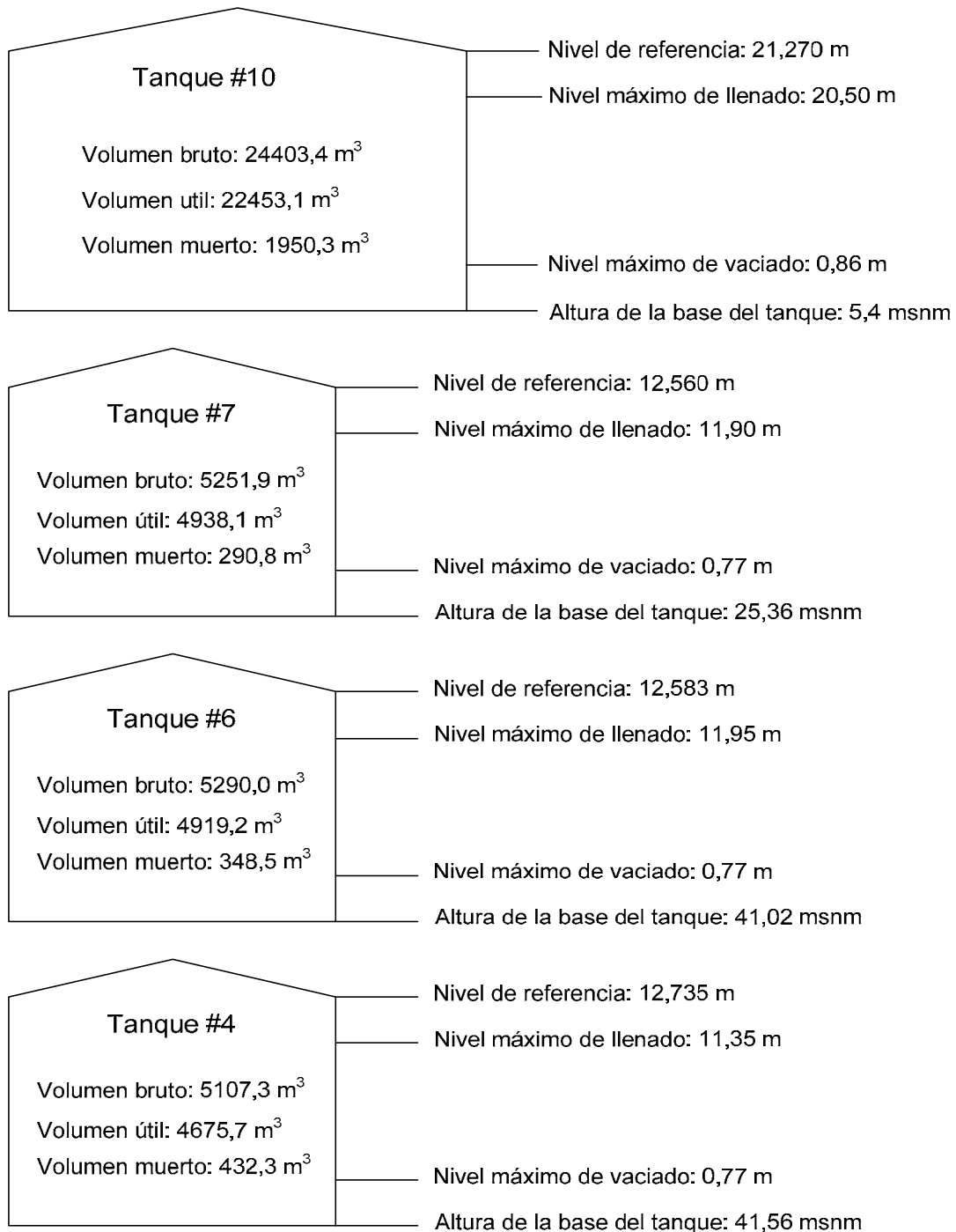


Figura 4.9. Capacidad y niveles de los tanques de almacenamiento de fueloil.
(Elaboración propia)

4.5. DATOS DE LA RED DE TUBERÍAS Y ACCESORIOS

Adicional a la data asociada a los parámetros de diseño, operación y funcionamiento de los equipos y accesorios del sistema que presentados anteriormente en este trabajo, se realizó un levantamiento planimétrico de las líneas de tuberías en la planta.

Resultado de este levantamiento se completó la información para elaborar los planos del sistema de combustible presentados en este trabajo.

A continuación se presentan tabulados los datos de las tuberías y los accesorios en ella dispuestas, las tuberías se identifican con las etiquetas asignadas a cada una, las cuales tienen la siguiente nomenclatura: las dos primeras siglas son FU, seguido de un número continuo asignado a la tubería, luego el diámetro en pulgadas de la tubería y por último el “*schedule*” o espesor de la tubería.

Se presentan las tablas con los datos de las tuberías: nombre, diámetro, diámetro interno y longitud de la tubería. Se muestran y cuantifican los accesorios presentes en la tubería: codos de 90° y codos de 45°, derivación de flujo o “te”, válvulas, reducciones y expansiones, entradas o salidas, altura con respecto al nivel de mar del inicio y fin del tramo de tubería.

Se muestran divididos por caso de estudio, según los esquemas propuestos anteriormente en este mismo capítulo.

Es importante mencionar que las tablas a continuación fueron elaboradas por el autor de este trabajo, a partir de los datos recopilados en la planta, en el marco de la elaboración de este trabajo y con el fin de cumplir con los objetivos aquí propuestos.

Tabla 4.4 Datos de las tuberías de fuel oil para el primer caso: Trasegado de combustible del tanque n.º 10 a los tanques de almacenamiento diario

Nombre de la línea	FU-200-16"	FU-201-16"	FU-215-10"	FU-215-10"	FU-215-10"	FU-252-16"	FU-253-16"	FU-256-16"	FU-257-16"	FU-258-20"
Temperatura	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C
Viscosidad	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt
Tamaño nominal [inch]	16	16	10,75	10,75	10,75	16	16	16	16	20
Tamaño diámetro interno	15,25	15,25	10,02	10,02	10,02	15,25	15,25	15,25	15,25	19,25
Longitud de tubería recta [m]	515,7	515,3	207,3	127,2	71,7	187,3	188,6	13,4	37,9	23,7
Codos 90°	32	28	14	11	9	15	18	3	3	0
Codos 45°	7	9	8	6	4	4	2	1	1	0
"T" de flujo en línea	1	1	2	1	0	1	1	1	1	7
"T" de flujo derivado	1	1	1	2	2	0	0	1	1	0
Válvulas de compuerta	1	1	2	2	2	1	1	0	0	0
Válvula de retención	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Reducciones o Expansiones	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Entrada o Salida	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0
Válvula de Control	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Altura de entrada [msnm]	7,1	7,1	24,6	24,6	24,6	7,0	7,0	4,2	4,2	4,2
Altura de salida [msnm]	24,6	24,6	41,9	41,6	26,0	7,0	7,0	7,0	7,0	4,2

Nombre de la línea	FU-259-12"	FU-260-12"	FU-261-12"	FU-262-12"	FU-263-8"	FU-264-10"	FU-265-10"	FU-266-10"	FU-267-10"	FU-268-16"
Temperatura	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C
Viscosidad	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt
Tamaño nominal [inch]	12,75	12,75	12,75	12,75	8,625	10,75	10,75	10,75	10,75	16
Tamaño diámetro interno	12	12	12	12	7,981	10,02	10,02	10,02	10,02	15,25
Longitud de tubería recta [m]	5,6	5,6	5,6	5,6	8,4	4,3	4,3	4,3	4,3	2,9
Codos 90°	2	2	2	2	6	5	5	5	5	0
Codos 45°	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
"T" de flujo en línea	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0
"T" de flujo derivado	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0
Válvulas de compuerta	1	1	1	1	2	1	1	1	1	0
Válvula de retención	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
Reducciones o Expansiones	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
Entrada o Salida	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Válvula de Control	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
Altura de entrada [msnm]	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2
Altura de salida [msnm]	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	5,2	5,2	5,2	5,2	4,2

Cont. Datos de las tuberías de fuel oil para el primer caso: Trasegado de combustible del tanque n.º 10 a los tanques de almacenamiento...

Nombre de la línea	FU-269-16"	FU-270-16"	FU-271-16"	FU-272-16"	FU-273-16"	FU-274-16"	FU-275-16"	FU-276-30"	FU-277-20"	FU-278-20"
Temperatura	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C
Viscosidad	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt
Tamaño nominal [inch]	16	16	16	16	16	16	16	30	20	20
Tamaño diámetro interno	15,25	15,25	15,25	15,25	15,25	15,25	15,25	29,25	19,25	19,25
Longitud de tubería recta [m]	2,3	2,3	2,9	6,0	2,2	2,2	6,0	19,8	37,8	43,9
Codos 90°	0	0	0	5	1	1	5	1	1	2
Codos 45°	0	0	0	0	0	0	0	1	3	2
"T" de flujo en línea	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0
"T" de flujo derivado	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1
Válvulas de compuerta	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1
Válvula de retención	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Reducciones o Expansiones	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Entrada o Salida	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Válvula de Control	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Altura de entrada [msnm]	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	5,1	6,0	6,0
Altura de salida [msnm]	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	5,1	5,1

Nombre de la línea	FU-279-20"
Temperatura	30 °C
Viscosidad	3300 cSt

Tamaño nominal [inch]	20
Tamaño diámetro interno	19,25
Longitud de tubería recta [m]	52,3

Codos 90°	2
Codos 45°	2
"T" de flujo en línea	0
"T" de flujo derivado	1
Válvulas de compuerta	1
Válvula de retención	0
Reducciones o Expansiones	0
Entrada o Salida	1
Válvula de Control	0

Altura de entrada [msnm]	6,0
Altura de salida [msnm]	5,1

Tabla 4.5 Datos de las tuberías de fuel oil para el segundo caso: Bombeo de combustible del Tanque n.º 10 a las calderas de las unidades 7, 8 y 9.

Nombre de la línea	FU-200-16"	FU-201-16"	FU-201-16"	FU-201-16"	FU-252-16"	FU-253-16"	FU-254-10"	FU-256-16"	FU-257-16"	FU-258-20"
Temperatura	30 °C	30 °C	30 °C	60 °C	30 °C	30 °C	50 °C	30 °C	30 °C	30 °C
Viscosidad	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	280 cSt	3300 cSt	3300 cSt	650 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt
Tamaño nominal [inch]	16	16	16	16	16	16	10,75	16	16	20
Tamaño diámetro interno	15,25	15,25	15,25	15,25	15,25	15,25	10,02	15,25	15,25	19,25
Longitud de tubería recta [m]	561,4	560,4	106,1	448,2	187,3	188,6	1345,9	13,4	37,9	23,7
Codos 90°	32	32	11	32	15	18	104	3	3	0
Codos 45°	9	9	0	12	4	2	32	1	1	0
"T" de flujo en línea	2	2	0	0	1	1	1	1	1	7
"T" de flujo derivado	1	1	0	1	0	0	2	1	1	0
Válvulas de compuerta	2	2	0	1	1	1	4	0	0	0
Válvula de retención	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Reducciones o Expansiones	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Entrada o Salida	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Válvula de Control	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Altura de entrada [msnm]	7,1	7,1	30,6	26,7	7,0	7,0	13,4	4,2	4,2	4,2
Altura de salida [msnm]	30,6	30,6	26,7	13,4	7,0	7,0	4,2	7,0	7,0	4,2

Nombre de la línea	FU-259-12"	FU-260-12"	FU-261-12"	FU-262-12"	FU-263-8"	FU-264-10"	FU-265-10"	FU-266-10"	FU-267-10"	FU-268-16"
Temperatura	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C
Viscosidad	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt
Tamaño nominal [inch]	12,75	12,75	12,75	12,75	8,625	10,75	10,75	10,75	10,75	16
Tamaño diámetro interno	12	12	12	12	7,981	10,02	10,02	10,02	10,02	15,25
Longitud de tubería recta [m]	5,6	5,6	5,6	5,6	8,4	4,3	4,3	4,3	4,3	2,9
Codos 90°	2	2	2	2	6	5	5	5	5	0
Codos 45°	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
"T" de flujo en línea	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0
"T" de flujo derivado	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0
Válvulas de compuerta	1	1	1	1	2	1	1	1	1	0
Válvula de retención	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
Reducciones o Expansiones	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
Entrada o Salida	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Válvula de Control	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
Altura de entrada [msnm]	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2
Altura de salida [msnm]	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	5,2	5,2	5,2	5,2	4,2

Cont. Datos de las tuberías de fuel oil para el segundo caso: Bombeo de combustible del Tanque n.º 10 a las calderas de la unidad 7, 8 y 9.

Nombre de la línea	FU-269-16"	FU-270-16"	FU-271-16"	FU-272-16"	FU-273-16"	FU-274-16"	FU-275-16"	FU-276-30"	FU-277-20"	FU-278-20"
Temperatura	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C
Viscosidad	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt

Tamaño nominal [inch]	16	16	16	16	16	16	16	30	20	20
Tamaño diámetro interno	15,25	15,25	15,25	15,25	15,25	15,25	15,25	29,25	19,25	19,25
Longitud de tubería recta [m]	2,3	2,3	2,9	6,0	2,2	2,2	6,0	19,8	37,8	43,9

Codos 90°	0	0	0	5	1	1	5	1	1	2
Codos 45°	0	0	0	0	0	0	0	1	3	2
"T" de flujo en línea	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0
"T" de flujo derivado	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1
Válvulas de compuerta	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1
Válvula de retención	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Reducciones o Expansiones	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Entrada o Salida	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Válvula de Control	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Altura de entrada [msnm]	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	5,1	6,0	6,0
Altura de salida [msnm]	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	5,1	5,1

Nombre de la línea	FU-279-20"	FU-316-16"	FU-319-16"
Temperatura	30 °C	30 °C	60 °C
Viscosidad	3300 cSt	3300 cSt	280 cSt

Tamaño nominal [inch]	20	16	16
Tamaño diámetro interno	19,25	15,25	15,25
Longitud de tubería recta [m]	52,3	10,0	8,8

Codos 90°	2	3	4
Codos 45°	2	0	2
"T" de flujo en línea	0	0	0
"T" de flujo derivado	1	1	1
Válvulas de compuerta	1	1	1
Válvula de retención	0	0	0
Reducciones o Expansiones	0	1	1
Entrada o Salida	1	0	0
Válvula de Control	0	0	0

Altura de entrada [msnm]	6,0	26,7	27,0
Altura de salida [msnm]	5,1	29,3	26,7

Tabla 4.6 Datos de las tuberías de fuel oil para el tercer caso: Bombeo de combustible de los tanques diarios (n.º 4 y 6) a las calderas de las unidades 7, 8 y 9, por medio del sistema de transferencia

Nombre de la línea	FU-07A-16"	FU-07B-16"	FU-08A-16"	FU-09A-12"	FU-09B-12"	FU-09C-12"	FU-09D-12"	FU-109-16"	FU-109-16"
Temperatura	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C
Viscosidad	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt
Tamaño nominal [inch]	16	16	16	12,75	12,75	12,75	12,75	16	16
Tamaño diámetro interno	15,25	15,25	15,25	12	12	12	12	15,25	15,25
Longitud de tubería recta [m]	5,4	7,5	14,4	3,4	3,4	3,4	3,4	28,7	90,3
Codos 90°	2	1	2	0	0	0	0	1	2
Codos 45°	0	0	0	0	0	0	0	0	3
"T" de flujo en línea	0	0	5	0	0	0	0	1	1
"T" de flujo derivado	1	1	0	1	1	1	1	1	0
Válvulas de compuerta	1	1	1	1	1	1	1	0	0
Válvula de retención	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Reducciones o Expansiones	0	0	0	1	1	1	1	0	0
Entrada o Salida	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Válvula de Control	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Altura de entrada [msnm]	41,7	42,2	28,1	28,1	28,1	28,1	28,1	41,7	41,7
Altura de salida [msnm]	40,9	41,7	27	28,1	28,1	28,1	28,1	41,7	40,9

Nombre de la línea	FU-109-16"	FU-110A-10"	FU-110B-10"	FU-110C-10"	FU-110D-10"	FU-111-16"	FU-11-16"	FU-112A-14"	FU-112B-14"
Temperatura	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C	60 °C	30 °C	30 °C
Viscosidad	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	280 cSt	3300 cSt	3300 cSt
Tamaño nominal [inch]	16	10,75	10,75	10,75	10,75	16	16	14	14
Tamaño diámetro interno	15,25	10,02	10,02	10,02	10,02	15,25	15,25	13,25	13,25
Longitud de tubería recta [m]	171,9	3,7	3,7	3,7	3,7	21,1	460,1	1,3	1,3
Codos 90°	16	1	1	1	1	2	27	1	1
Codos 45°	3	1	1	1	1	0	12	0	0
"T" de flujo en línea	0	0	0	0	0	4	1	0	0
"T" de flujo derivado	1	1	1	1	1	2	2	0	0
Válvulas de compuerta	0	1	1	1	1	0	0	1	1
Válvula de retención	1	1	1	1	1	0	0	0	0
Reducciones o Expansiones	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Entrada o Salida	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Válvula de Control	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Altura de entrada [msnm]	40,9	27,3	27,3	27,3	27,3	27	27	29,3	29,3
Altura de salida [msnm]	28,1	27	27	27	27	29,3	13,4	28,6	28,6

Cont. Datos de las tuberías de fuel oil para el tercer caso: Bombeo de combustible de los tanques diarios (n.º 4 y 6) a las calderas de las unidades 7, 8 y 9, por medio del sistema de transferencia

Nombre de la línea	FU-113A-14"	FU-113B-14"	FU-12-10"	FU-12-10"	FU-12A-8"	FU-13A-12"	FU-13B-12"	FU-13C-12"	FU-13D-12"
Temperatura	60 °C	60 °C	50 °C	50 °C	50 °C	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C
Viscosidad	280 cSt	280 cSt	650 cSt	650 cSt	650 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt
Tamaño nominal [inch]	14	14	10,75	10,75	8,625	12,75	12,75	12,75	12,75
Tamaño diámetro interno	13,25	13,25	10,02	10,02	7,981	12	12	12	12
Longitud de tubería recta [m]	1,3	1,3	311,0	466,5	7,3	1,9	1,9	1,9	1,9
Codos 90°	1	1	26	32	2	1	1	1	1
Codos 45°	0	0	7	9	0	0	0	0	0
"T" de flujo en línea	0	0	2	0	2	0	0	0	0
"T" de flujo derivado	0	0	3	1	2	0	0	0	0
Válvulas de compuerta	1	1	1	0	2	0	0	0	0
Válvula de retención	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Reducciones o Expansiones	1	1	0	0	2	1	1	1	1
Entrada o Salida	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Válvula de Control	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Altura de entrada [msnm]	27,7	27,7	26,6	13,4	27	27,3	27,3	27,3	27,3
Altura de salida [msnm]	27	27	41,7	26,6	26,6	27,3	27,3	27,3	27,3

Tabla 4.7 Datos de las tuberías de fuel oil para el cuarto caso: Suministro de combustible desde el tanque n.º 7 a la caldera de la unidad 7, por medio del sistema de gravedad

Nombre de la línea	FU-254-10"	FU-Gravedad 10"	FU-Gravedad 16"	FU-Gravedad 16"
Temperatura	50 °C	30 °C	50 °C	30 °C
Viscosidad	650 cSt	3300 cSt	650 cSt	3300 cSt

Tamaño nominal [inch]	10,75	10,75	16	16
Tamaño diámetro interno	10,02	10,02	15,25	15,25
Longitud de tubería recta [m]	17,8	229,4	235,8	548,8

Codos 90°	1	13	16	10
Codos 45°	0	3	3	5
"T" de flujo en línea	0	0	1	0
"T" de flujo derivado	2	2	2	0
Válvulas de compuerta	0	2	2	2
Válvula de retención	0	0	0	0
Reducciones o Expansiones	0	0	0	0
Entrada o Salida	0	0	0	1
Válvula de Control	0	0	0	0

Altura de entrada [msnm]	13,4	14,4	3,0	26,0
Altura de salida [msnm]	47,6	3,0	13,4	3,0

Tabla 4.8 Datos de las tuberías de fuel oil: puente de tuberías sobre el nivel de planta

Nombre de la línea	7FU113-8"	7FU114-8"	7FU117-8"	7FU118-8"	FU-11-16"	FU-12-10"	FU-201-16"	FU-254-10"	8FU113-8"	8FU114-8"
Temperatura	60 °C	60 °C	50 °C	60 °C	60 °C	60 °C	60 °C	60 °C	60 °C	60 °C
Viscosidad	280 cSt	280 cSt	650 cSt	280 cSt	280 cSt	280 cSt	280 cSt	280 cSt	280 cSt	280 cSt
Tamaño nominal [inch]	8,625	8,625	8,625	8,625	16	10,75	16	10,75	8,625	8,625
Tamaño diámetro interno	7,981	7,981	7,981	7,981	15,25	10,02	15,25	10,02	7,981	7,981
Longitud de tubería recta [m]	12,9	13,4	15,1	6,5	80,8	80,8	80,8	87,5	12,9	13,4
Codos 90°	6	6	7	2	6	6	6	9	6	6
Codos 45°	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1
"T" de flujo en línea	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
"T" de flujo derivado	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1
Válvulas de compuerta	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Válvula de retención	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Reducciones o Expansiones	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1
Entrada o Salida	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Válvula de Control	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Altura de entrada [msnm]	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4
Altura de salida [msnm]	3,6	3,6	3,6	3,6	13,4	13,4	13,4	13,4	3,6	3,6

Nombre de la línea	8FU117-8"	8FU118-8"	FU-11-16"	FU-12-10"	FU-201-16"	FU-254-10"	9FU113-8"	9FU114-8"	9FU117-8"	9FU118-8"
Temperatura	50 °C	60 °C	60 °C	60 °C	60 °C	60 °C	60 °C	60 °C	50 °C	60 °C
Viscosidad	650 cSt	280 cSt	280 cSt	280 cSt	280 cSt	280 cSt	280 cSt	280 cSt	650 cSt	280 cSt
Tamaño nominal [inch]	8,625	8,625	16	10,75	16	10,75	8,625	8,625	8,625	8,625
Tamaño diámetro interno	7,981	7,981	15,25	10,02	15,25	10,02	7,981	7,981	7,981	7,981
Longitud de tubería recta [m]	15,1	6,5	87,5	87,7	82,2	87,1	12,9	13,4	15,1	6,5
Codos 90°	7	2	10	6	6	9	6	6	7	2
Codos 45°	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0
"T" de flujo en línea	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
"T" de flujo derivado	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
Válvulas de compuerta	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Válvula de retención	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Reducciones o Expansiones	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1
Entrada o Salida	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Válvula de Control	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Altura de entrada [msnm]	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4
Altura de salida [msnm]	3,6	3,6	13,4	13,4	13,4	13,4	3,6	3,6	3,6	3,6

Tabla 4.9 Datos de las tuberías de fuel oil: líneas de combustible en el nivel planta, desde el puente de tuberías hasta la caldera

Nombre de la línea	FU01-10"	FU06-10"	FU11-8"	FU14-6"	FU33-8"	FU34-8"	FU36-8"	FU38-8"	FU39-8"	FU40-8"	FU42-8"	FU46-8"	FU47-8"
Temperatura	60 °C	60 °C	60 °C	60 °C	60 °C	60 °C	60 °C	60 °C	60 °C	60 °C	120 °C	120 °C	120 °C
Viscosidad	280 cSt	280 cSt	280 cSt	280 cSt	280 cSt	280 cSt	280 cSt	280 cSt	280 cSt	280 cSt	25 cSt	25 cSt	25 cSt
Tamaño nominal [inch]	10,75	10,75	8,625	6,625	8,625	8,625	8,625	8,625	8,625	8,625	8,625	8,625	8,625
Tamaño diámetro interno	10,02	10,02	7,981	6,065	7,981	7,981	7,981	7,981	7,981	7,981	7,981	7,981	7,981
Longitud de tubería recta [m]	3,7	14,6	8,1	10,6	10,9	9,7	3,8	9,8	21,4	2,2	4,1	3,6	40,5
Codos 90°	1	3	4	2	2	2	0	3	5	4	4	0	14
Codos 45°	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
"T" de flujo en línea	1	1	0	2	1	1	2	1	0	0	0	2	2
"T" de flujo derivado	1	2	0	2	2	1	1	1	1	1	1	0	0
Válvulas de compuerta	1	1	1	1	0	1	1	1	2	1	1	1	2
Válvula de retención	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Reducciones o Expansiones	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
Entrada o Salida	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Válvula de Control	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
Altura de entrada [msnm]	3,6	4,4	8,4	4,0	8,4	8,4	3,6	3,6	3,6	3,6	4,2	3,6	3,6
Altura de salida [msnm]	3,6	8,4	4,0	8,4	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	4,2	3,6	3,6	12,6

Nombre de la línea	FU51-8"	FU52-1.5"	FU53-4"	FU55-8"	FU56-4"	FU57-8"	FU58-6"
Temperatura	120 °C	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C	30 °C
Viscosidad	25 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt	3300 cSt
Tamaño nominal [inch]	8,625	0	0	8,625	4,5	8,625	6,625
Tamaño diámetro interno	7,981	0	0	7,981	4,09	7,981	6,065
Longitud de tubería recta [m]	5,8	0,0	0,0	3,6	1,2	4,2	75,2
Codos 90°	0	0	0	3	0	4	2
Codos 45°	0	0	0	0	0	0	8
"T" de flujo en línea	22	0	0	2	0	0	0
"T" de flujo derivado	0	0	0	0	0	1	4
Válvulas de compuerta	2	0	0	0	0	0	0
Válvula de retención	0	0	0	0	0	0	0
Reducciones o Expansiones	1	0	0	2	0	0	0
Entrada o Salida	0	0	0	0	0	0	0
Válvula de Control	1	0	0	0	0	0	0
Altura de entrada [msnm]	12,6	0,0	0,0	12,6	14,8	12,6	11,0
Altura de salida [msnm]	12,6	0,0	0,0	14,8	12,6	11,0	0,0

4.6. DATA DCS (SISTEMA DE CONTROL DISTRIBUIDO)

El sistema de control distribuido tiene la capacidad de almacenar los datos generados en tiempo real por los sensores ubicados en los distintos procesos que se llevan a cabo en planta, estos registros son almacenados y están disponibles para su revisión y posterior uso. Dichos registros corresponden a las variables medibles del proceso que a su vez son identificadas con etiquetas, unidad de medición, así como el máximo y mínimo valor admisible de la variable.

Para este trabajo se uso el registro de 47 días, desde el 01 de noviembre hasta el 17 de diciembre de 2008, se discrimino la toma de valores en intervalos de una hora durante las 24 horas del día. En total hay por cada variable de medición 1126 registros. Se tomaron los registros de las variables censadas en tiempo real de: corriente en el motor y presión en el colector a la descarga de las bombas del sistema de combustible de transferencia, corriente en el motor y presión en el colector a la descarga de las bombas del sistema de bombeo del tanque n.º 10, los niveles de los tanques de combustible fueloil de planta.

Estos sistemas son llamados “comunes” y conforman los sistemas de almacenamiento, trasegado y suministro de combustible a las calderas de la planta

También se tomaron los registros de las variables censadas en tiempo real de las unidades generadoras (calderas) por unidad, son: temperatura del combustible en la succión de las bombas de fueloil de la caldera, temperatura del combustible a la descarga de los calentadores ubicados en las cercanías de la caldera, presión a la descarga de las bombas de fueloil de la caldera, posición del vástago de la válvula reguladora de presión de combustible de la caldera, flujo de combustible a la descarga de las bombas de fueloil de la caldera, flujo de combustible que retorna por la acción de regulación de la válvula de presión, y la presión de combustible a la entrada de los quemadores de la caldera.

Debido a la cantidad de datos y con el fin de facilitar el manejo de esa información se construyen gráficos que se presentan a continuación. Las tablas con los registros y datos medibles de los procesos se presentan en los anexos del trabajo.

Estos datos sirven como la principal herramienta de registro y control de los sucesos a nivel operacional del sistema de combustible. Por lo que en este trabajo cumplen una función de apoyo y de guía para comparar con los valores obtenidos en los cálculos realizados.

4.6.1 COMUNES - SISTEMA DE TRANSFERENCIA Y TANQUE N.º 10.

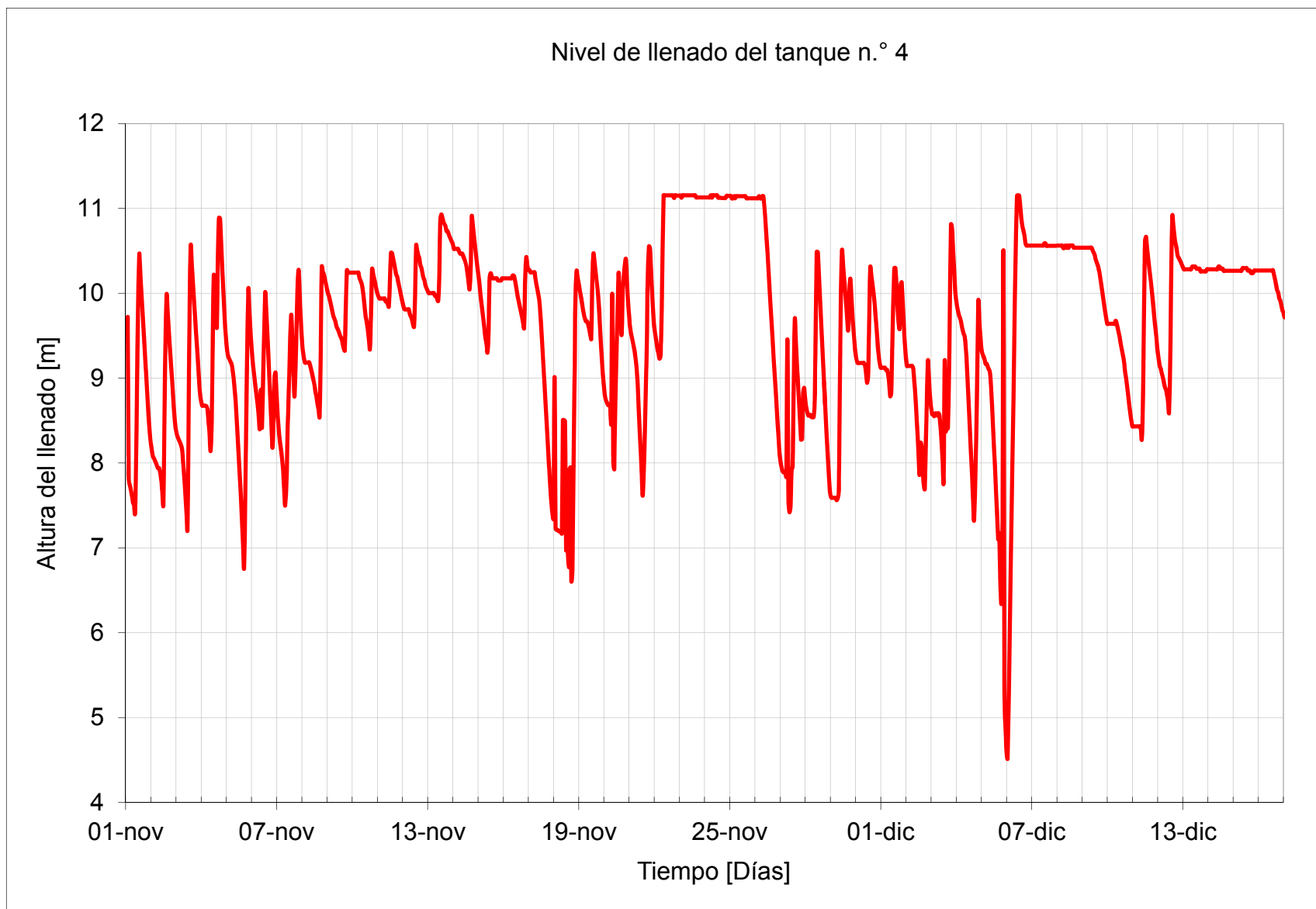


Gráfico 4.2 Nivel de llenado del tanque n.º 4 (Fuente: Data DCS. Gráfica: Elaboración propia)

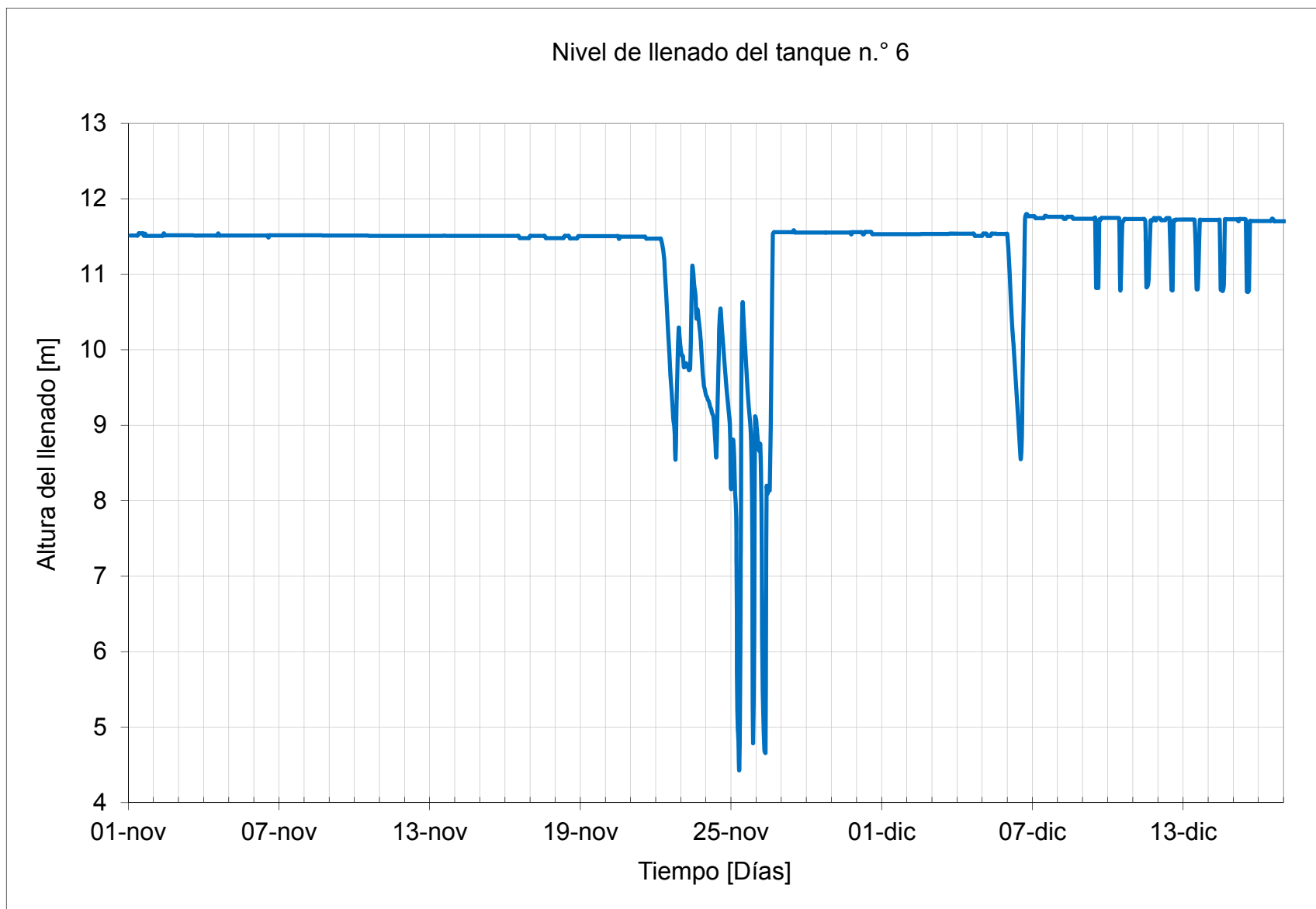


Gráfico 4.3 Nivel de llenado del tanque n.º 6 (Fuente: Data DCS. Gráfica: Elaboración propia)

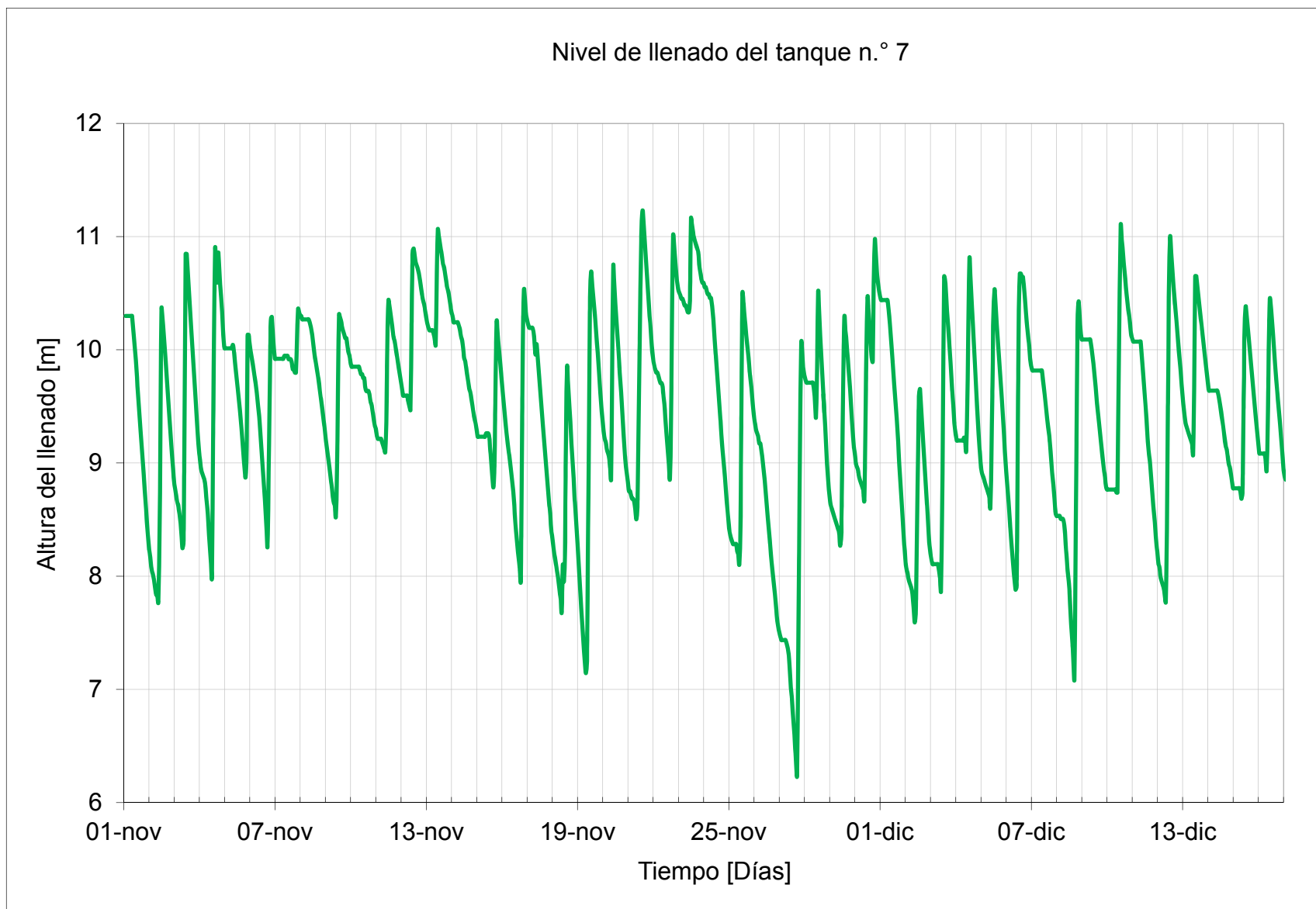


Gráfico 4.4 Nivel de llenado del tanque n.º 7 (Fuente: Data DCS. Gráfica: Elaboración propia)

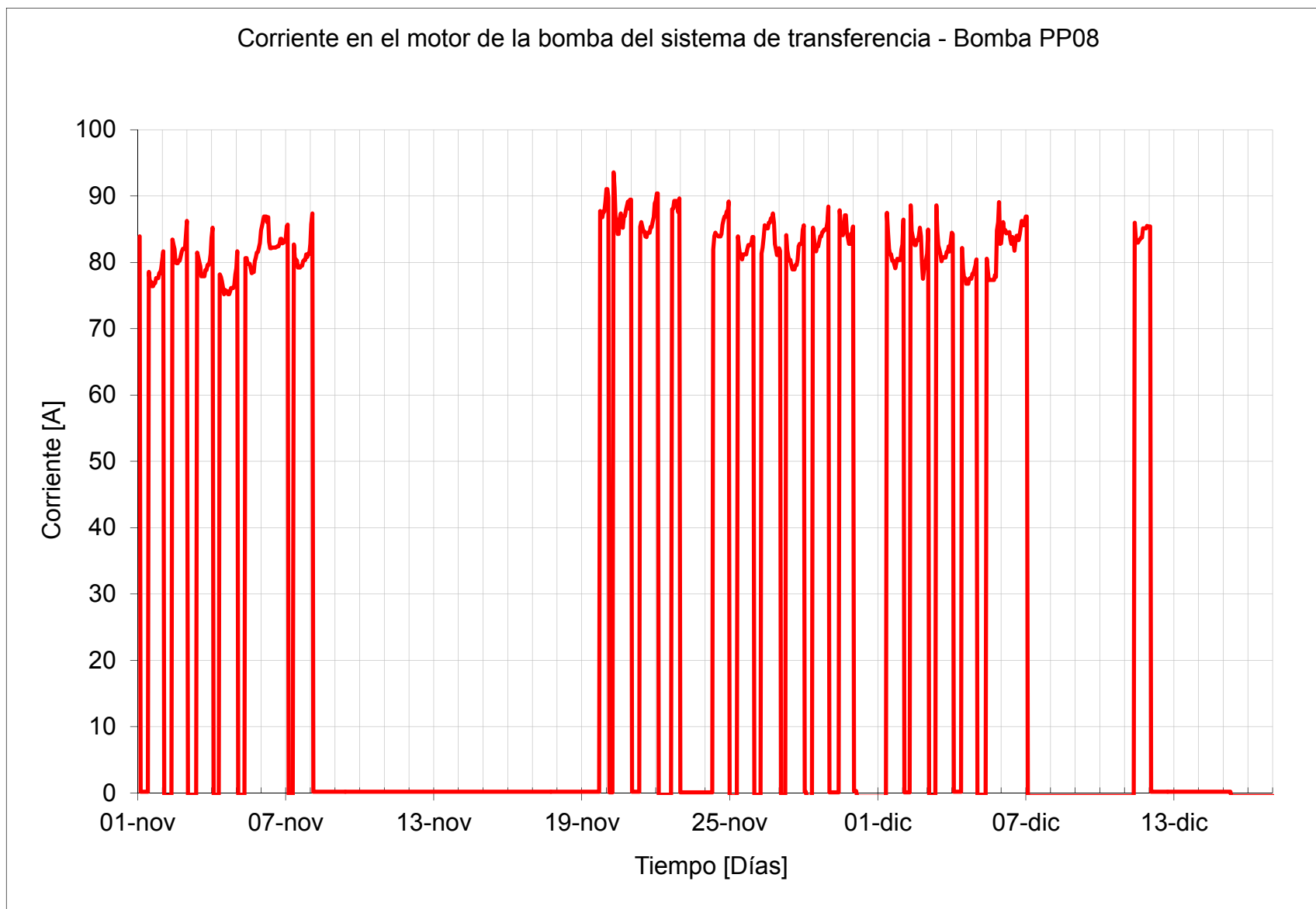


Gráfico 4.5 Corriente en el motor de la bomba del sistema de transferencia – bomba PP08 (Fuente: Data DCS. Gráfica: Elaboración propia)

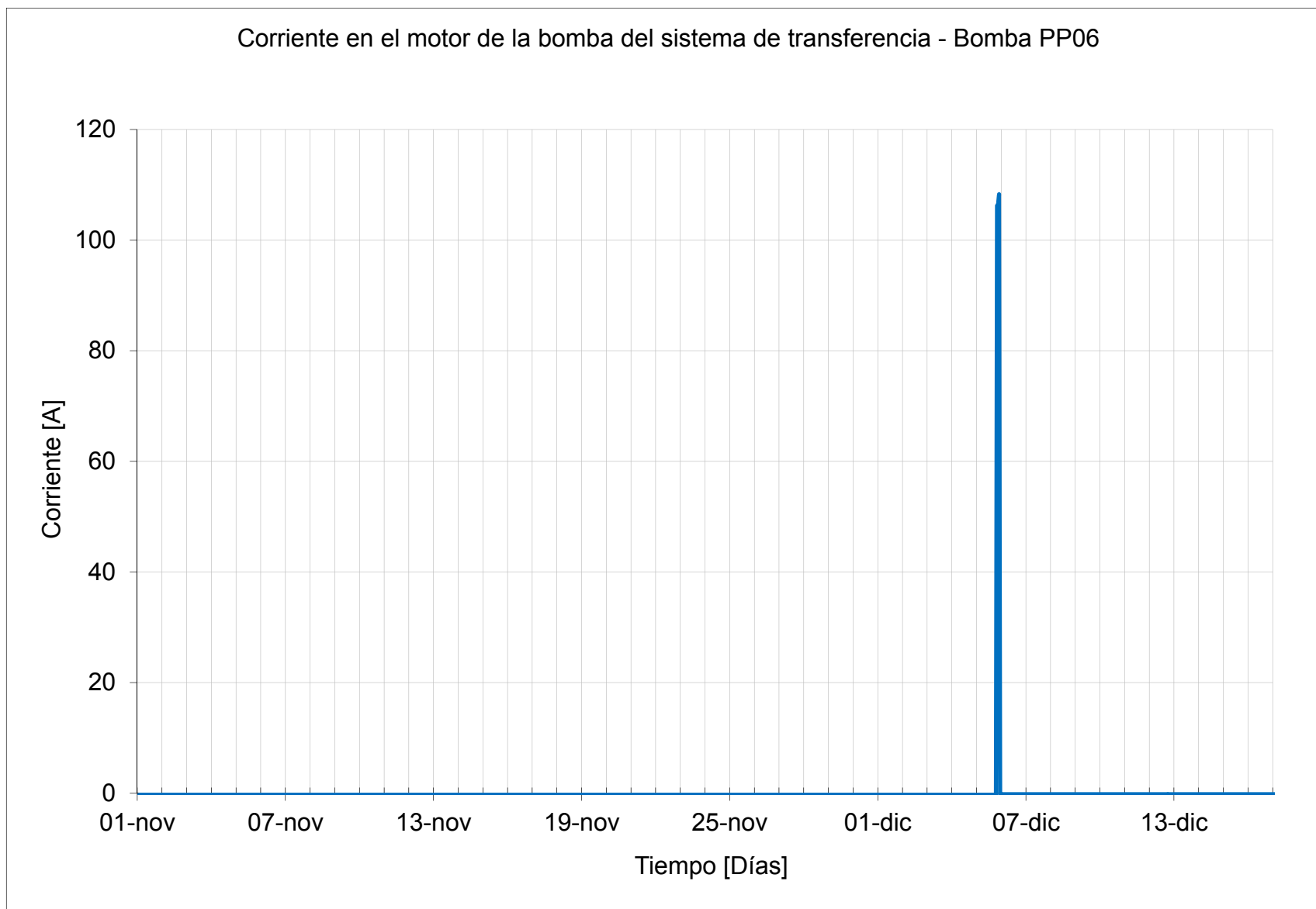


Gráfico 4.6 Corriente en el motor de la bomba del sistema de transferencia – bomba PP06 (Fuente: Data DCS. Gráfica: Elaboración propia)

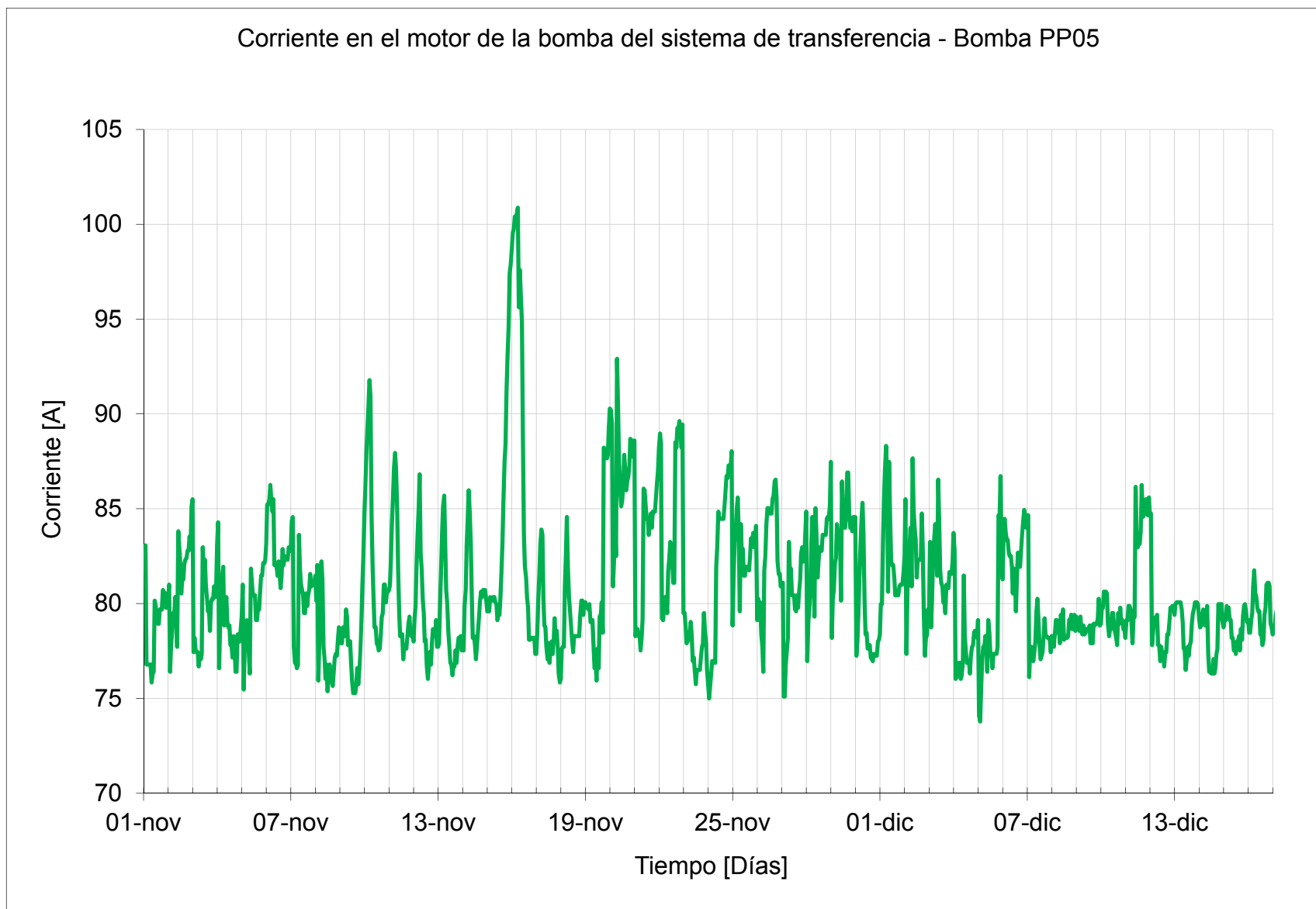
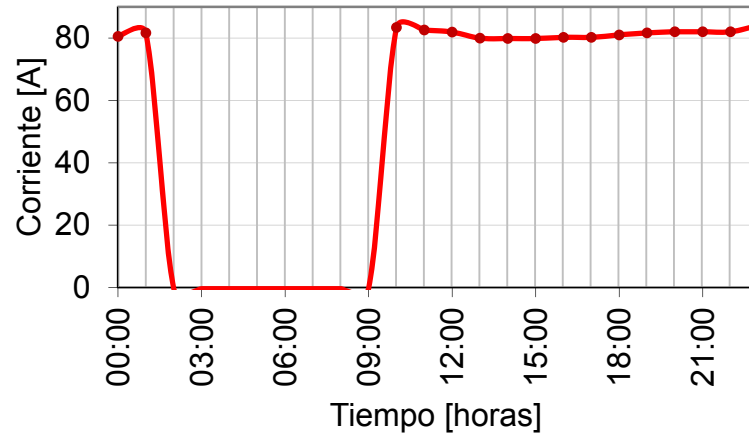
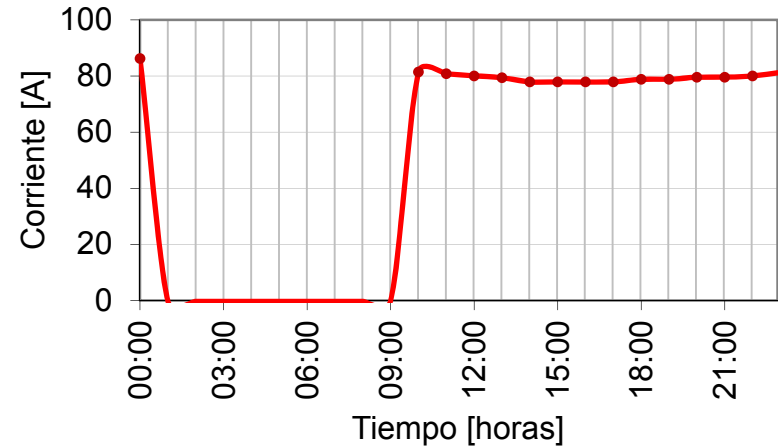


Gráfico 4.7 Corriente en el motor de la bomba del sistema de transferencia – bomba PP05 (Fuente: Data DCS. Gráfica: Elaboración propia)

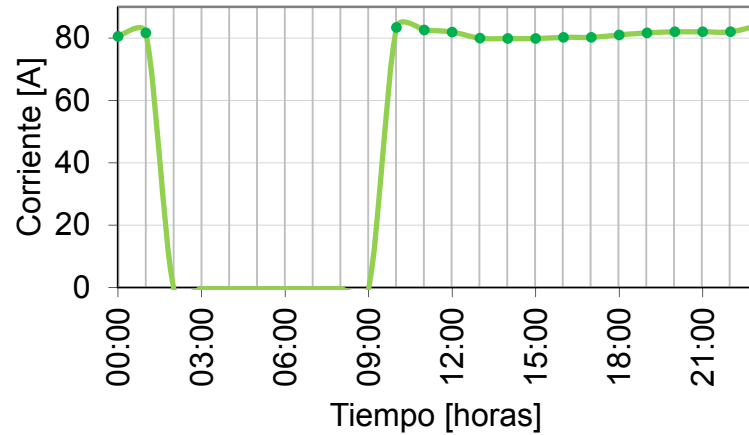
Corriente en el motor de la bomba del
sistema de transferencia - Bomba PP08
02/11/2008



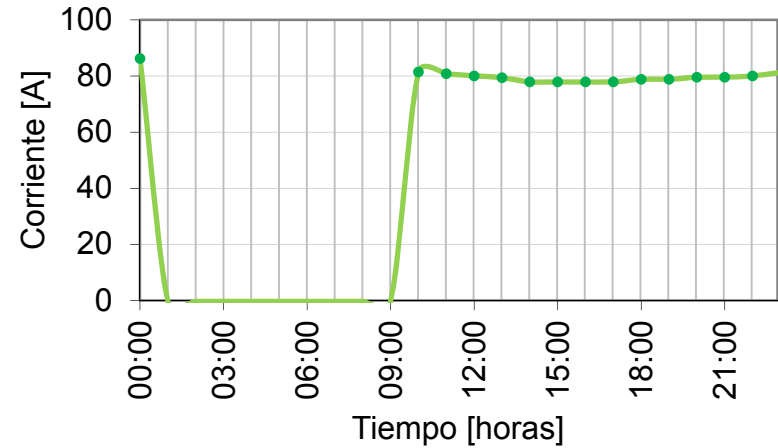
Corriente en el motor de la bomba del
sistema de transferencia - Bomba PP08
03/11/2008



Corriente en el motor de la bomba del
sistema de transferencia - Bomba PP05
02/11/2008



Corriente en el motor de la bomba del
sistema de transferencia - Bomba PP05
03/11/2008



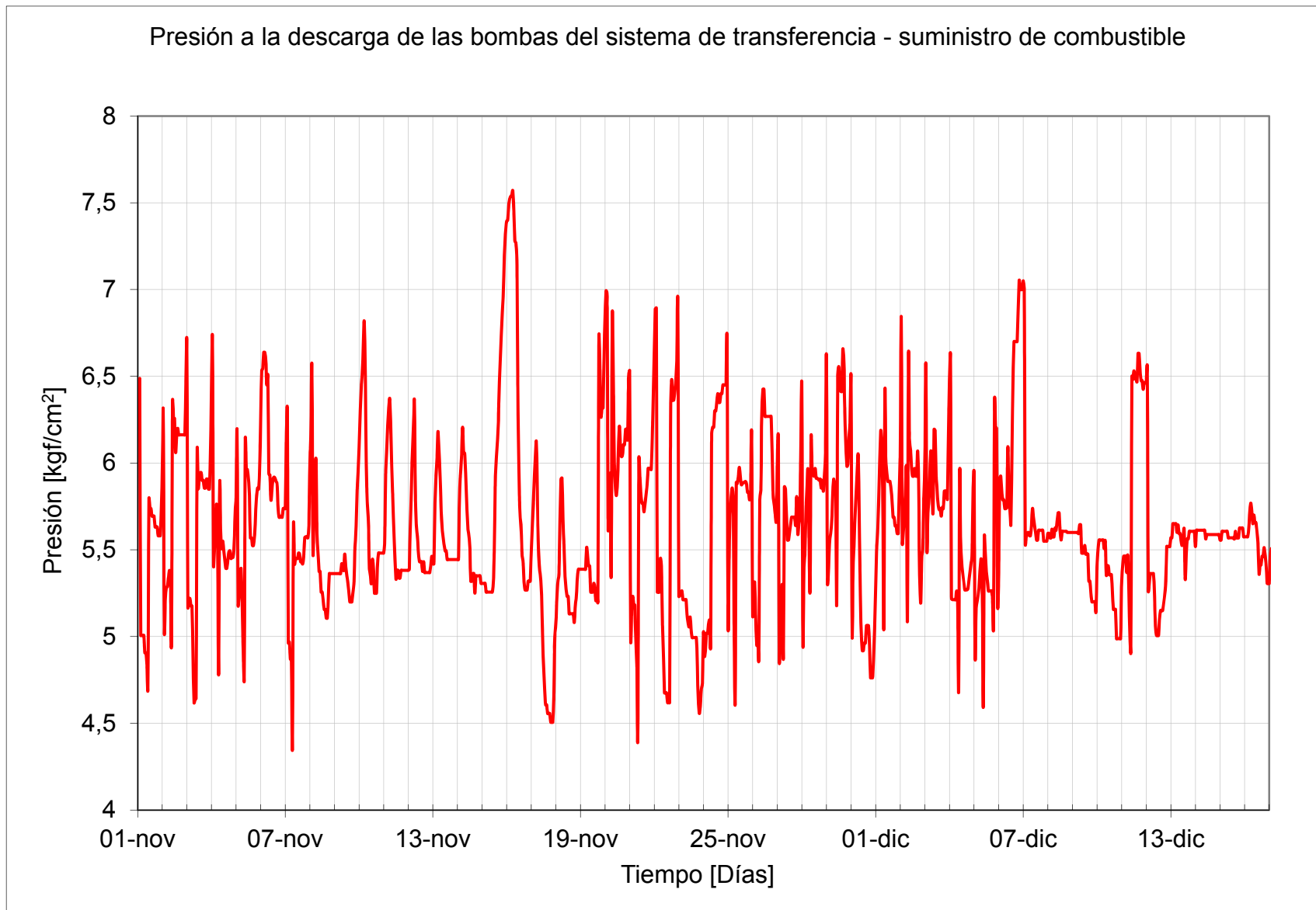
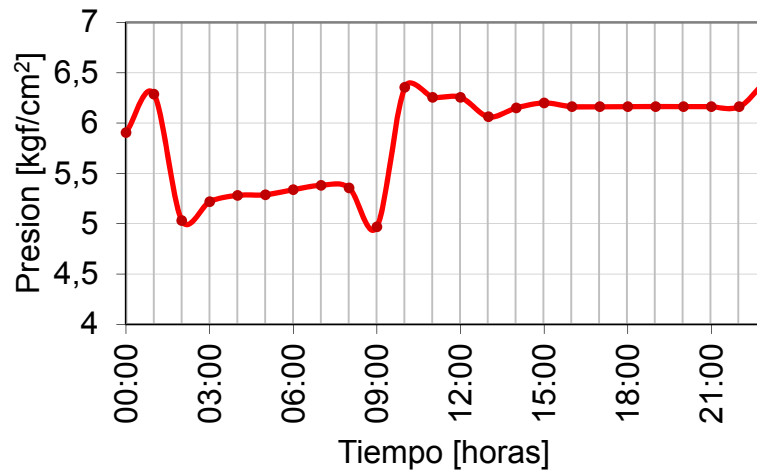
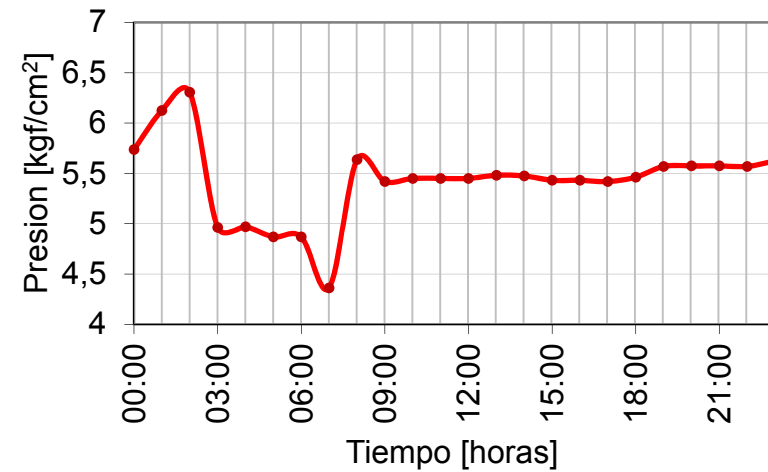


Gráfico 4.8 Presión a la descarga de las bombas del sistema de transferencia (Fuente: Data DCS. Gráfica: Elaboración propia)

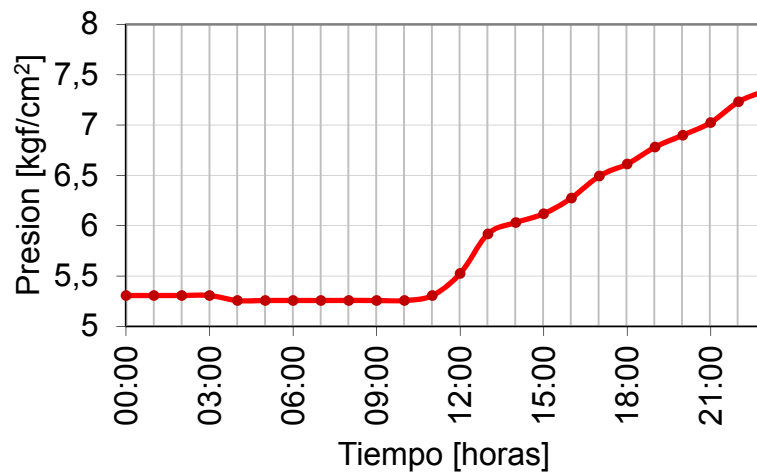
Presion a la descarga de las bombas
02/11/2008



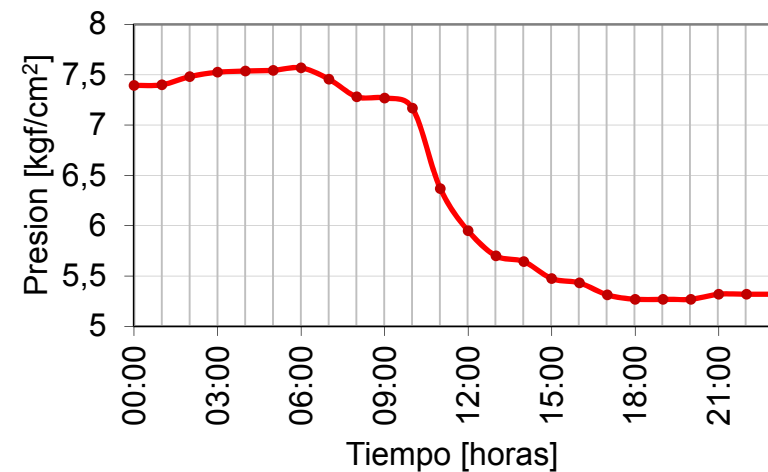
Presion a la descarga de las bombas
07/11/2008



Presion a la descarga de las bombas
15/11/2008



Presion a la descarga de las bombas
16/11/2008



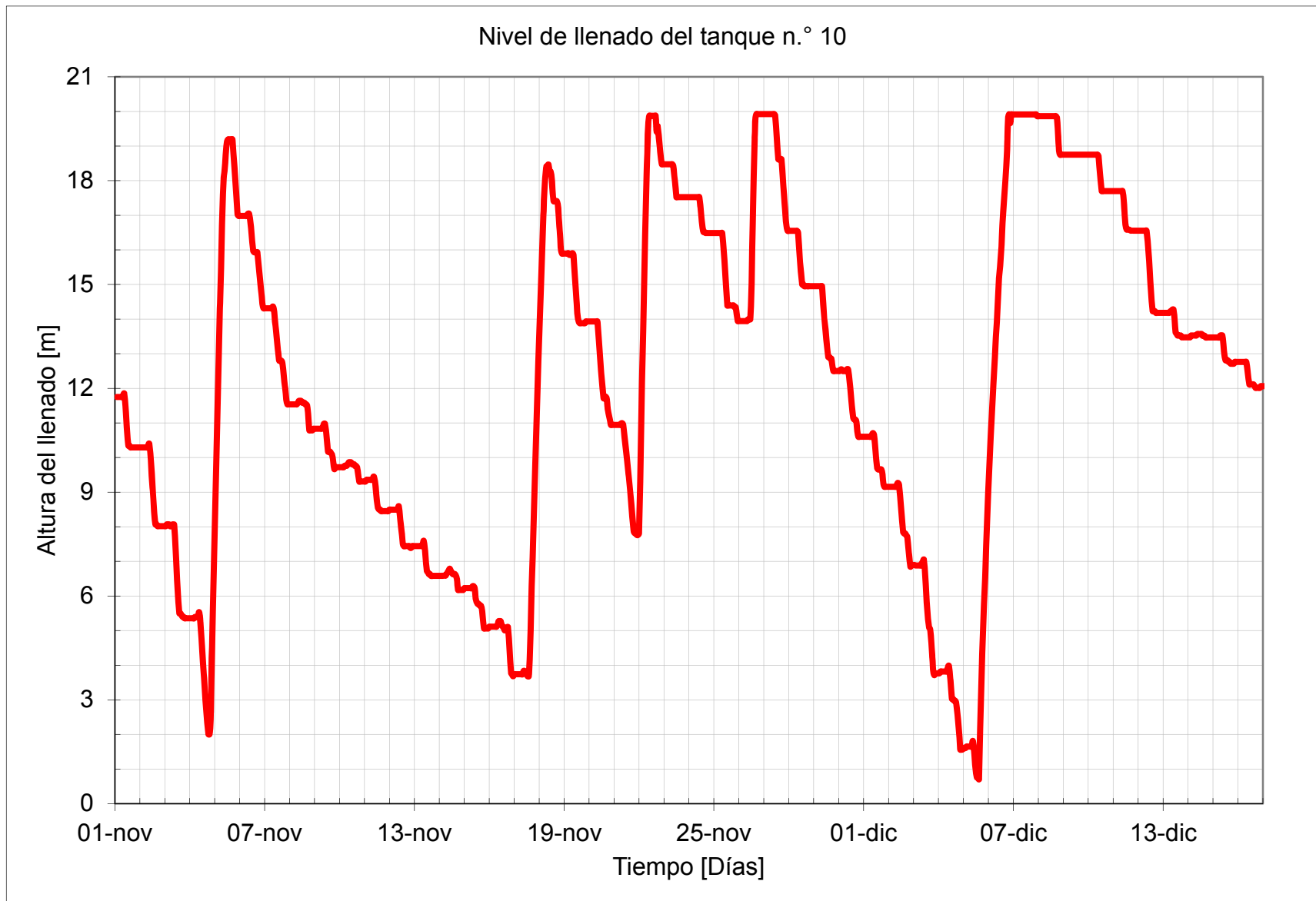


Gráfico 4.9 Nivel de llenado del tanque n.º 10 (Fuente: Data DCS. Gráfica: Elaboración propia)

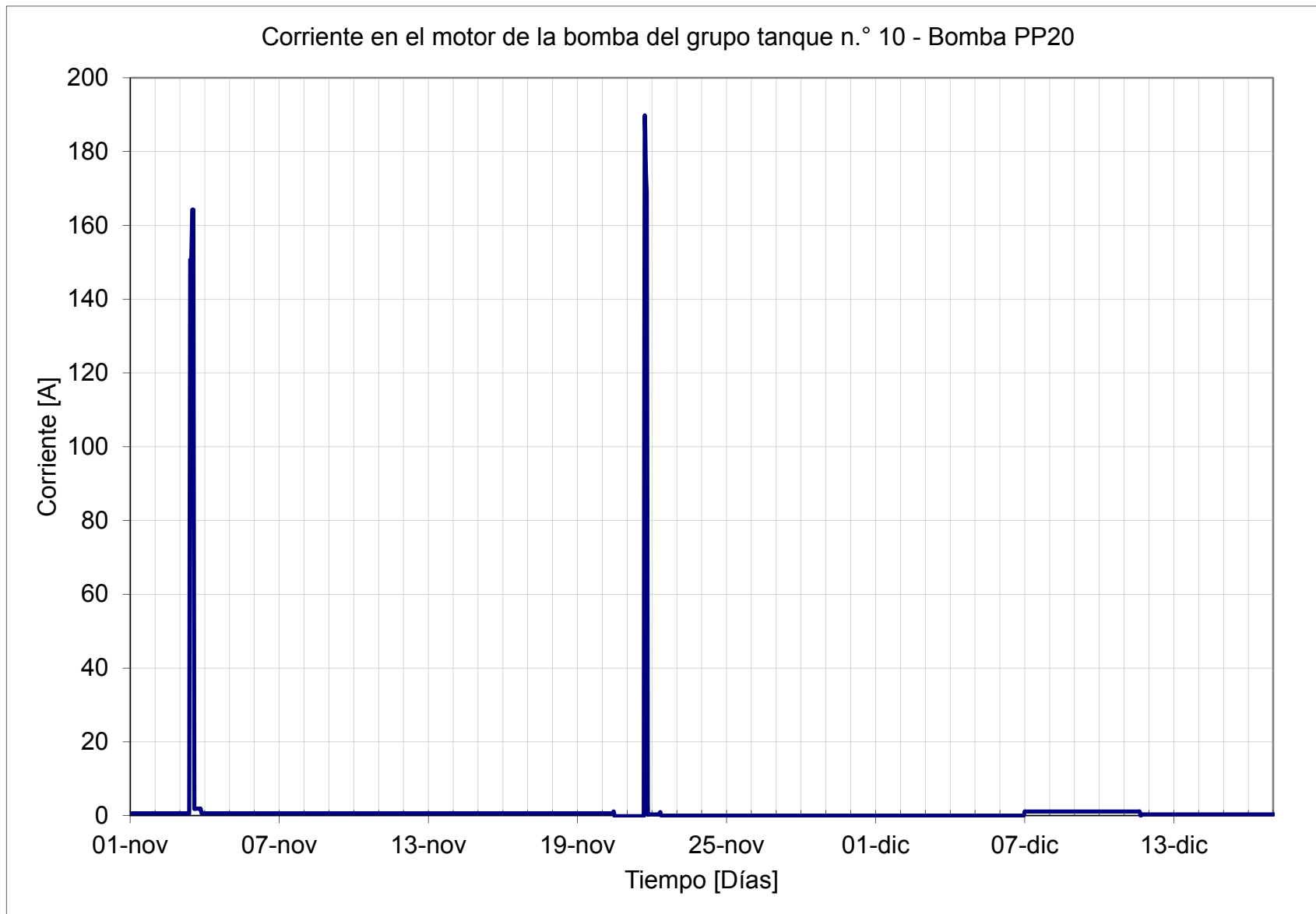


Gráfico 4.10 Corriente en el motor de la bomba del grupo tanque n.º 10 – bomba PP20 (Fuente: Data DCS. Gráfica: Elaboración propia)

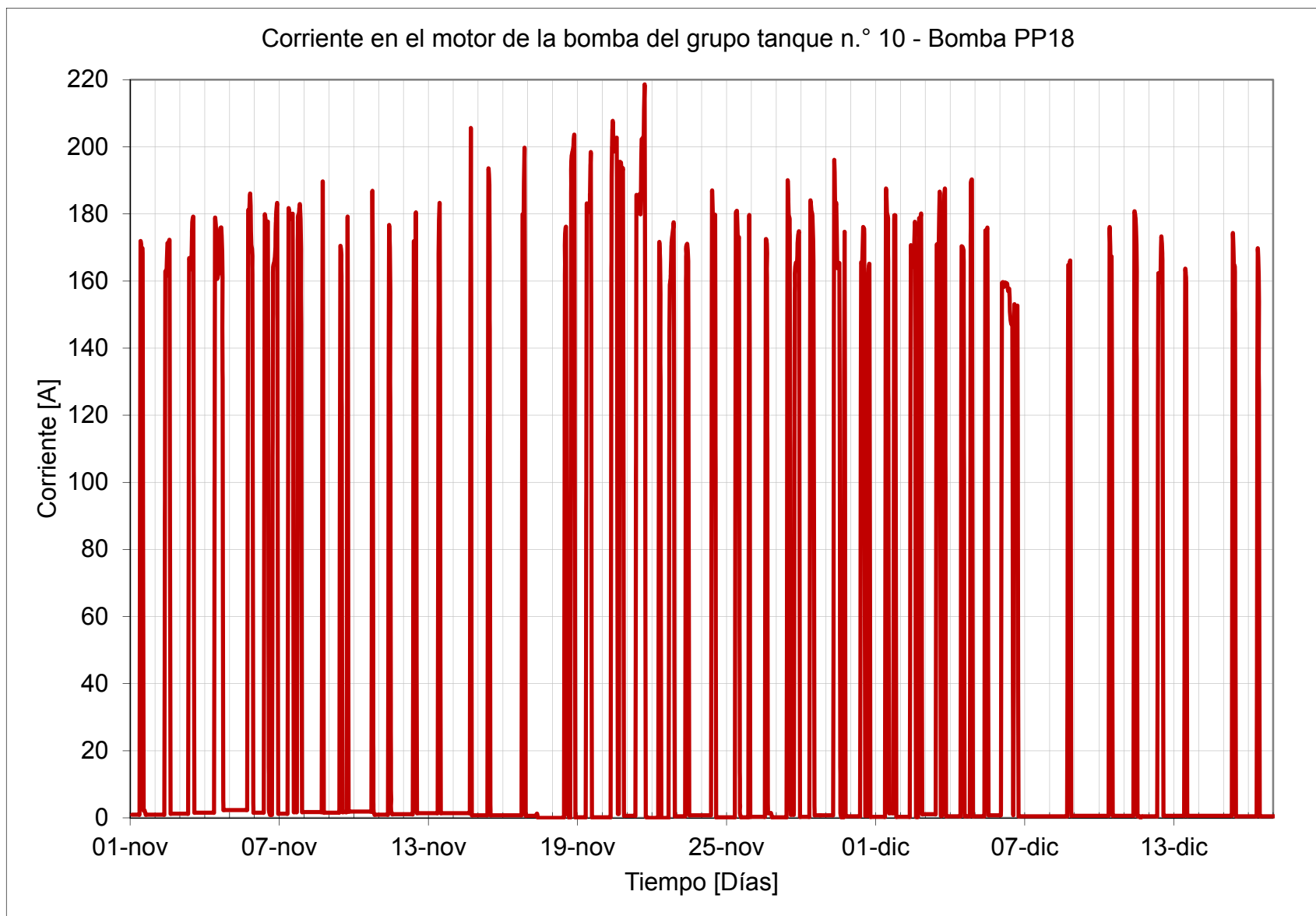


Gráfico 4.11 Corriente en el motor de la bomba del grupo tanque n.º 10 – bomba PP18 (Fuente: Data DCS. Gráfica: Elaboración propia)

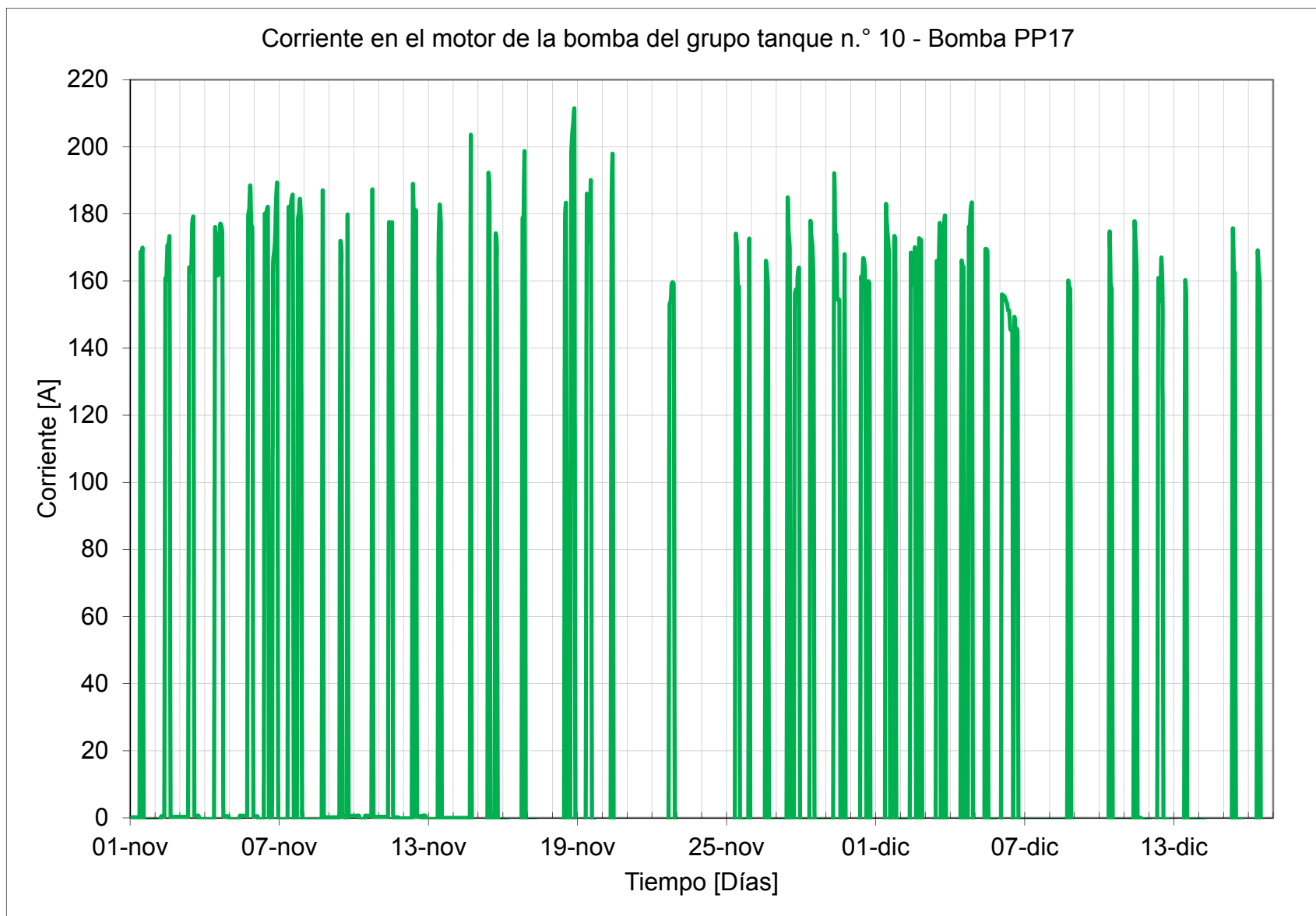
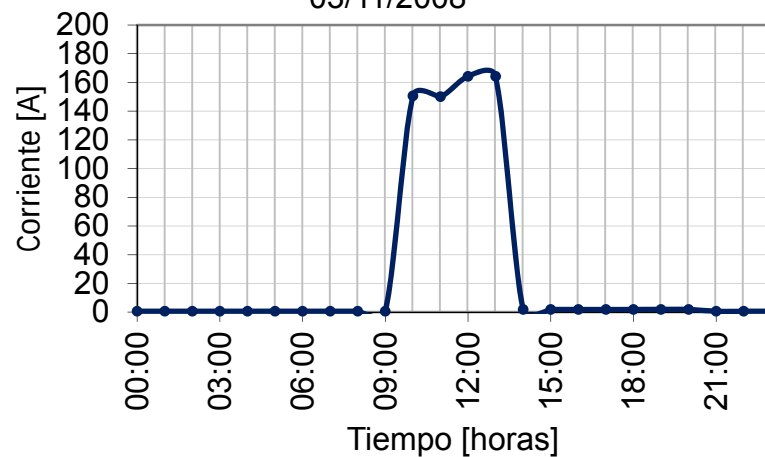
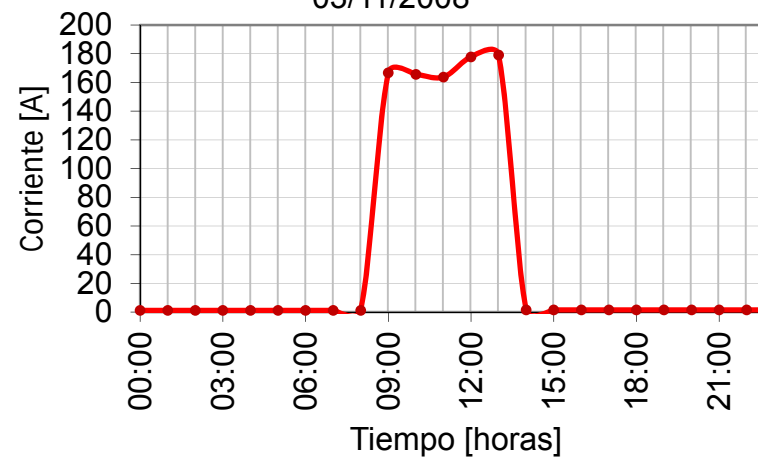


Gráfico 4.12 Corriente en el motor de la bomba del grupo tanque n.º 10 – bomba PP17 (Fuente: Data DCS. Gráfica: Elaboración propia)

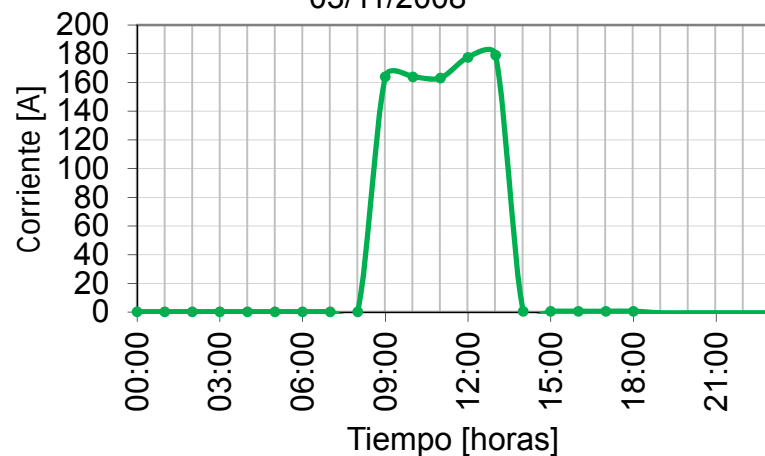
Corriente en el motor de la bomba del grupo
tanque n.º 10 - Bomba PP20
03/11/2008



Corriente en el motor de la bomba del grupo
tanque n.º 10 - Bomba PP18
03/11/2008



Corriente en el motor de la bomba del grupo
tanque n.º 10 - Bomba PP17
03/11/2008



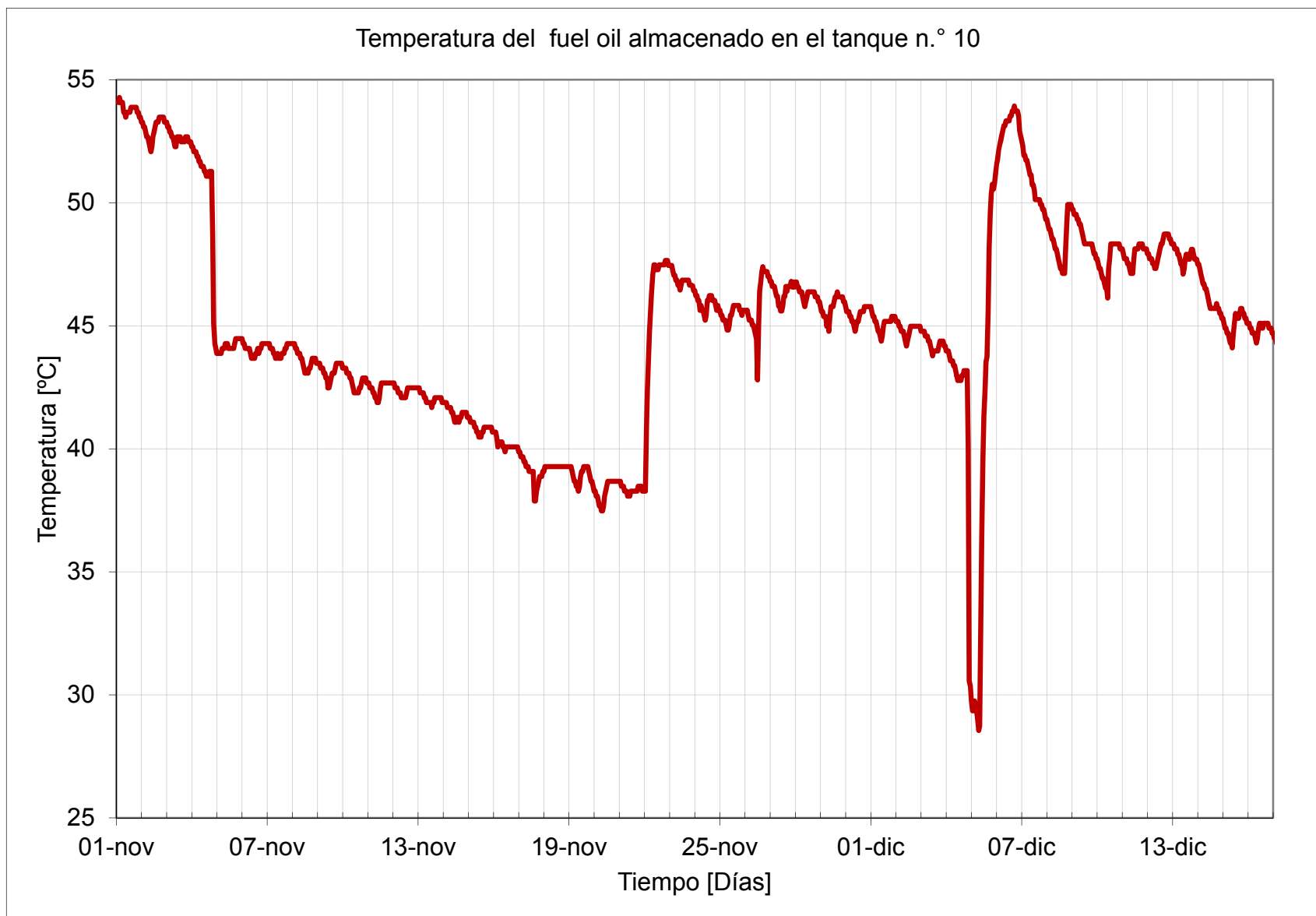


Gráfico 4.13 Temperatura del fueloil almacenado en el tanque n.º 10 (Fuente: Data DCS. Gráfica: Elaboración propia)

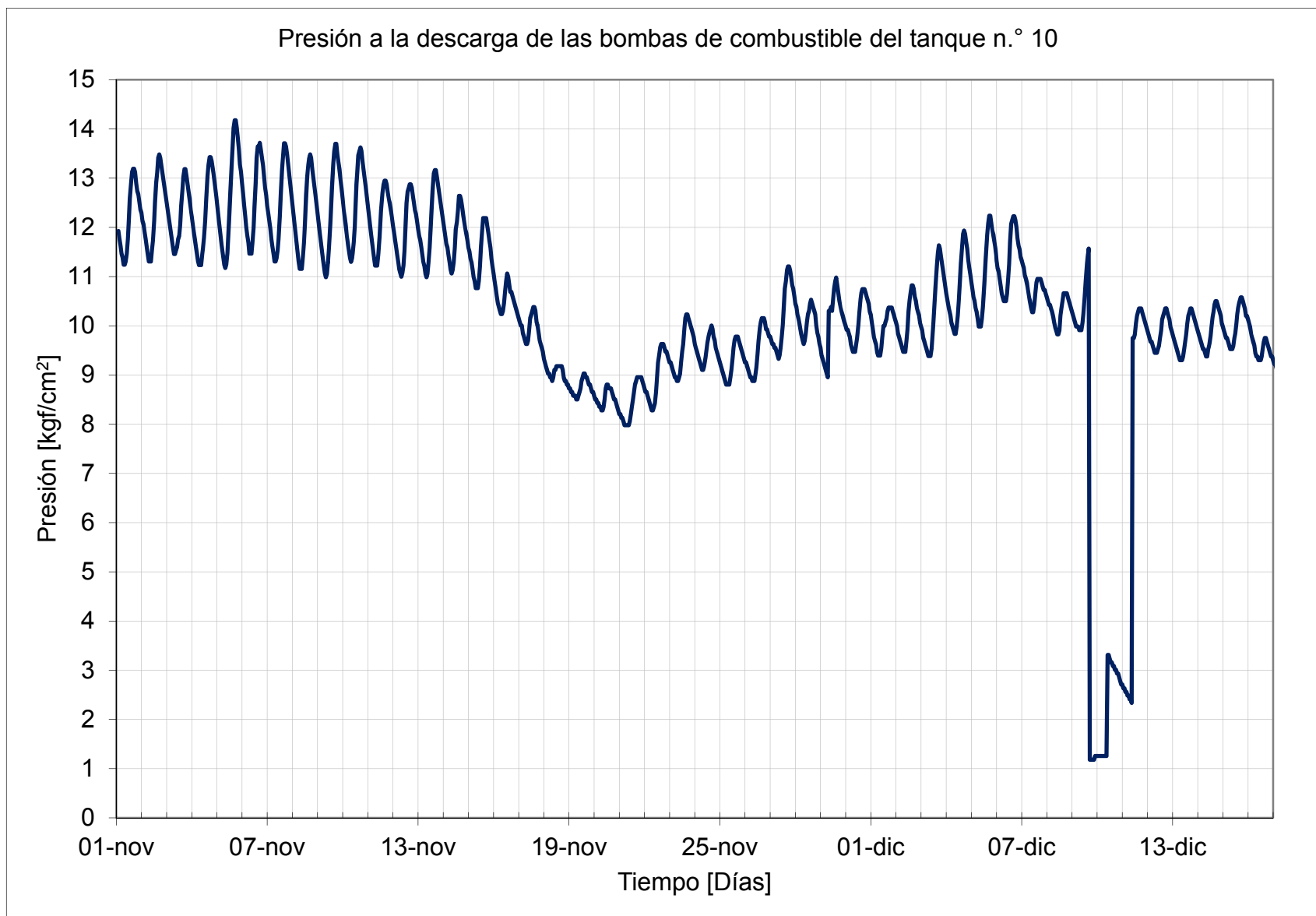
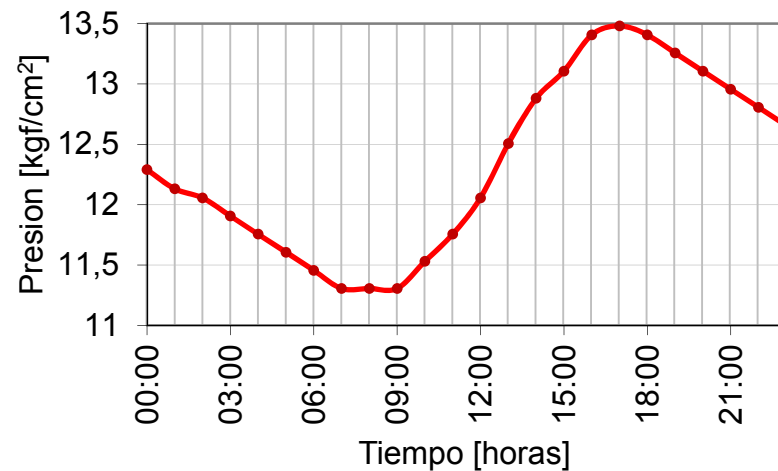
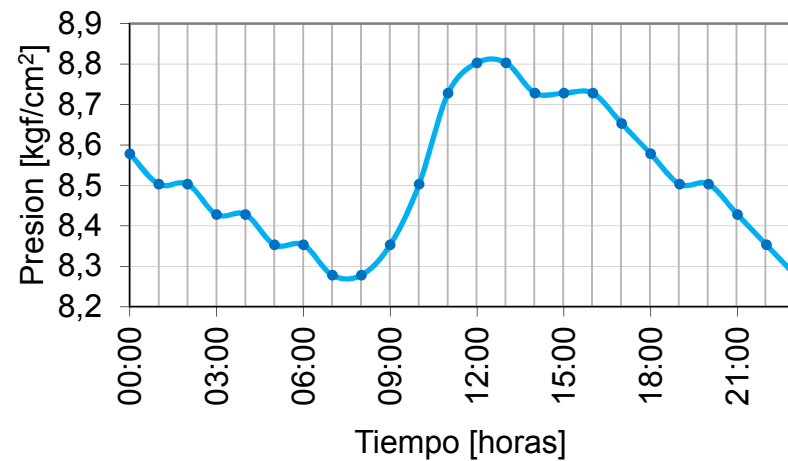


Gráfico 4.14 Presión a la descarga de las bombas de combustible del tanque n.º 10 (Fuente: Data DCS. Gráfica: Elaboración propia)

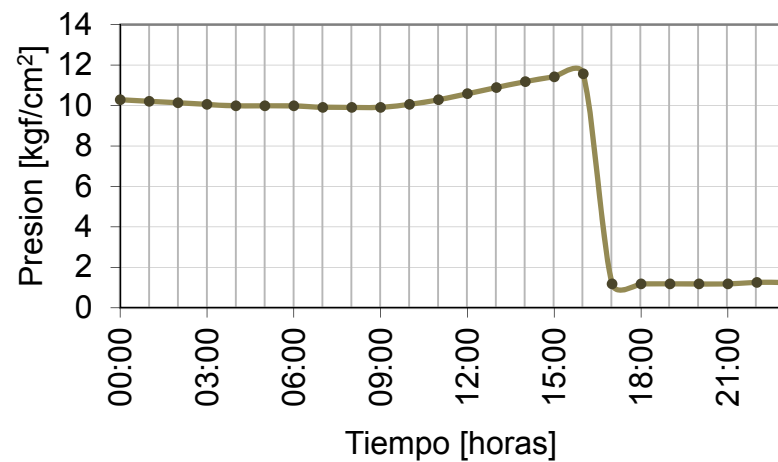
Presion a la descarga de las bombas
02/11/2008



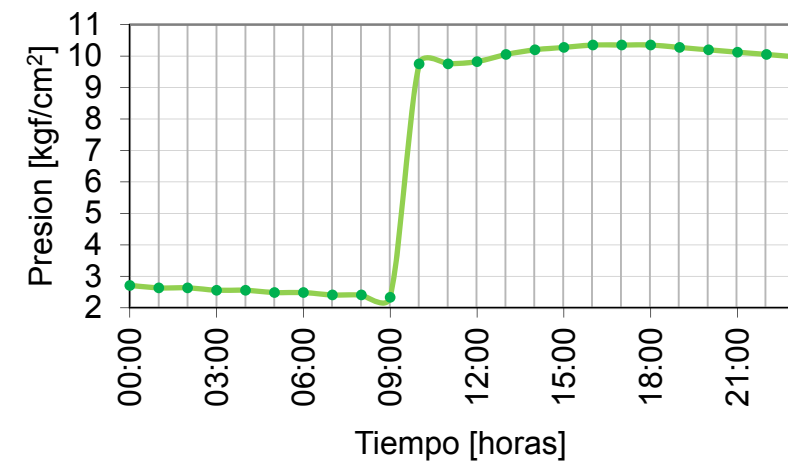
Presion a la descarga de las bombas
20/11/2008



Presion a la descarga de las bombas
09/12/2008



Presion a la descarga de las bombas
11/12/2008



4.6.2 UNIDAD TURBO GENERADORA N.º 7. (CALDERA – TURBINA DE LA U/7)

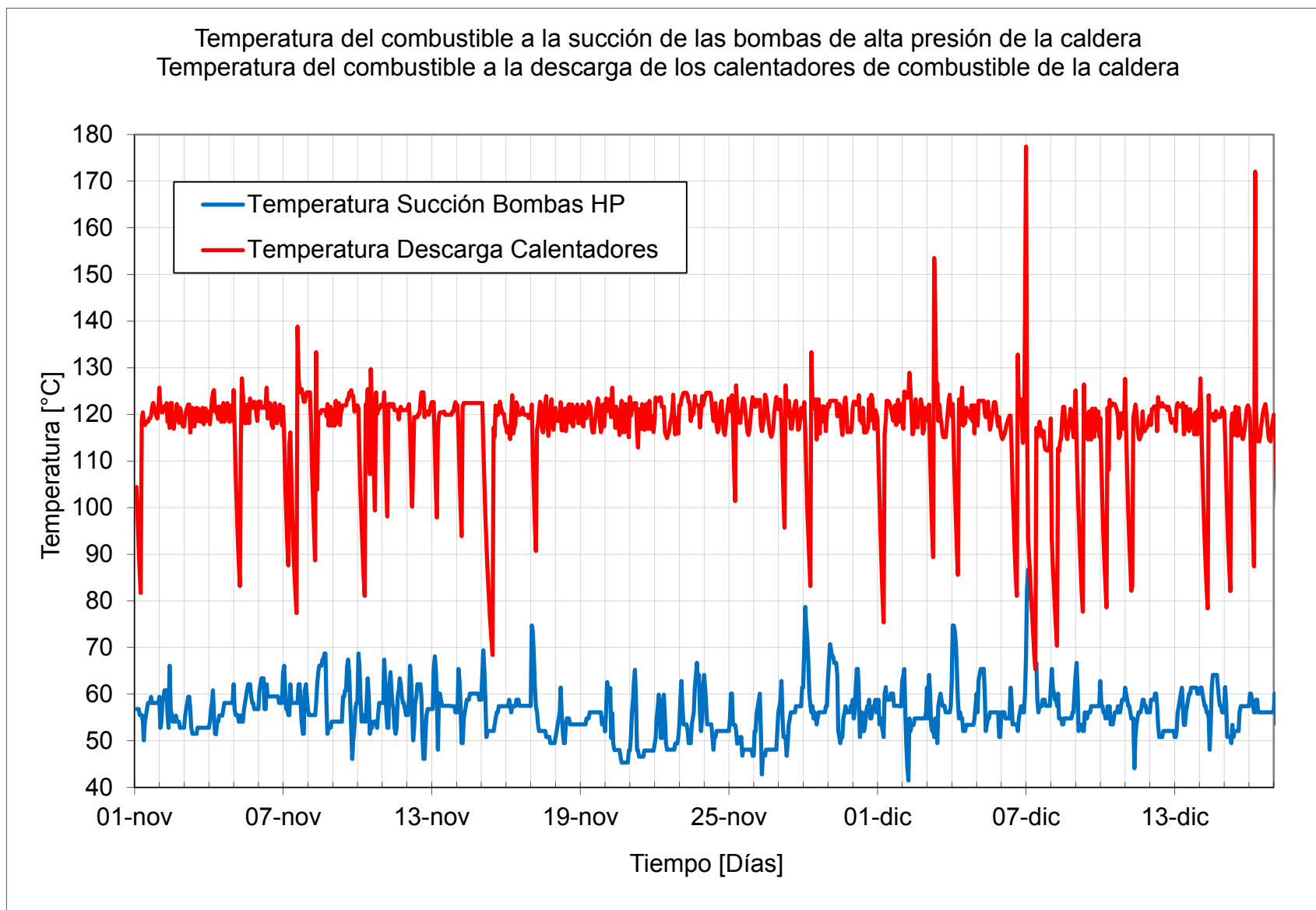


Gráfico 4.15 Temperatura del combustible a la succión de las bombas y a la descarga de los calentadores de la caldera.

(Fuente: Data DCS. Gráfica: Elaboración propia)

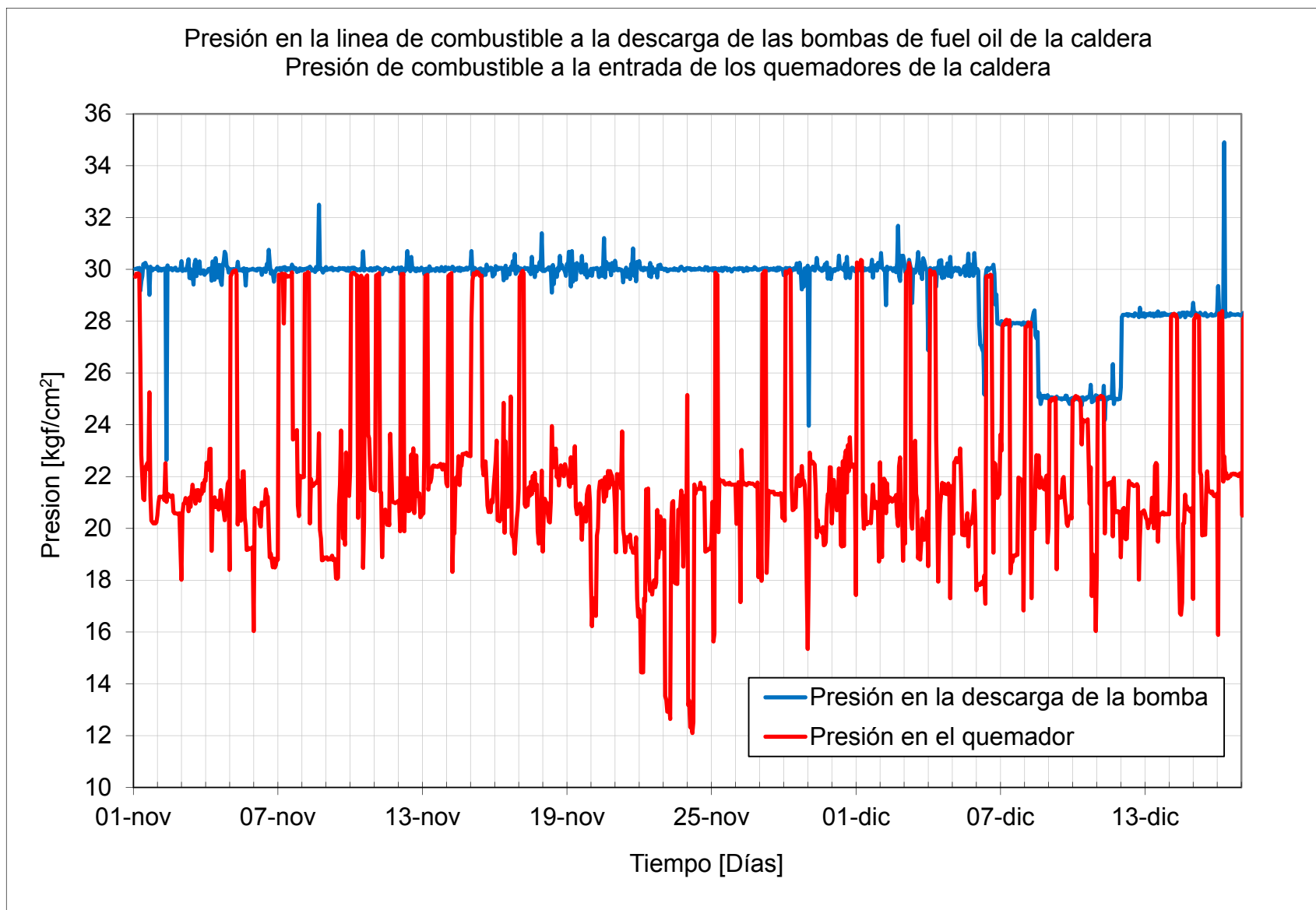


Gráfico 4.16 Presión en la línea de combustible a la descarga de las bombas y a la entrada de los quemadores de la caldera.

(Fuente: Data DCS. Gráfica: Elaboración propia)

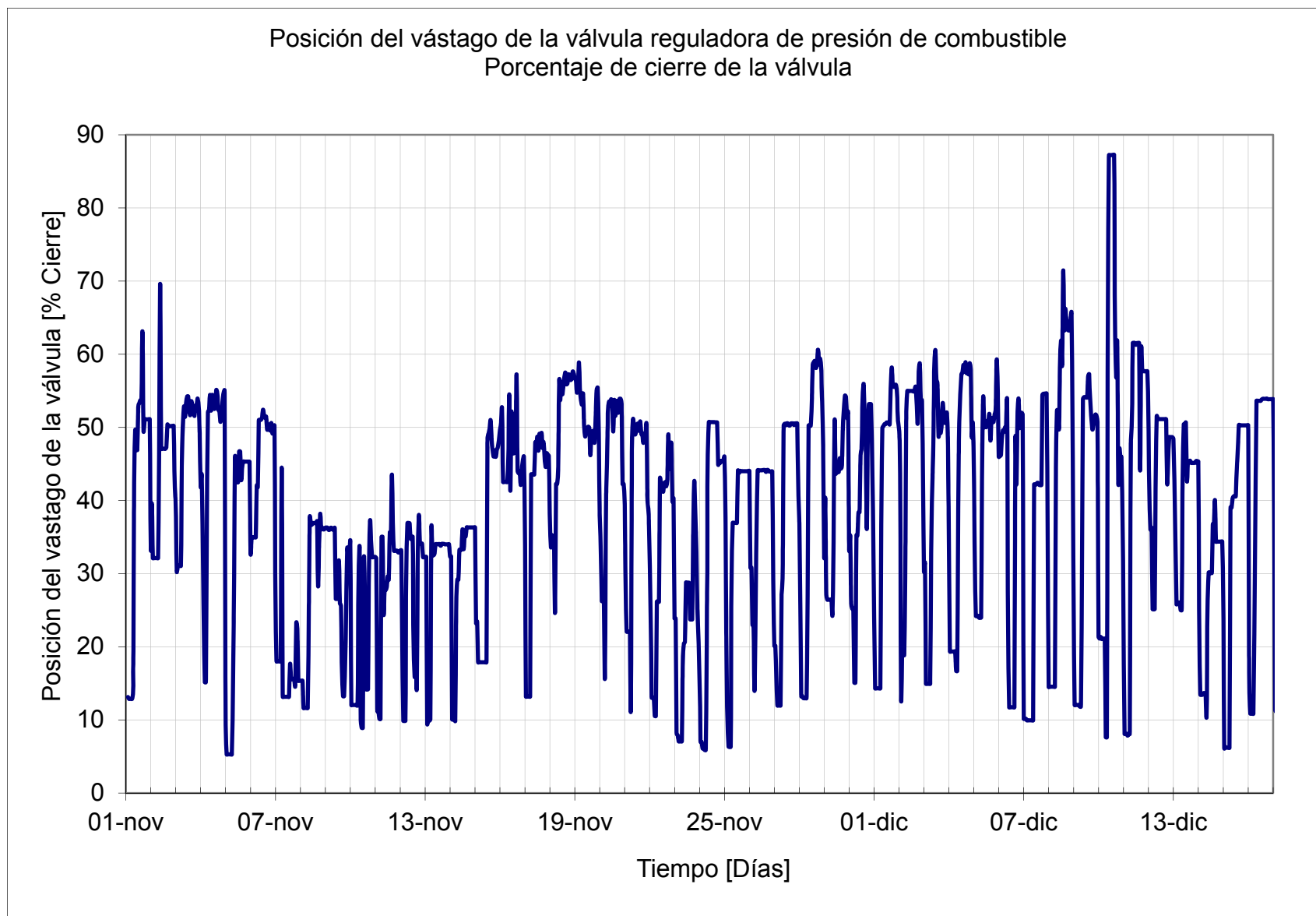


Gráfico 4.17 Posición del vástago de la válvula reguladora de presión de combustible. (Fuente: Data DCS. Gráfica: Elaboración propia)

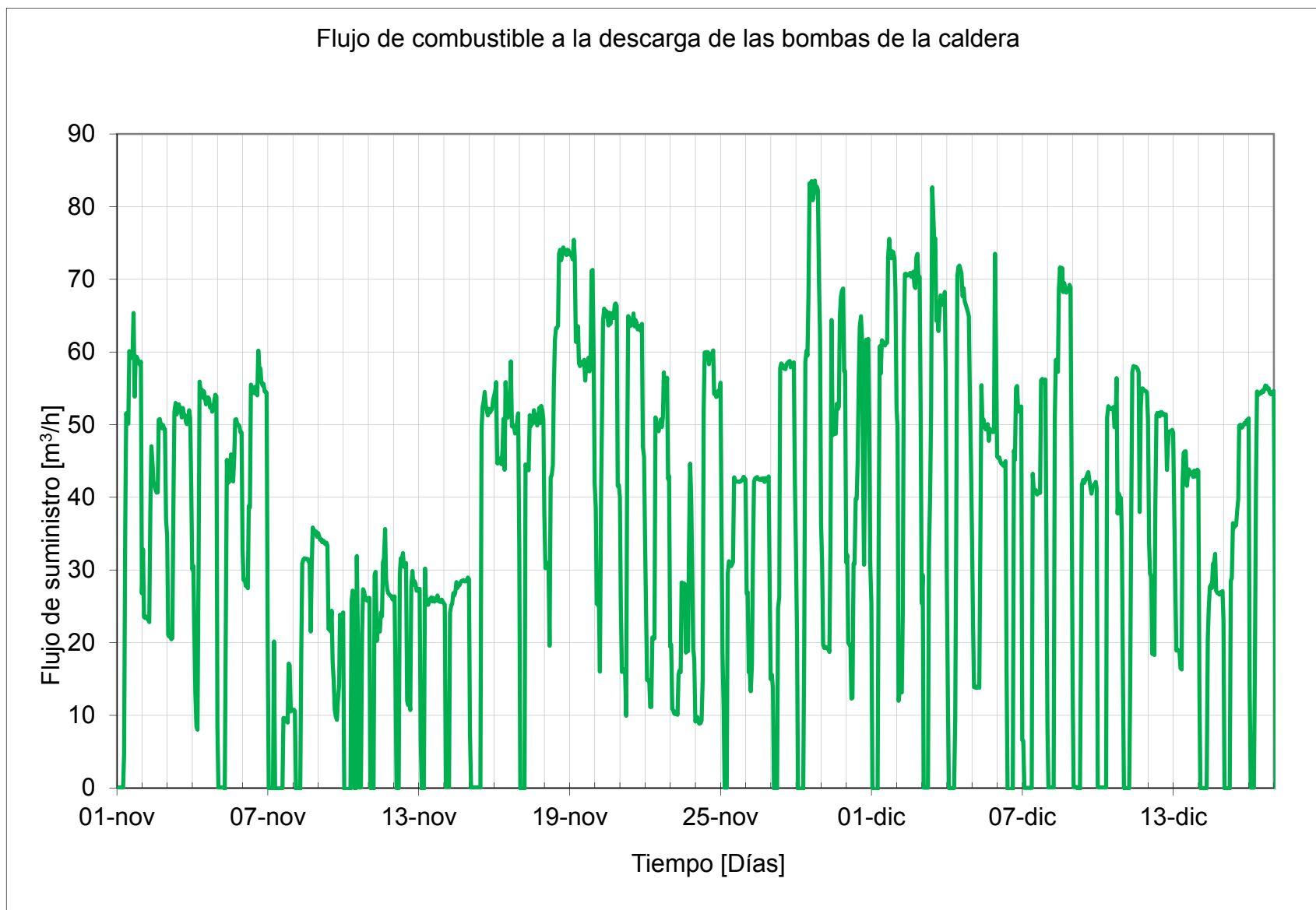


Gráfico 4.18 Flujo de combustible a la descarga de las bombas de la caldera. (Fuente: Data DCS. Gráfica: Elaboración propia)

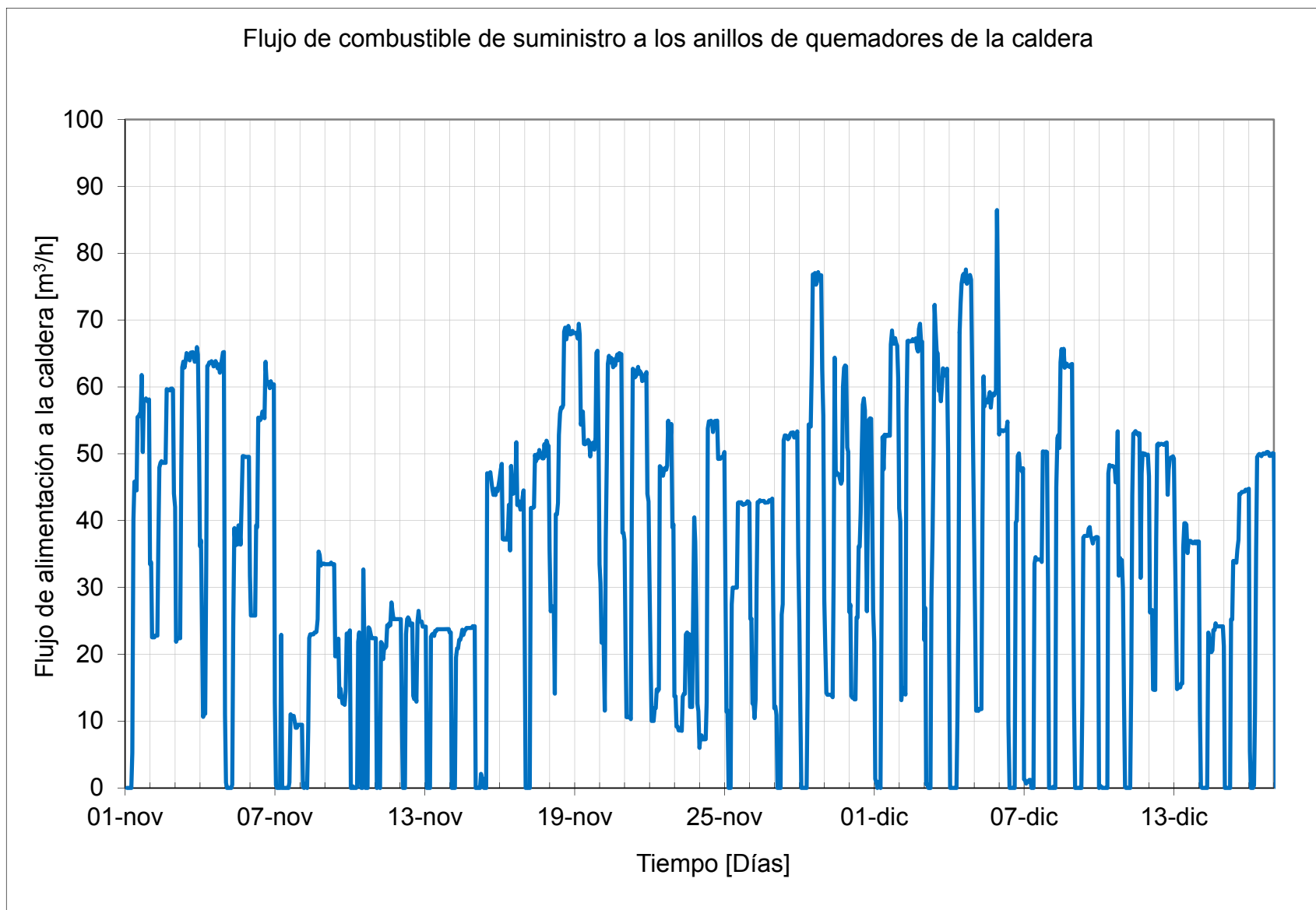


Gráfico 4.19 Flujo de combustible de suministro a los anillos de quemadores de la caldera. (Fuente: Data DCS. Gráfica: Elaboración propia)

4.6.3 UNIDAD TURBO GENERADORA N.º 8. (CALDERA – TURBINA DE LA U/8)

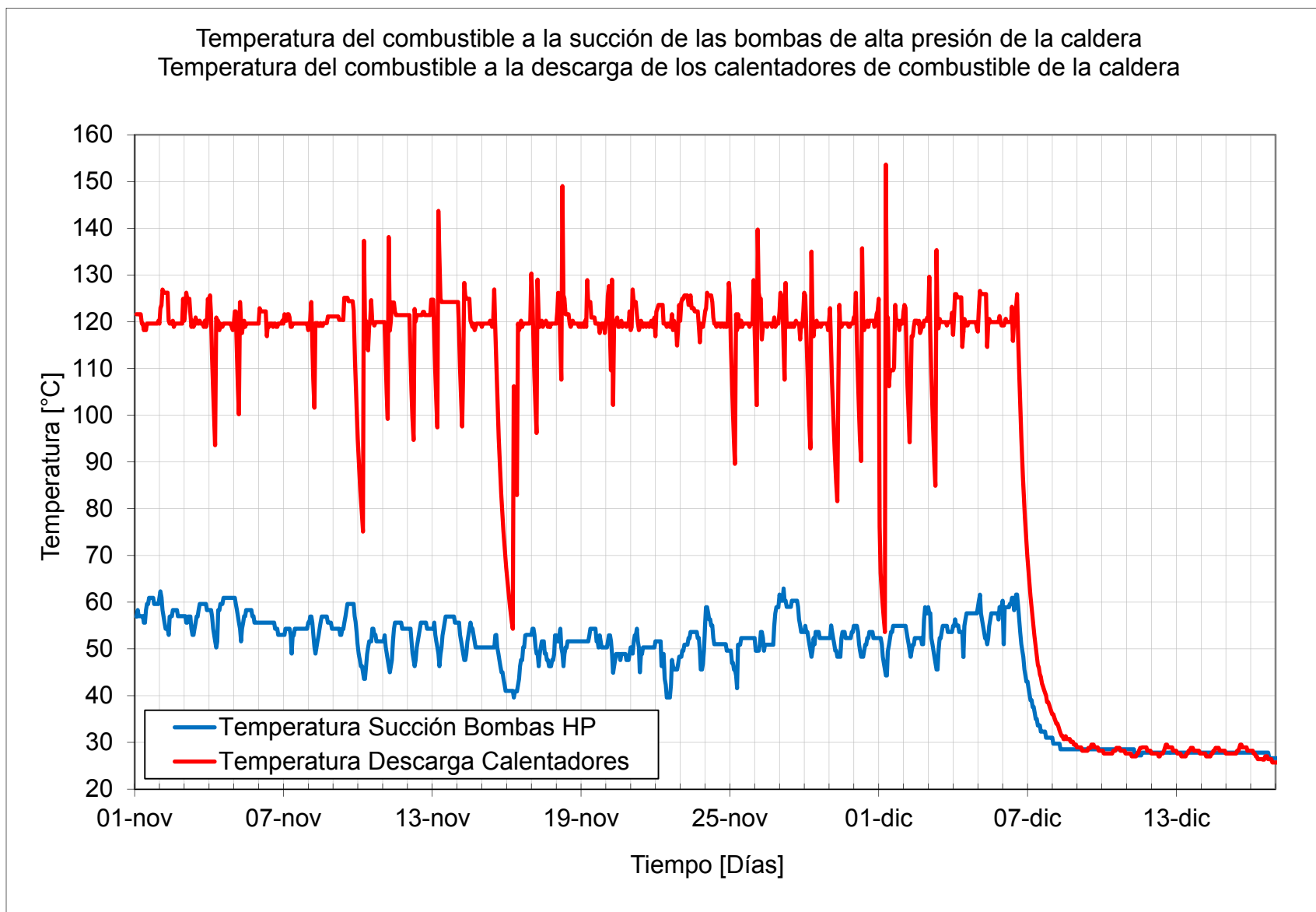


Gráfico 4.20 Temperatura del combustible a la succión de las bombas y a la descarga de los calentadores de la caldera.

(Fuente: Data DCS. Gráfica: Elaboración propia)

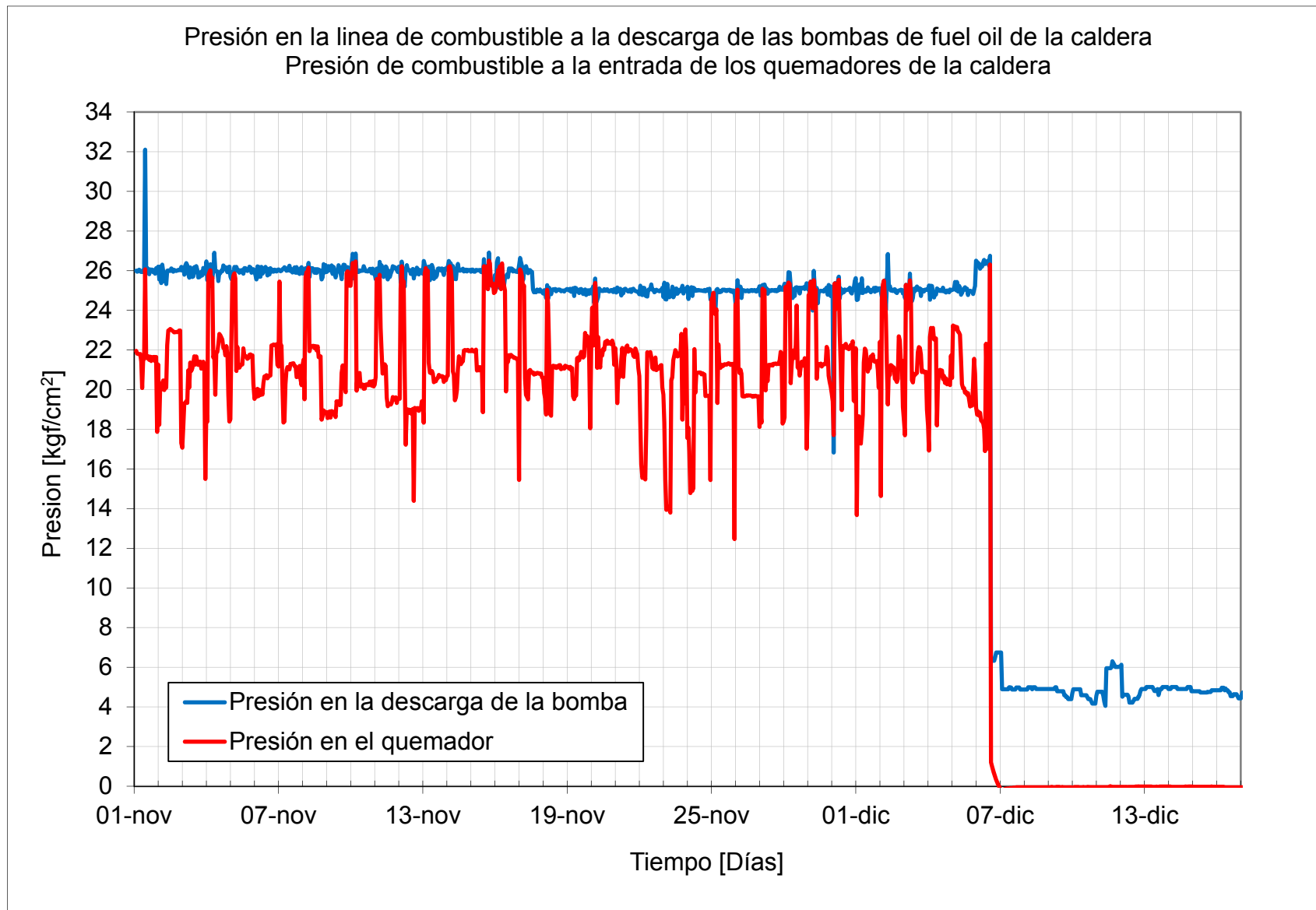


Gráfico 4.21 Presión en la línea de combustible a la descarga de las bombas y a la entrada de los quemadores de la caldera.

(Fuente: Data DCS. Gráfica: Elaboración propia)

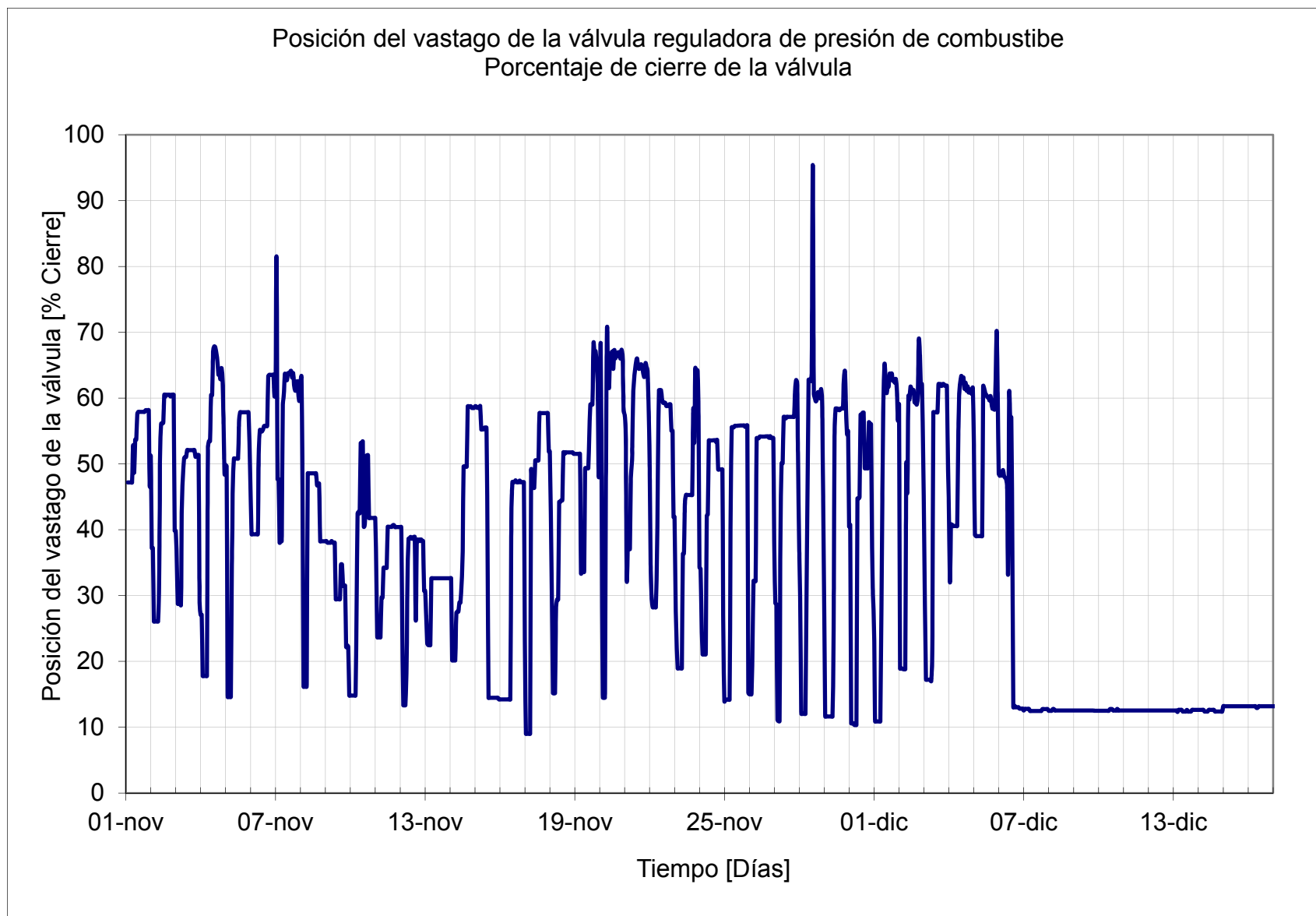


Gráfico 4.22 Posición del vástago de la válvula reguladora de presión de combustible. (Fuente: Data DCS. Gráfica: Elaboración propia)

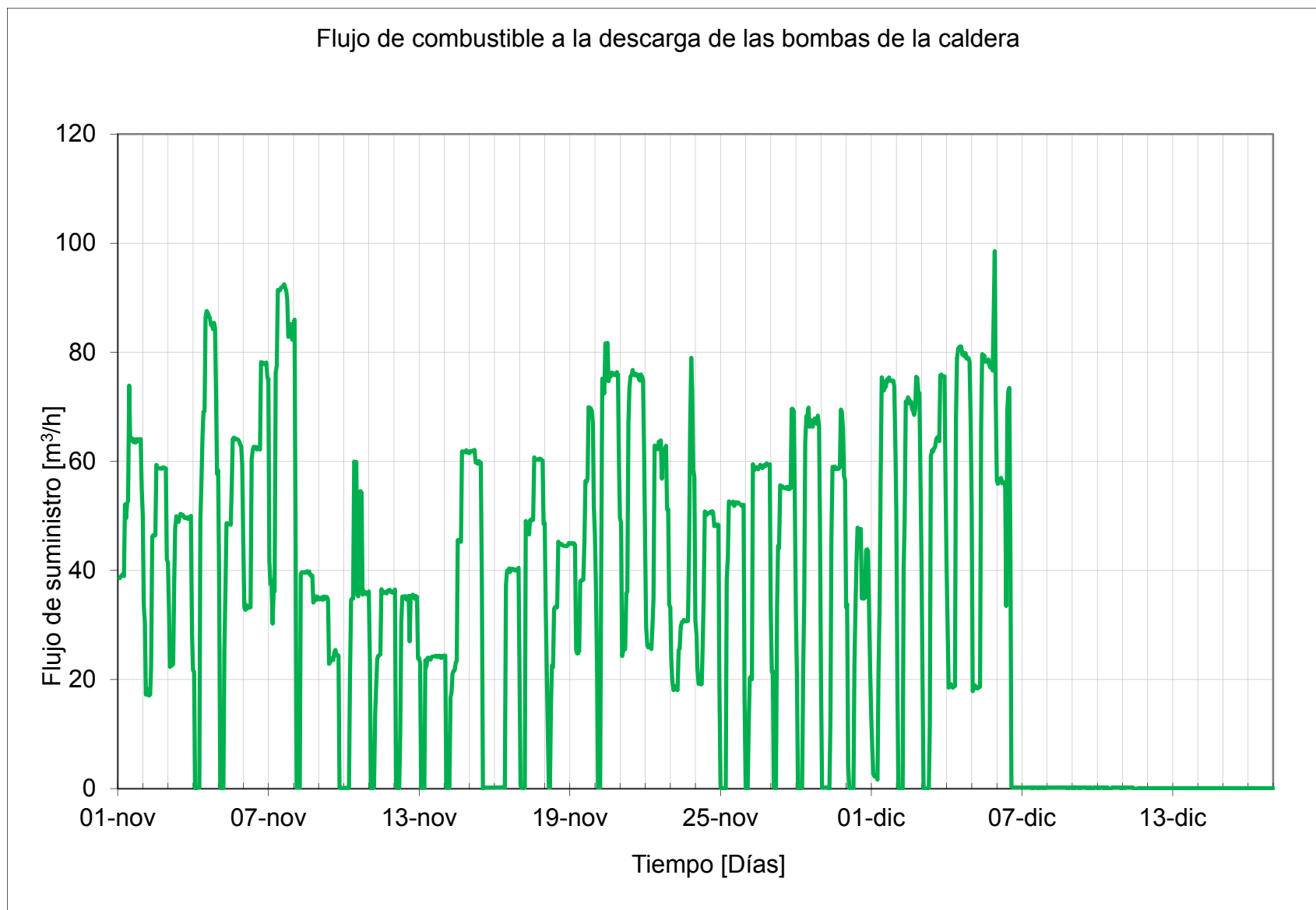


Gráfico 4.23 Flujo de combustible a la descarga de las bombas de la caldera. (Fuente: Data DCS. Gráfica: Elaboración propia)

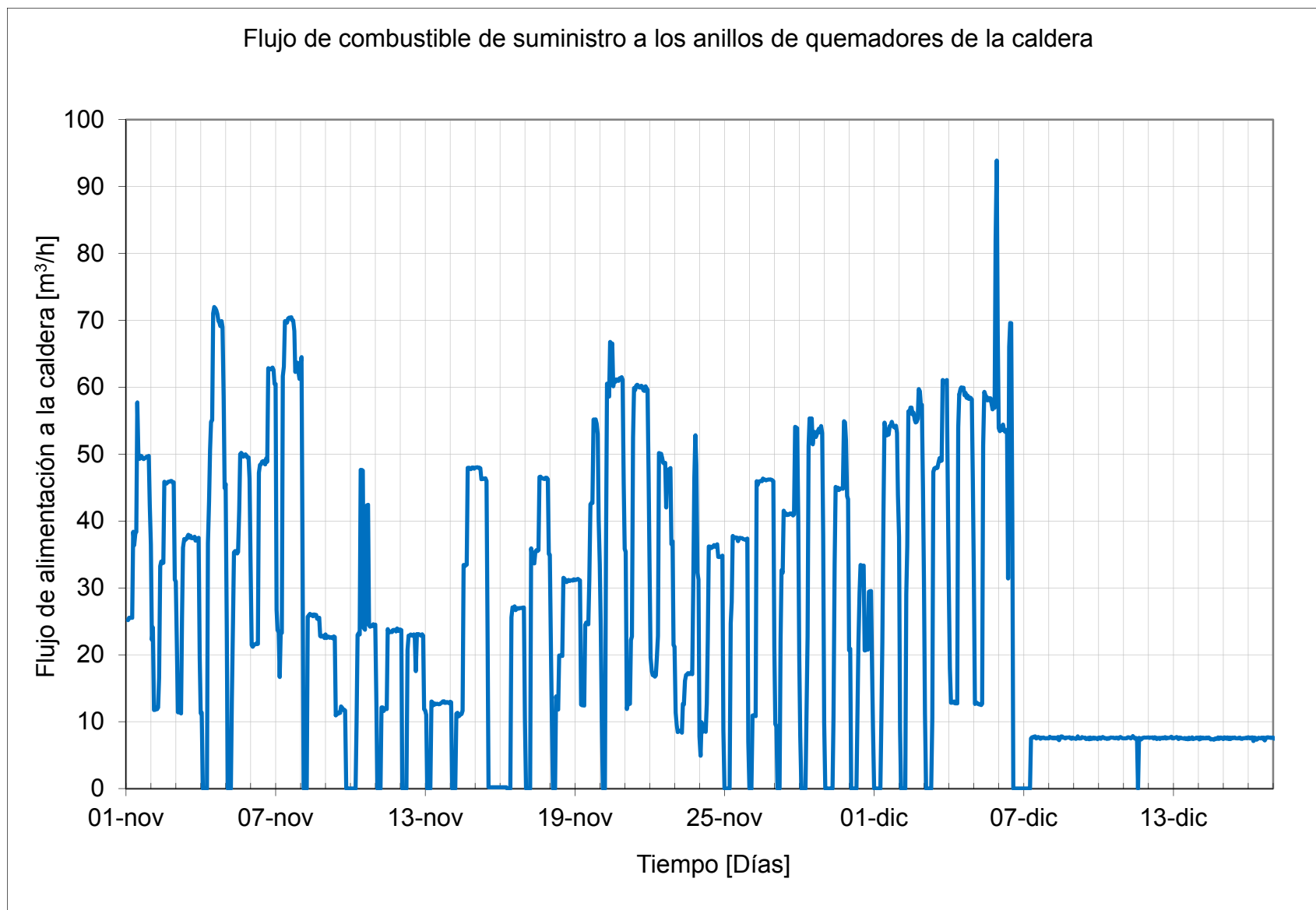


Gráfico 4.24 Flujo de combustible de suministro a los anillos de quemadores de la caldera. (Fuente: Data DCS. Gráfica: Elaboración propia)

4.6.4 UNIDAD TURBO GENERADORA N.º 9. (CALDERA – TURBINA DE LA U/9)

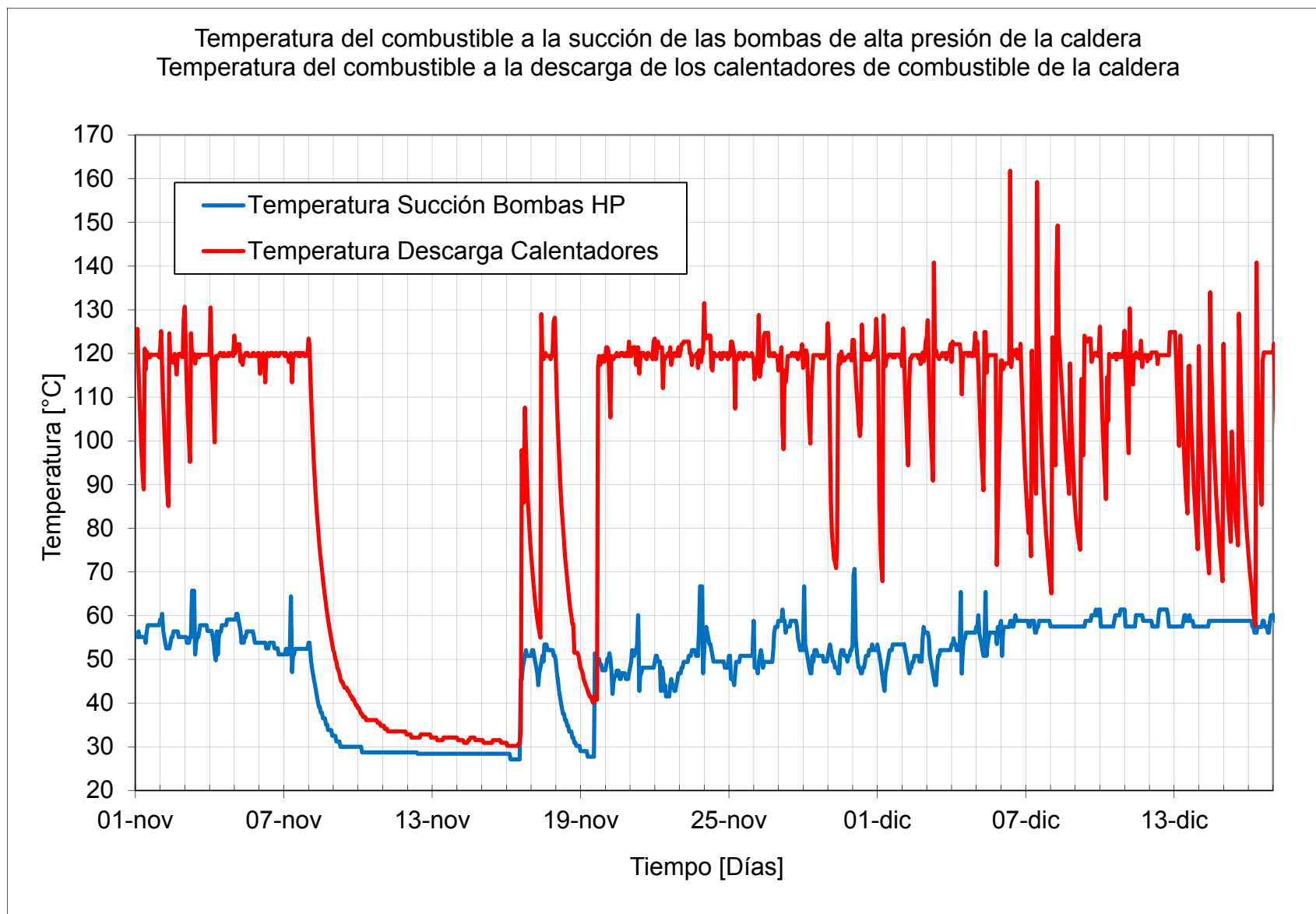


Gráfico 4.25 Temperatura del combustible a la succión de las bombas y a la descarga de los calentadores de la caldera.

(Fuente: Data DCS. Gráfica: Elaboración propia)

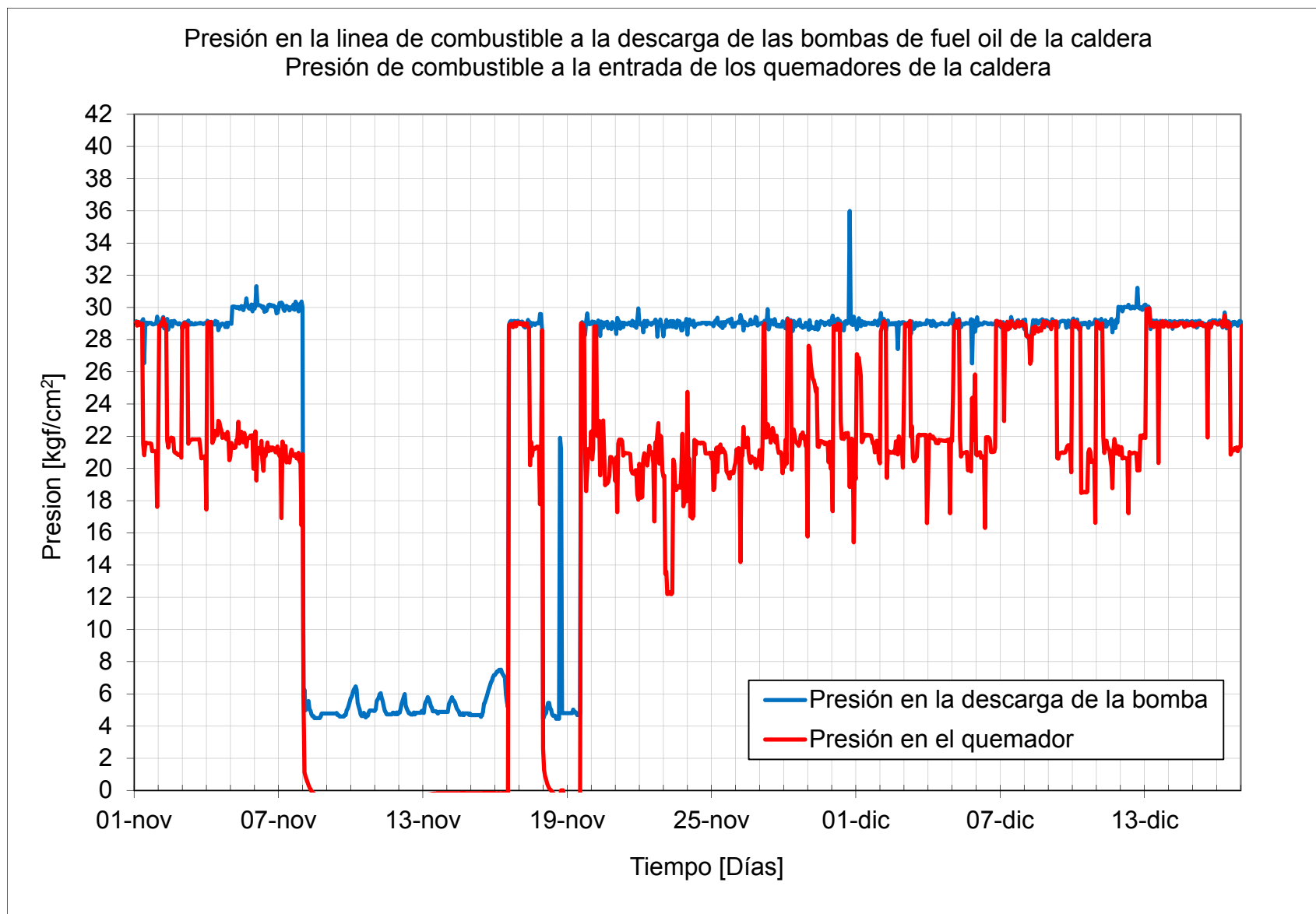


Gráfico 4.26 Presión en la línea de combustible a la descarga de las bombas y a la entrada de los quemadores de la caldera.

(Fuente: Data DCS. Gráfica: Elaboración propia)

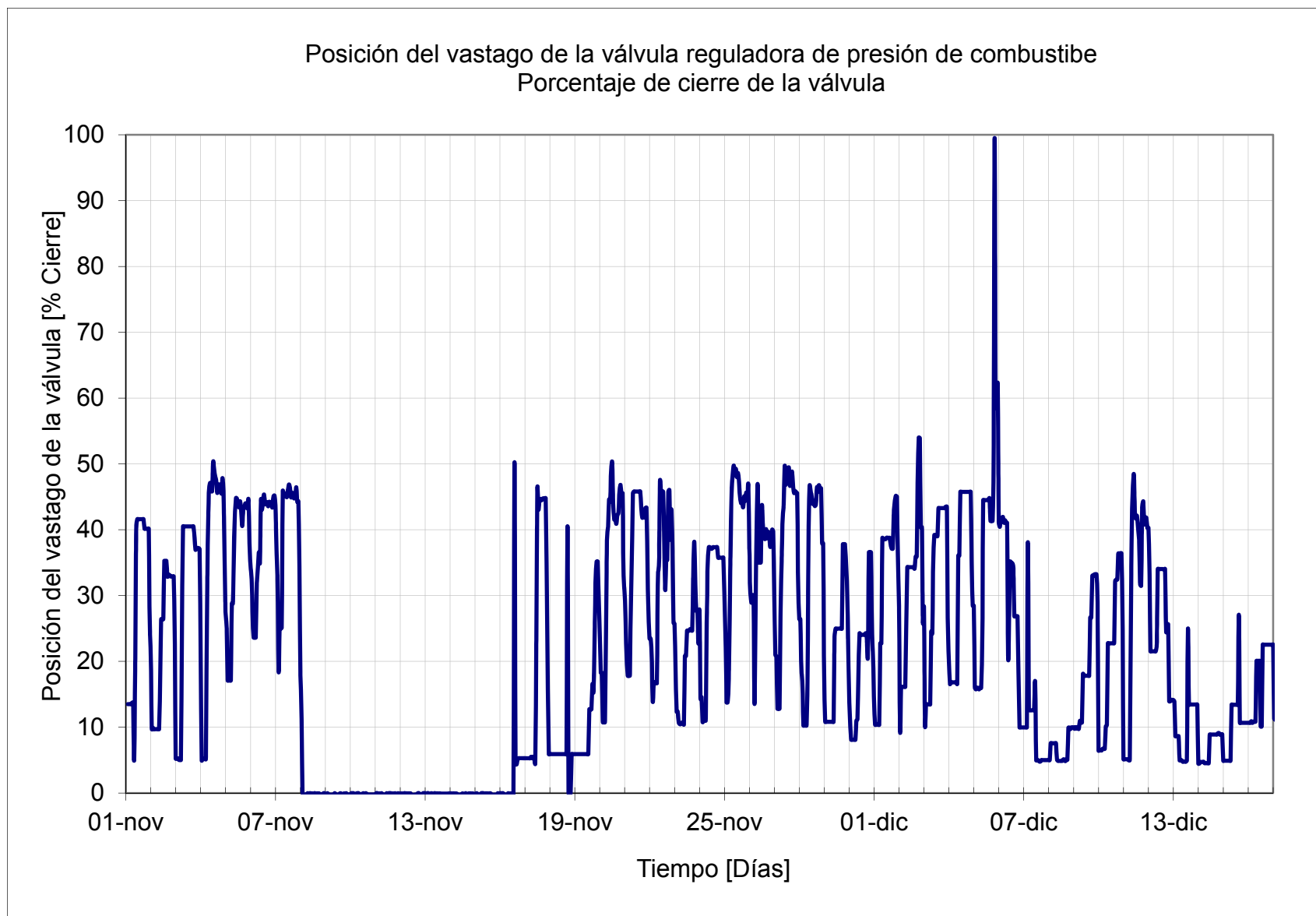


Gráfico 4.27 Posición del vástago de la válvula reguladora de presión de combustible. (Fuente: Data DCS. Gráfica: Elaboración propia)

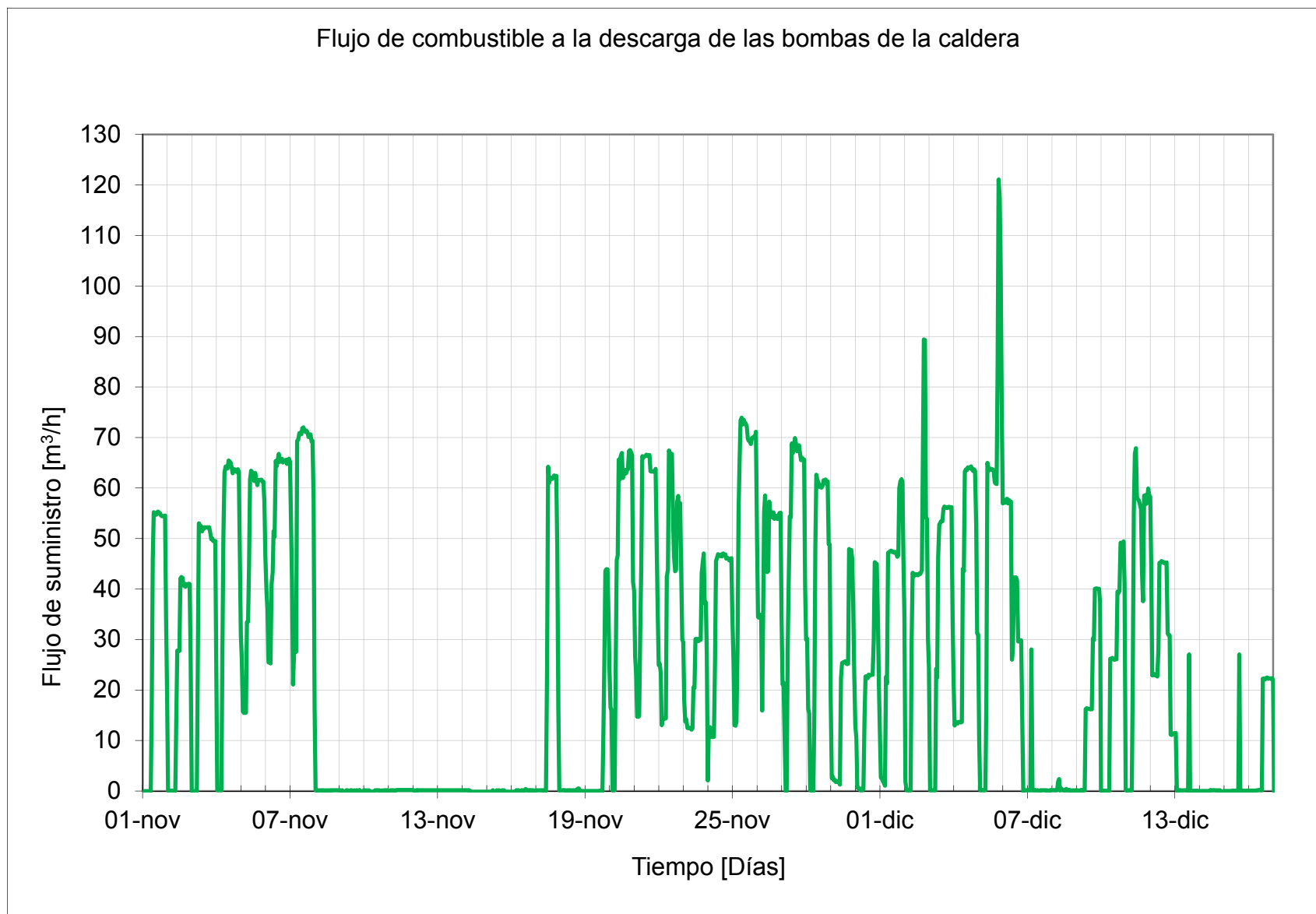


Gráfico 4.28 Flujo de combustible a la descarga de las bombas de la caldera. (Fuente: Data DCS. Gráfica: Elaboración propia)

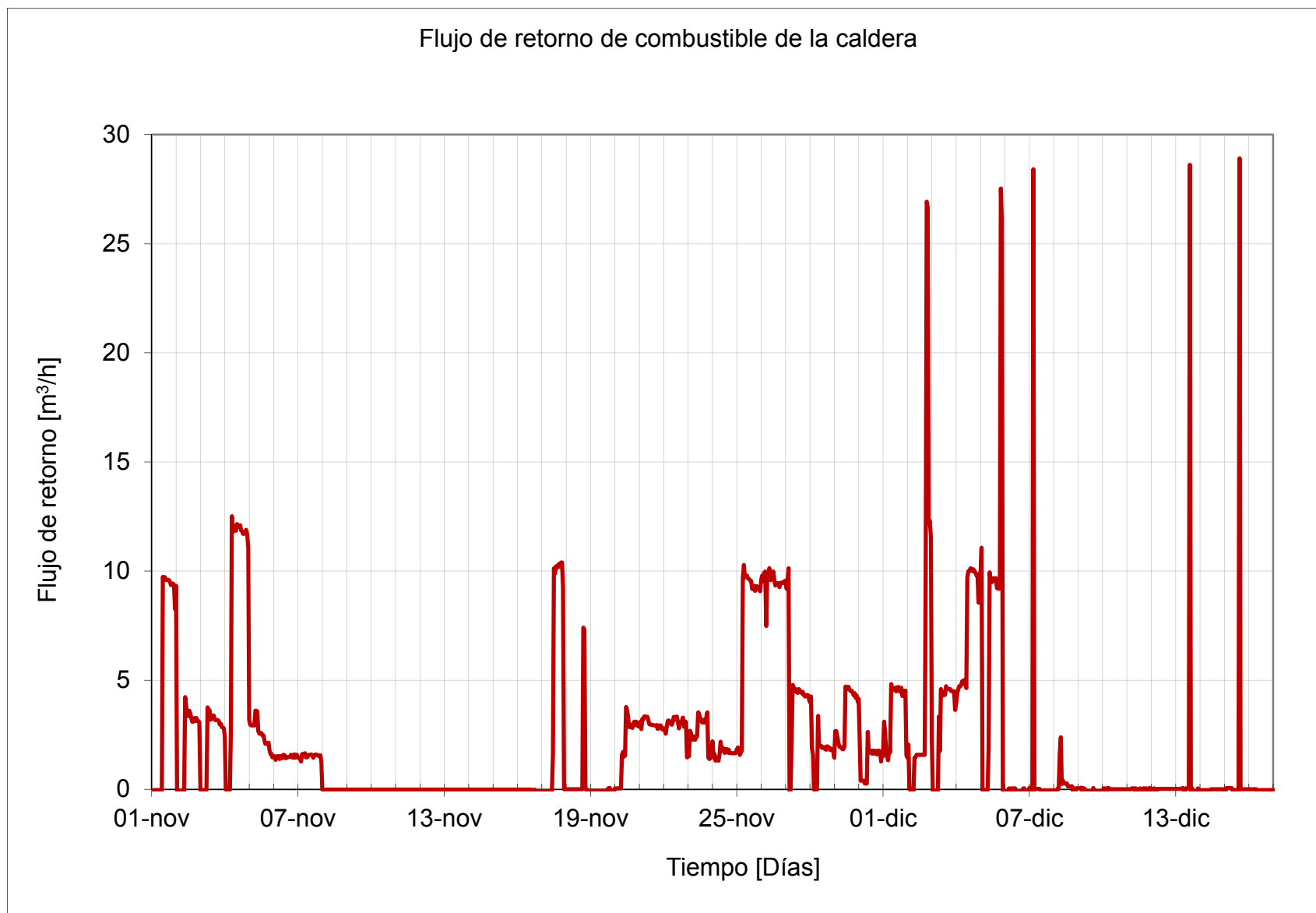


Gráfico 4.29 Flujo de retorno de combustible de la caldera. (Fuente: Data DCS. Gráfica: Elaboración propia)

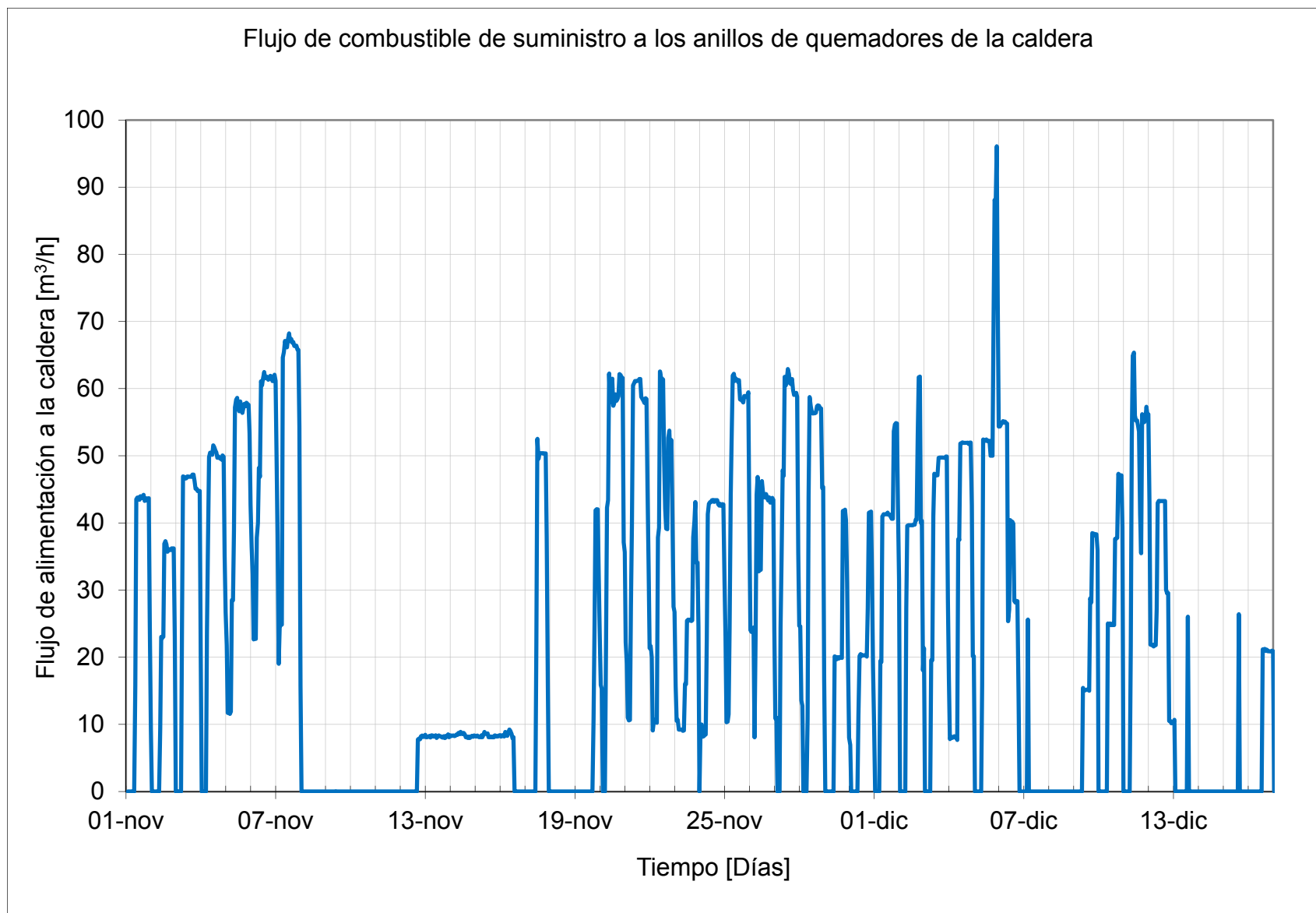


Gráfico 4.30 Flujo de combustible de suministro a los anillos de quemadores de la caldera. (Fuente: Data DCS. Gráfica: Elaboración propia)

4.7. REPORTES DIARIOS DE OPERACIÓN.

Esta sección se compone de tablas de datos y gráficos correspondientes a la información del sistema de combustible tomada por los operadores en el día a día en la planta, soportada en los reportes y libros diarios como parte de sus funciones.

Se muestra la data recogida en planta de los indicadores y manómetros, separada según los subsistemas del mismo.

Primero la estación de bombeo del sistema de transferencia de combustible (nivel 26), hay cuatro bombas en total de las cuales una no esta operativa, y los calentadores de combustible. Se toman los datos de presión manométrica a la succión y descarga de las bombas operativas (bombas 6 y 8), se toma la presión manométrica en el colector de succión de las bombas, y la temperatura del combustible a la salida del calentador.

Seguido se muestra el resumen de la lectura diaria del nivel de combustible almacenado en los tanques de fueloil en la planta, los cuales son: los tanques diarios n.º 4, 6 y 7 y el tanque n.º 10. El valor esta en metros y se referencia a la base del tanque.

A continuación la data del grupo de bombeo del tanque n.º 10, se toman las lecturas de la presión manométrica a la succión y a la descarga de las bombas, así como la presión diferencial en el filtro ubicado a la descarga de las mismas, también se toman las lecturas de temperatura y presión en el colector de succión de las bombas, por ultimo se toma lectura de la presión en el manómetro en el colector de descarga de las bombas.

La fuente de esta información son los reportes diarios de operación, asentados en los informes y reportes operacionales de la planta, facilitados por el personal del departamento de operaciones de la planta.

Tabla 4.10 Reporte diario de operación - Estación de petróleo nivel 26 (Sistema de Transferencia)

Días	Fecha	ESTACIÓN DE PETRÓLEO					
		BOMBA PP 05		BOMBA PP 08		COLECTOR	CALENT.
		PRES. DESCARGA [kgf/cm ²]	PRES. SUCCIÓN [kgf/cm ²]	PRES. DESCARGA [kgf/cm ²]	PRES. SUCCIÓN [kgf/cm ²]	PRES. SUCCIÓN [kgf/cm ²]	TEMP. SALIDA [°C]
1	11/12/08	4	2			2,8	75
2	11/12/08	4	2	4	1,9	2,8	74
3	11/12/08	5,8	2,2	5	1,8	2,8	72
4	08/12/08	4,1	2,2			2,8	70
5	08/12/08	4,5	2,3			2,8	70
6	06/12/08	5	2	4,7	1,4	2,8	65
7	05/12/08	3,2	2,1	5	2,2	2,8	55
8	05/12/08	3,2	2,1	5	2,2	2,8	58
9	04/12/08	5	2,2	5	1,8	2,8	55
10	04/12/08	5	2	5	1,8	2,8	55
11	03/12/08	5	2	4,8	1,8		
12	02/12/08	5	2	4	1,7	2,8	55
13	01/12/08	4,8	2,2	4,2	1,6	2,8	55
14	30/11/08	3,9	2,2			2,8	55
15	29/11/08	6	2	5,8	1,95	2,8	53
16	29/11/08	6,2	2,1	5,8	1,8	2,8	
17	28/11/08	6	2	5,6	1,7	2,8	
18	27/11/08	4,6	1,8	4,2	1,4	2,8	
19	26/11/08	5,6	2,2	5	1,7	2,8	
20	25/11/08	4	2,2			2,8	
21	25/11/08	5,2	1,9	4,8	1,6	2,8	
22	24/11/08	3,5	2,2			2,8	55
23	24/11/08	5,6	2	5	1,6	2,7	
24	24/11/08	6	2,2	5,5	1,6	2,8	60
25	23/11/08	4	2,1			2,8	55
26	23/11/08	4	2			2,8	60
27	22/11/08	6,1	2,2	6	1,4	2,8	55
28	22/11/08	5,4	2,1	5,2	1,4	2,7	
29	21/11/08	6	2,2				55
30	21/11/08	5,5	2	5	1,4	2,7	
31	19/11/08	4	2,5			2,8	60
32	19/11/08	4,2	2,2			2,7	
33	18/11/08	4,2	1,9				55
34	18/11/08	4	2			2,7	
35	17/11/08	5	2			2,8	60
36	17/11/08	4,8	2,3			2,8	55
37	17/11/08	4	2			2,8	60
38	16/11/08	4,6	2,2			2,8	55
39	16/11/08	4	2,2			2,8	60
40	15/11/08	4,2	2,2			2,7	
41	15/11/08	4,2	2,2			2,8	
42	15/11/08	5,5	2,5			2,8	60
43	14/11/08	4,2	2,2			2,7	
44	14/11/08	4,5	2,3			2,8	55
45	14/11/08	4,5	2,3			2,7	56

Días	Fecha	BOMBA PP 05		BOMBA PP 08		COLECTOR	CALENT.
		PRES. DESCARGA [kgf/cm ²]	PRES. SUCCIÓN [kgf/cm ²]	PRES. DESCARGA [kgf/cm ²]	PRES. SUCCIÓN [kgf/cm ²]	PRES. SUCCIÓN [kgf/cm ²]	TEMP. SALIDA [°C]
46	13/11/08	4,4	2,2			2,7	
47	13/11/08	4,2	2,2			2,8	
48	12/11/08	4,6	2,2			2,7	
49	12/11/08	4,2	2,2				
50	12/11/08	4,2	2,2			2,8	
51	11/11/08	4,4	2,2			2,7	
52	11/11/08	4,2	2,2			2,8	
53	11/11/08	4,2	2,3			2,8	
54	10/11/08	4	2			2,8	65
55	10/11/08	4	2,2			2,8	65
56	09/11/08	3,8	2			2,8	60
57	09/11/08	4	2,2			2,8	60
58	09/11/08	4	2,2			2,8	65
59	08/11/08	3,6	2,2			2,7	
60	08/11/08	4	2,2			2,8	65
61	07/11/08	3,8	2		2	2,8	65
62	07/11/08	4,2	2	4	1,5	2,8	65
63	06/11/08	3,5	1,8			2,8	60
64	06/11/08	5	2	4	1,4	2,8	60
65	05/11/08	4,8	2,1	4,4	1,8	2,8	
66	05/11/08	4	1,8	4	2,5	3	
67	04/11/08	4,4	2,1	4	1,7	2,8	
68	03/11/08	3,5	2			2,8	65
69	03/11/08	5	2	4,6	1,7	2,8	58
70	02/11/08	5,5	2	5	1,8	2,8	60
71	02/11/08	5,2	2,2	4,9	1,7	2,8	
72	01/11/08	3,8	2			2,8	60
73	01/11/08	4,8	2,1	4,6	1,7	2,8	
74	31/10/08	5,2	2	5,1	1,8	2,6	65
75	30/10/08	4	2				65
76	30/10/08	4	1,8				60
77	30/10/08	5,2	2,2	5	1,8	2,8	
78	29/10/08	5	2,1	4,5	1,7	3	65
79	29/10/08	5	2	4,5	1,8	3	65
80	29/10/08	4,8	2	4,5	1,7	2,8	
81	28/10/08	4	2				
82	28/10/08	4,2	2	4	1,6	2,8	60
83	28/10/08	4	2	4	1,6		60
84	27/10/08	4	2	4	1,8	2,8	60
85	27/10/08	4	2	4	1,8	2,8	60
86	26/10/08	4,8	2	4,6	1,8	2,8	
87	26/10/08	4,2	2,2	5	1,8	2,8	55
88	26/10/08	4,2	2,2	5	1,8	2,8	
89	25/10/08	5	2	4,6	1,6	2,8	
90	25/10/08	3	2	4	1,6	2,8	55
91	25/10/08	3,2	2	4	1,7	2,8	
92	24/10/08	3,6	2,1	4	1,8	2,8	
93	24/10/08	3,6	2,1	4	1,8	2,8	
94	24/10/08	3,6	2,1	4	1,8	2,8	
95	23/10/08	5	2,1	5	1,6	2,8	

Días	Fecha	BOMBA PP 05		BOMBA PP 08		COLECTOR	CALENT.
		PRES. DESCARGA [kgf/cm ²]	PRES. SUCCIÓN [kgf/cm ²]	PRES. DESCARGA [kgf/cm ²]	PRES. SUCCIÓN [kgf/cm ²]	PRES. SUCCIÓN [kgf/cm ²]	TEMP. SALIDA [°C]
96	23/10/08	4,8	2	4,2	1,8	2,8	55
97	23/10/08	4,3	2,2	4,1	1,8	2,8	
98	22/10/08	3	2			2,8	
99	22/10/08	4,8	2,1			2,8	50
100	21/10/08	3,8	2			2,8	60
101	21/10/08	3,2	1,9			2,8	50
102	20/10/08	3,8	2			2,8	
103	20/10/08	4	2			2,8	
104	20/10/08	4,3	2			2,8	50
105	19/10/08	3,8	2			2,8	
106	19/10/08	5,6	2,2			2,8	
107	19/10/08	5,5	2,1			2,8	55
108	18/10/08	3,8	2			2,8	
109	18/10/08	6	2,1			2,8	
110	17/10/08	5,8	2	5,6	1,7	2,8	
111	17/10/08	4	2			2,8	
112	16/10/08	4,4	2,1			2,8	
113	15/10/08	6,5	2	6	1,7	2,8	
114	15/10/08	6,4	2	6	1,7	2,8	
115	14/10/08	5,4	2,2			2,8	55
116	13/10/08	3,9	2,2			2,8	55
117	12/10/08	4,9	2,2			2,8	55
118	12/10/08	4,6	2,2			2,8	60
119	11/10/08	4	2,2			2,4	
120	11/10/08	4,2	2,2			2,5	
121	10/10/08	3,4	2,1			2,4	
122	10/10/08	4	2	3,7	1,9	2,8	
123	09/10/08	3,8	2,2	3,7	1,8	2,8	
124	09/10/08	3,9	2,1	3,7	1,8	2,8	
125	09/10/08	3,8	2,1	4	1,9	2,8	
126	08/10/08	4,7	2,1	4,4	2	2,2	
127	08/10/08	4,5	2,1	4,4	2	2,4	
128	07/10/08	4	2,5				
129	06/10/08	3,9	2			2,8	55
130	06/10/08	3,8	2,1			2,9	
131	05/10/08	4,3	2,1			2,8	
132	04/10/08	3,8	2			2,8	
133	04/10/08	2,9	1,8			2,8	
134	02/10/08	3,5	2			2,8	60
135	02/10/08	3	1,8			2,8	55
136	02/10/08	3	2			2,8	
137	30/09/08	4	1,8			2,8	55
138	29/09/08	5,3	2,3			2,8	
139	29/09/08	6	1,9	6	2,2	2,8	55
140	28/09/08	6,5	2			2,8	
141	28/09/08	3,6	1,8			2,8	
142	27/09/08	6	2			2,8	
143	27/09/08	5	1,8			2,8	
144	27/09/08	6	2,1			2,8	55
145	26/09/08	3,6	2			2,8	55

Días	Fecha	BOMBA PP 05		BOMBA PP 08		COLECTOR	CALENT.
		PRES. DESCARGA [kgf/cm ²]	PRES. SUCCIÓN [kgf/cm ²]	PRES. DESCARGA [kgf/cm ²]	PRES. SUCCIÓN [kgf/cm ²]	PRES. SUCCIÓN [kgf/cm ²]	TEMP. SALIDA [°C]
146	25/09/08	3,6	2,2			3	54
147	25/09/08	3,4	2,2			3	
148	24/09/08	4	2,2			2,8	60
149	24/09/08	3,5	2,18			2,8	54
150	23/09/08	4	2,2			2,8	60
151	22/09/08	6	2			2,8	58
152	22/09/08	6	2			2,8	55
153	22/09/08	7,9	2,02			3	50
154	19/09/08	7,2	2,2			2,8	55
155	19/09/08	7,2	2,1			2,8	
156	18/09/08	7	2			3	50
157	18/09/08	7	2			3	50
158	18/09/08	6,4	2,2			3	50
159	18/09/08	7	2,1			3	50
160	16/09/08	6	2,2			2,8	50
161	16/09/08	6	2,2			2,8	50
162	14/09/08	3,8	2				75
163	14/09/08	6,8	2,05			3	
164	14/09/08	6,4	2,2			3	
165	12/09/08	7,6	2			3	65
166	12/09/08	7,4	2,01			2,8	65
167	11/09/08	7	2			2,8	65
168	11/09/08	6,7	2,2			3	
169	10/09/08	7,8	2			2,8	60
170	10/09/08	6,7	2,2			3	
171	09/09/08	3,8	2			3,8	65
172	08/09/08	3,8	2			2,8	65
173	07/09/08	3	1,8			2,8	65
174	07/09/08	3,6	1,8			2,8	
175	06/09/08	4,1	2,2			3	65
176	06/09/08	4	2,2			2,8	60
177	05/09/08	3,6	1,9			2,7	60
178	03/09/08	3,3	2,2			2,8	65
179	03/09/08	4	2,1			2,7	62
180	02/09/08	4	2,3			2,8	55
181	02/09/08	4	2,2			2,8	60
182	02/09/08	3,8	2,2			2,7	68
183	01/09/08	3,8	2,5			2,8	65
184	31/08/08	3,8	2,2			2,7	
185	30/08/08	3,7	2			2,7	
186	29/08/08	3,8	2,2			2,8	70
187	29/08/08	3,8	2			2,8	65
188	28/08/08	3,8	1,8			2,8	65
189	26/08/08	4	2			2,7	
190	26/08/08	3,5	2			2,8	65
191	26/08/08	3,8	2			2,8	65
MÁXIMO		7,9	2,5	6	2,5	3,8	75
MÍNIMO		2,9	1,8	3,7	1,4	2,2	50

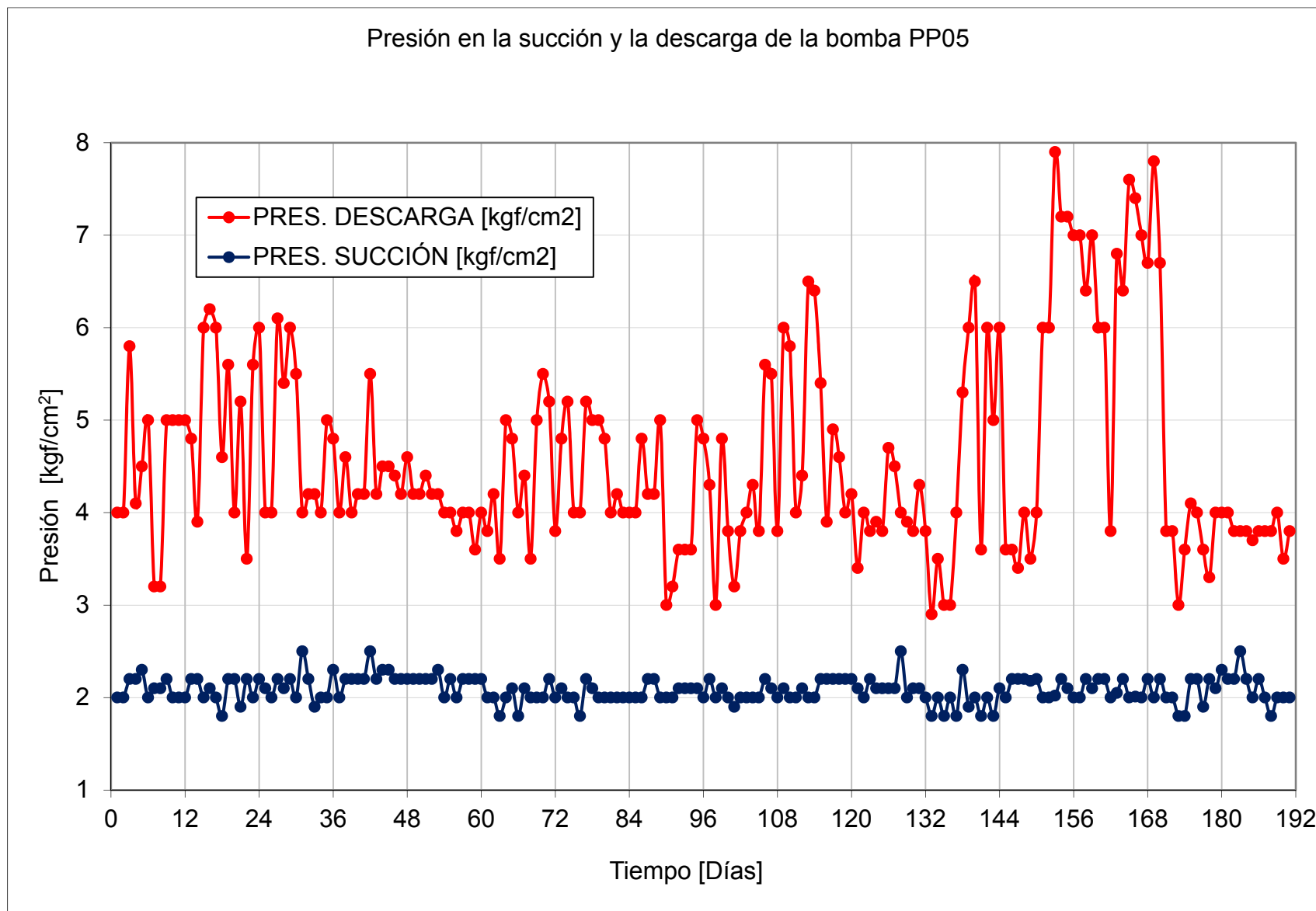


Gráfico 4.31 Presión en la succión y la descarga de la bomba PP05. (Fuente: Reportes Diarios de Operación. Gráfica: Elaboración propia)

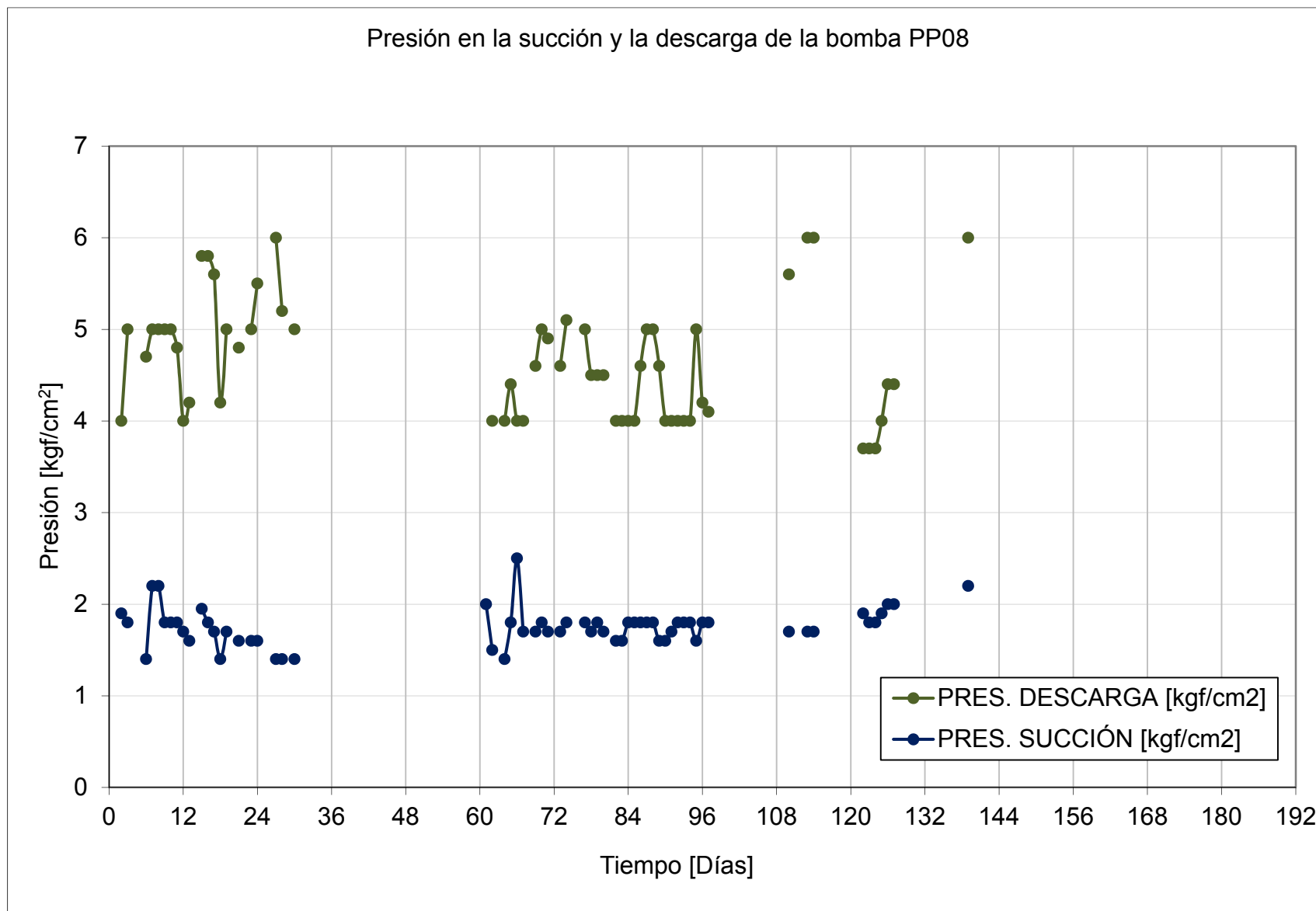


Gráfico 4.32 Presión en la succión y la descarga de la bomba PP08. (Fuente: Reportes Diarios de Operación. Gráfica: Elaboración propia)

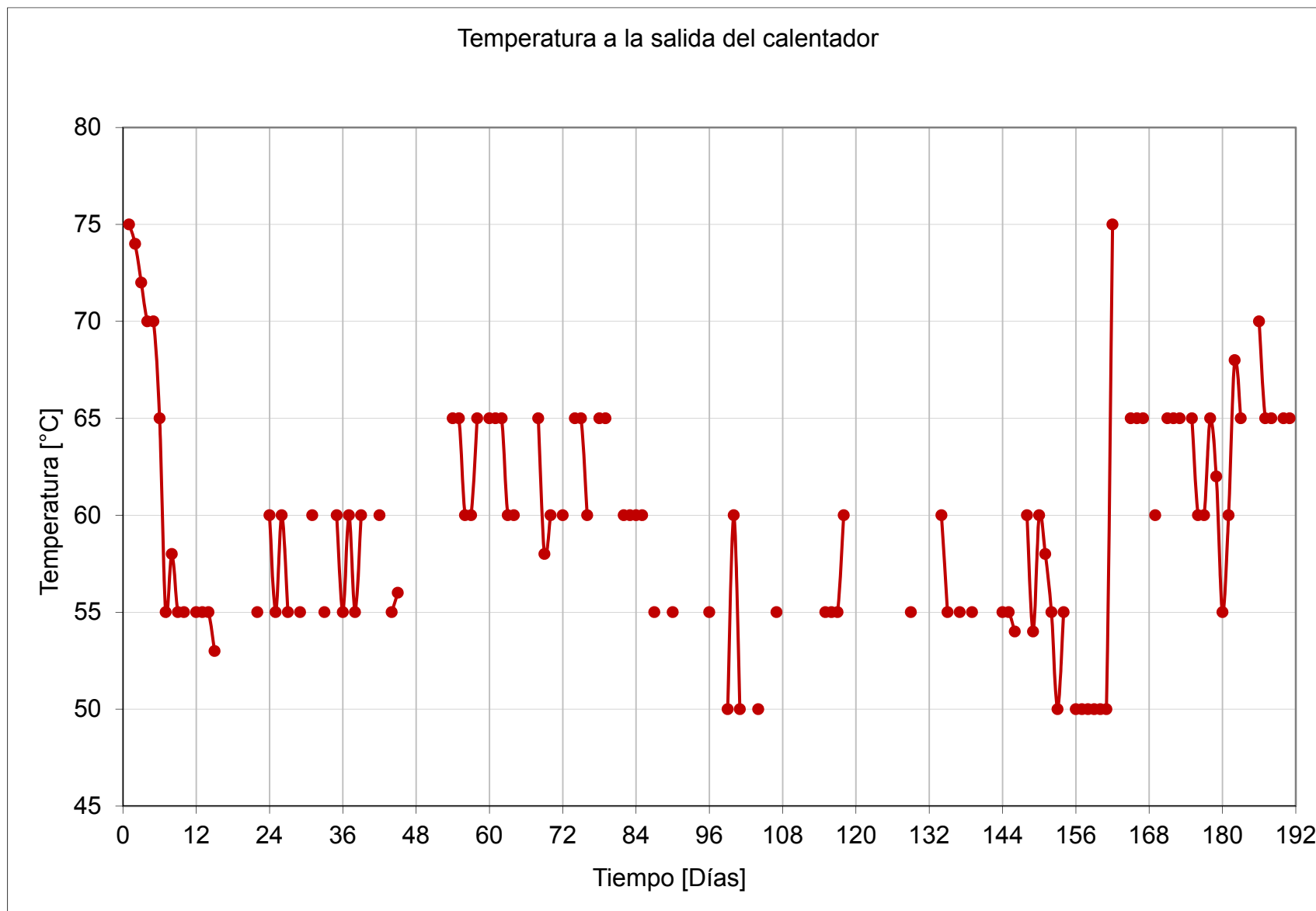


Gráfico 4.33 Temperatura a la salida del calentador. (Fuente: Reportes Diarios de Operación. Gráfica: Elaboración propia)

Tabla 4.11 Nivel de llenado de los tanques de combustible (lecturas tomadas por los operadores directamente del tanque con plomada)

Día	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Fecha	07/07/2008	08/07/2008	09/07/2008	10/07/2008	11/07/2008	12/07/2008	13/07/2008	14/07/2008	15/07/2008	16/07/2008	17/07/2008
Tanque	N.° 4	10,14	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11
	N.° 6	7,43	8,56	6,75	6,65	8,07	8,74	9,16	4,97	9,11	9,84
	N.° 7	7,72	8,66	8,9	7,09	10,05	9,35	8,64	8,91	6,52	9,38
	N.° 10	15,26	15,05	13,29	11,03	7,32	6,23	5,53	12,86	15,59	12,28

Día	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Fecha	18/07/2008	19/07/2008	20/07/2008	21/07/2008	22/07/2008	23/07/2008	24/07/2008	25/07/2008	26/07/2008	27/07/2008	28/07/2008
Tanque	N.° 4	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	10,11	7,54	4,91	9,03	8,96
	N.° 6	8,12	10,2	9,82	7,89	9,44	7,75	3,85	10,07	11	10,93
	N.° 7	9,62	9,68	9,61	9,97	7,71	3,98	1,44	7,64	9,69	9,69
	N.° 10	8,53	5,63	4,21	2,63	1,04	0,68	0,68	4,49	12,63	8,94

Día	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
Fecha	29/07/2008	30/07/2008	31/07/2008	01/08/2008	02/08/2008	03/08/2008	04/08/2008	05/08/2008	06/08/2008	07/08/2008	08/08/2008
Tanque	N.° 4	8,54	7,84	6,77	6,38	2,7	2,28	7,03	10,41	10,41	10,41
	N.° 6	11,01	11,01	11,02	11,02	11,02	9,91	5,82	9,1	9,73	8,15
	N.° 7	9,7	9,69	9,69	9,7	9,69	9,71	8,5	6,66	4,37	10,34
	N.° 10	7,83	6,47	4,18	1,25	0,94	0,94		8,96	6,28	2,35

Día	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
Fecha	09/08/2008	10/08/2008	11/08/2008	12/08/2008	13/08/2008	14/08/2008	15/08/2008	16/08/2008	17/08/2008	18/08/2008	19/08/2008
Tanque	N.° 4	10,41	8,18	6,18	7,38	7,91	8,72	6,81	6,46	7,85	8,2
	N.° 6	2,42	2,13	5,5	5,96	5,96	5,96	8,87	8,87	9,04	8,88
	N.° 7	8	7,98	7,65	7,61	7,61	7,25	9,53	8,56	7,37	9,38
	N.° 10	0,78	10,91	15,56	13,34	11,93	10,29	8,11	7,5	6,52	4,09

Día	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55
Fecha	20/08/2008	21/08/2008	22/08/2008	23/08/2008	24/08/2008	25/08/2008	26/08/2008	27/08/2008	28/08/2008	29/08/2008	30/08/2008
Tanque	N.° 4	8,84	8,84	9,27	9,56	9,41	8,51	9,86	9,23	10,06	9,7
	N.° 6	8,87	8,87	8,87	8,87	8,87	8,87	8,87	10,43	10,43	10,42
	N.° 7	7,15	7,15	7,79	5,54	8,87	9,82	7,81	8,59	7,53	10,02
	N.° 10	1,67	1,67	11,01	18,33	15,98	13,34	13,93	11,48	7,8	6,08

Nivel de llenado de los tanques de combustible (lecturas tomadas por los operadores directamente del tanque con plomada)

Día	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66
Fecha	31/08/2008	01/09/2008	02/09/2008	03/09/2008	04/09/2008	05/09/2008	06/09/2008	07/09/2008	08/09/2008	09/09/2008	10/09/2008
Tanque	N.° 4		10,22	9,28	9,97	6,38	9,56	7,51	10,21	10,2	10,19
	N.° 6		10,42	10,42	10,42	10,42	10,46	10,46	10,46	10,42	10,41
	N.° 7		10,67	10,66	10,66	10,18	10,18	9,68	9,62	9,62	8,33
	N.° 10		4,59	4,58	3,87	3,91	14,56	18,15	16,48	16,48	16,46

Día	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77
Fecha	11/09/2008	12/09/2008	13/09/2008	14/09/2008	15/09/2008	16/09/2008	17/09/2008	18/09/2008	19/09/2008	20/09/2008	21/09/2008
Tanque	N.° 4	10,19	10,19	10,19	10,19	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2	10,17
	N.° 6	10,42	10,42	10,42	10,42	10,42	10,42	10,42	10,42	10,42	10,4
	N.° 7	9,04	8,28	7,95	7,35	7,88	7,84	7,91	9,29	8,07	7,11
	N.° 10	14,09	12,72	11,06	9,91	7,99	6,31	4,31	2,48	1,64	8,42

Día	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88
Fecha	22/09/2008	23/09/2008	24/09/2008	25/09/2008	26/09/2008	27/09/2008	28/09/2008	29/09/2008	30/09/2008	01/10/2008	02/10/2008
Tanque	N.° 4	9,6	9,67	9,39	8,4	5,57	5,13	3,67	1,35	1,35	4,47
	N.° 6	10,42	10,4	10,4	10,4	10,4	10,41	10,41	7,23	1,99	7,49
	N.° 7	6,04	7,94	8,5	7,16	6,34	2,94	1,95	1,68	1	0,99
	N.° 10	8,6	6,76	3,93	2,6	0,85	0,85	0,85	0,74	0,74	15,76

Día	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99
Fecha	03/10/2008	04/10/2008	05/10/2008	06/10/2008	07/10/2008	08/10/2008	09/10/2008	10/10/2008	11/10/2008	12/10/2008	13/10/2008
Tanque	N.° 4	10,58	10,58	10,58	10,54	10,54	10,54	10,54	9,49	8,23	9,59
	N.° 6	6,78	9,93	8,84	10,88	9,11	8,69	8,53	7,52	9,93	9,92
	N.° 7	10,44	10,44	10,44	10,42	10,42	10,42	10,42	10,55	10,55	10,50
	N.° 10	7,71	5,82	6,01	4,63	4,61	3,72	1,8		16,55	16,55

Día	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110
Fecha	14/10/2008	15/10/2008	16/10/2008	17/10/2008	18/10/2008	19/10/2008	20/10/2008	21/10/2008	22/10/2008	23/10/2008	24/10/2008
Tanque	N.° 4	8,46	9,13	8,39	8,42	9,31	9,01				
	N.° 6	11,55	11,55	11,55	11,55	11,54	11,55				
	N.° 7	10,42	10,42	10,42	10,42	10,42	10,42				
	N.° 10	17,86	15,54	13,74	11,73	9,47	8,26				

Nivel de llenado de los tanques de combustible (lecturas tomadas por los operadores directamente del tanque con plomada)

Día	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121
Fecha	25/10/2008	26/10/2008	27/10/2008	28/10/2008	29/10/2008	30/10/2008	31/10/2008	01/11/2008	02/11/2008	03/11/2008	04/11/2008
Tanque	N.° 4		9,60	9,88	7,08	8,65	8,07	8,19	8,36	8,72	9,39
	N.° 6		11,54	11,54	11,54	11,50	11,53	11,53	11,53	11,53	11,53
	N.° 7		10,43	10,43	8,65	6,30	10,37	8,22	8,80	9,07	10,03
	N.° 10		6,08	3,94	2,98	12,61	11,75	10,31	8,09	5,30	8,19

Día	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132
Fecha	05/11/2008	06/11/2008	07/11/2008	08/11/2008	09/11/2008	10/11/2008	11/11/2008	12/11/2008	13/11/2008	14/11/2008	15/11/2008
Tanque	N.° 4	9,37	8,76	9,47	10,04	10,24	10,01	9,90	10,02	10,57	10,17
	N.° 6	11,53	11,53	11,53	11,53	11,53	11,51	11,51	11,51	11,51	11,51
	N.° 7	10,04	9,92	10,30	9,25	9,87	9,29	9,71	10,26	10,33	9,34
	N.° 10	17,01	14,31	11,54	10,32	9,72	9,33	8,47	7,44	6,59	5,11

Día	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143
Fecha	16/11/2008	17/11/2008	18/11/2008	19/11/2008	20/11/2008	21/11/2008	22/11/2008	23/11/2008	24/11/2008	25/11/2008	26/11/2008
Tanque	N.° 4	10,28	7,30	10,04	8,91	9,73	9,62	11,15	11,14	11,14	8,04
	N.° 6	11,49	11,49	11,49	11,49	11,49	11,49	10,00	9,42	8,18	11,56
	N.° 7	10,24	8,30	8,11	9,35	8,80	9,92	10,53	10,57	8,45	7,49
	N.° 10	3,71	13,87	15,88	13,91	10,97	7,77	18,45	17,50	13,94	19,93

Día	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154
Fecha	27/11/2008	28/11/2008	29/11/2008	30/11/2008	01/12/2008	02/12/2008	03/12/2008	04/12/2008	05/12/2008	06/12/2008	07/12/2008
Tanque	N.° 4	8,74	7,60		9,12	9,14	8,62	9,92	9,37	4,58	10,57
	N.° 6	11,56	11,56		11,54	11,54	11,53	11,52	11,52	11,54	11,76
	N.° 7	9,77	8,68		10,47	8,07	8,18	9,24	8,98	8,93	9,83
	N.° 10	16,55	14,94		10,59	9,16	6,86	3,79	1,58	9,13	20,44

Día	155	156	157	158	159	160	161
Fecha	08/12/2008	09/12/2008	10/12/2008	11/12/2008	12/12/2008	13/12/2008	14/12/2008
Tanque	N.° 4	10,57	10,57	9,65	8,43	9,32	10,31
	N.° 6	11,76	11,76	11,76	11,73	11,73	11,73
	N.° 7	8,53	10,09	8,75	10,09	8,18	9,58
	N.° 10	20,44	18,75	18,75	17,70	16,58	14,20

Resumen		
Tanques	Mínimo	Máximo
N.° 4	1,35	11,21
N.° 6	1,99	11,76
N.° 7	0,99	10,67
N.° 10	0,68	20,44

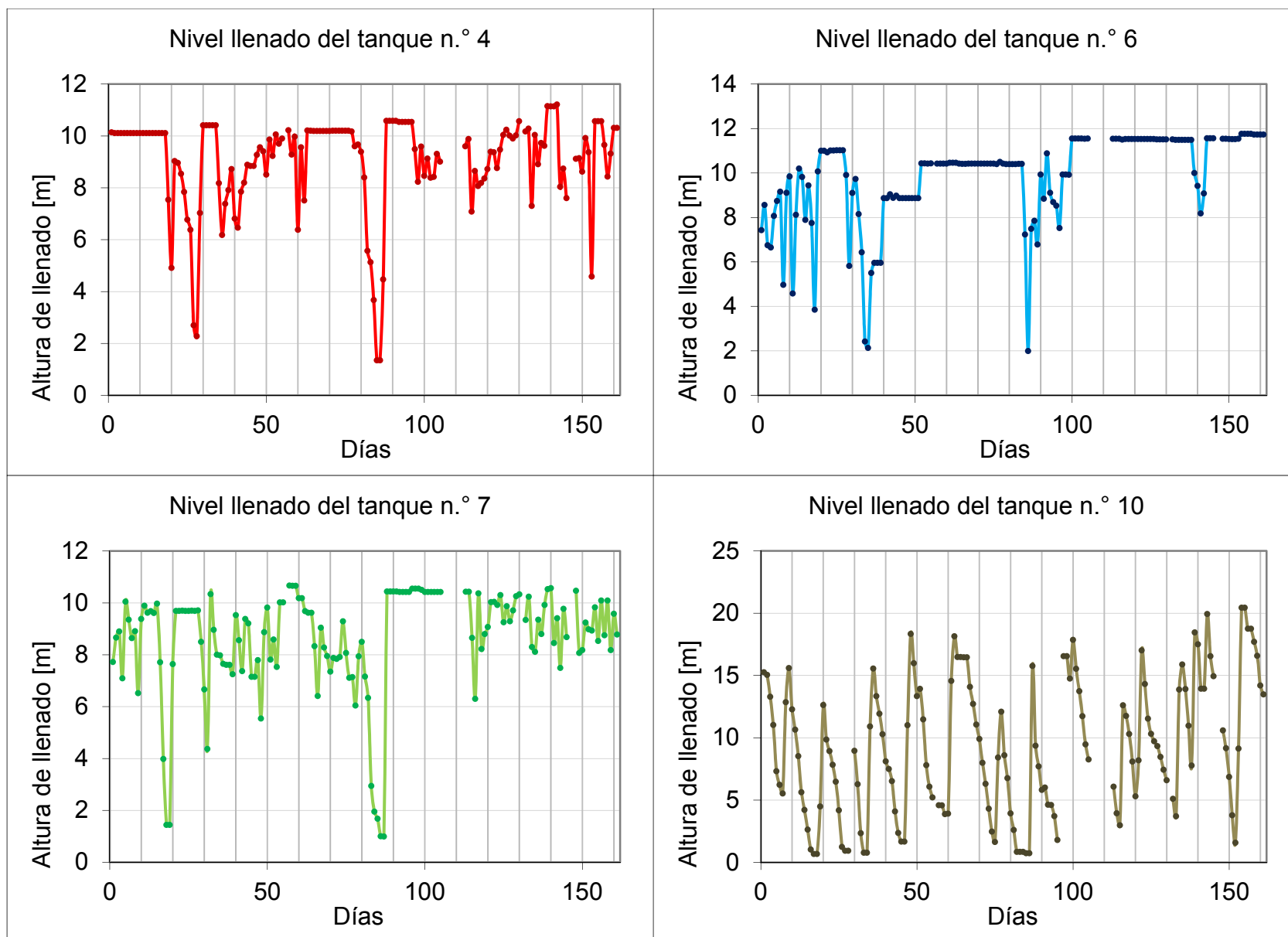


Gráfico 4.34 Nivel llenado de los tanques – reportes de operación. (Fuente: Reportes Diarios de Operación. Gráfica: Elaboración propia)

Tabla 4.12 Reporte diario de operación - Estación de petróleo tanque n.º 10 (Bombas del tanque n.º 10)

		ESTACIÓN DE PETRÓLEO														
		BOMBA PP 17			BOMBA PP 18			BOMBA PP 19			BOMBA PP 20			COLECTORES		
#	FECHA	PRES. DESC. [barg]	PRES. SUC. [barg]	ΔP FILTRO [psig]	PRES. DESC. [barg]	PRES. SUC. [barg]	ΔP FILTRO [psig]	PRES. DESC. [barg]	PRES. SUC. [barg]	ΔP FILTRO [psig]	PRES. DESC. [barg]	PRES. SUC. [barg]	ΔP FILTRO [psig]	PRES. SUC. [barg]	TEMP. SUC. [°C]	PRES. SALIDA [barg]
1	29/11/2008	9,2	1,3	3	9	1,4	10	10	1,3	6				1,35	40	9
2	28/11/2008	9	1,45	2,6	9	1,55	9	9,5	1,5	5,2				1,55	46	8,5
3	27/11/2008	9,5	1,75	3	10	1,9	8,6	10	1,85	5,2				1,9	42	9
4	26/11/2008	8	1,5	2,2	8	1,6	6,7	8,5	1,55	4				1,55	41	8
5	25/11/2008	8,5	1,45	2,2	8,5	1,55	9,2	9	1,5	5,4				1,55	40	8,5
6	24/11/2008				8	1,65	9,5	9	1,55	5,4				1,65	40	8
7	15/11/2008	10	0,6	7	10	0,7	6,6							0,6	43	9
8	09/11/2008	8	0,7	8	8	0,9	7							1,1	44	8
9	08/11/2008	10	0,8	6	10	1	6,2	10	1	4				1,15	44	9
10	04/11/2008	9	0,4	4,9	9,5	0,5	3,5	9	0,45	3				0,5	47	9
11	01/11/2008	8	1	3,6	8	1,15	2,6	8	1,05	1,8				1,25	52	7
12	30/10/2008	9	0,1	5	9	0,3	3	10	0,25	2				0,3	40	9
13	28/10/2008	10	0,4	5	9	0,6	3	10	0,5	2,8				0,6	42	9
14	27/10/2008	10	0,5	6	10	0,8	7,4							1,1	42	9
15	27/10/2008	9	0,5	5	8	0,75	3	9	0,7	2				0,75	47	8
16	26/10/2008	9,5	0,8	2,4				10	0,8	2,6				0,9	42	9
17	25/10/2008	8,4	0,82	5	7,5	1,04	3,5	9	0,94	2,3				1	48	8
18	23/10/2008	11	1,3	9	10	1,5	6	10	1,3	4				1,5	42	9
19	22/10/2008	9	1,4	4	8,5	1,5	4,2	9	1,5	2,8				1,6	48	8
20	21/10/2008	9,5	1,52	6,8	9	1,7	4,2	10	1,6	3				1,7	45	9
21	20/10/2008	12	1,6	8	10	1,7	5	12	1,6	3,8				1,8	36	10
22	18/10/2008	11	1,35	5,4	10,5	1,55	3,8	11	1,5	3				1,55	45	10
23	16/10/2008	8	0,95	7,4	7	1,3	4,6							1,1	48	7,5
24	07/07/2008	8	0,4	9,8				10	0,45	5	10	0,45	6,2	0,5	34	9
25	05/07/2008	8	1	5,2				8	1	3	8,5	1	6	1,6	47	8
26	04/07/2008	8	1,2	6				8	1,2	3	8,5	1,2	5,5	1	41	8
Mínimo		8,00	0,10	2,20	7,00	0,300	2,60	8,00	0,25	1,80	8,50	0,45	5,50	0,30	34,00	7,00
Máximo		12,0	1,8	9,8	10,5	1,9	10,0	12,0	1,9	6,0	10,0	1,2	6,2	1,9	52,0	10,0
Promedio		9,18	0,99		8,93	1,21		9,50	1,14		9,00	0,88		1,20	43,31	8,60

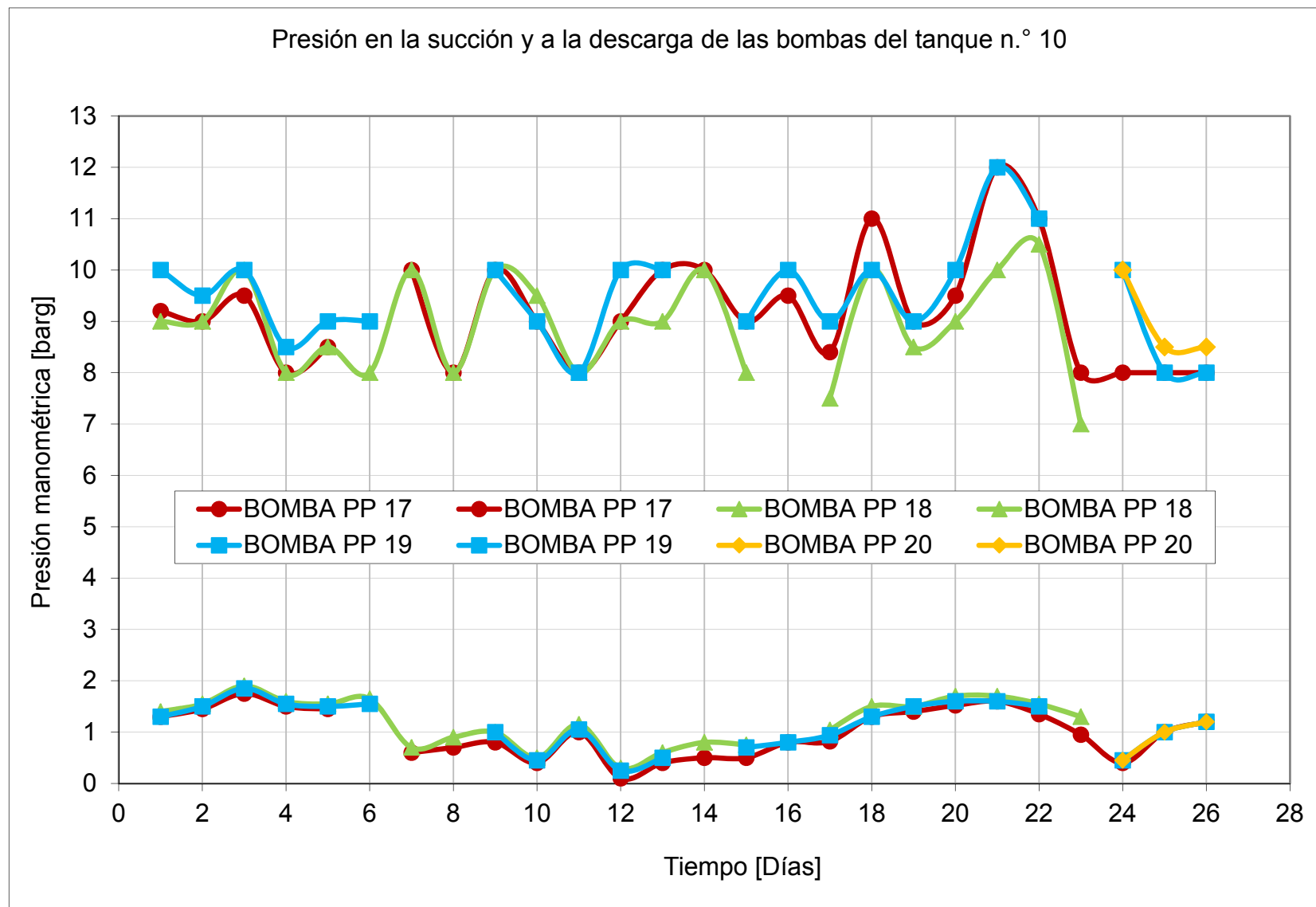


Gráfico 4.35 Presión en la succión y a la descarga de las bombas del tanque n.º 10.
(Fuente: Reportes Diarios de Operación. Gráfica: Elaboración propia)

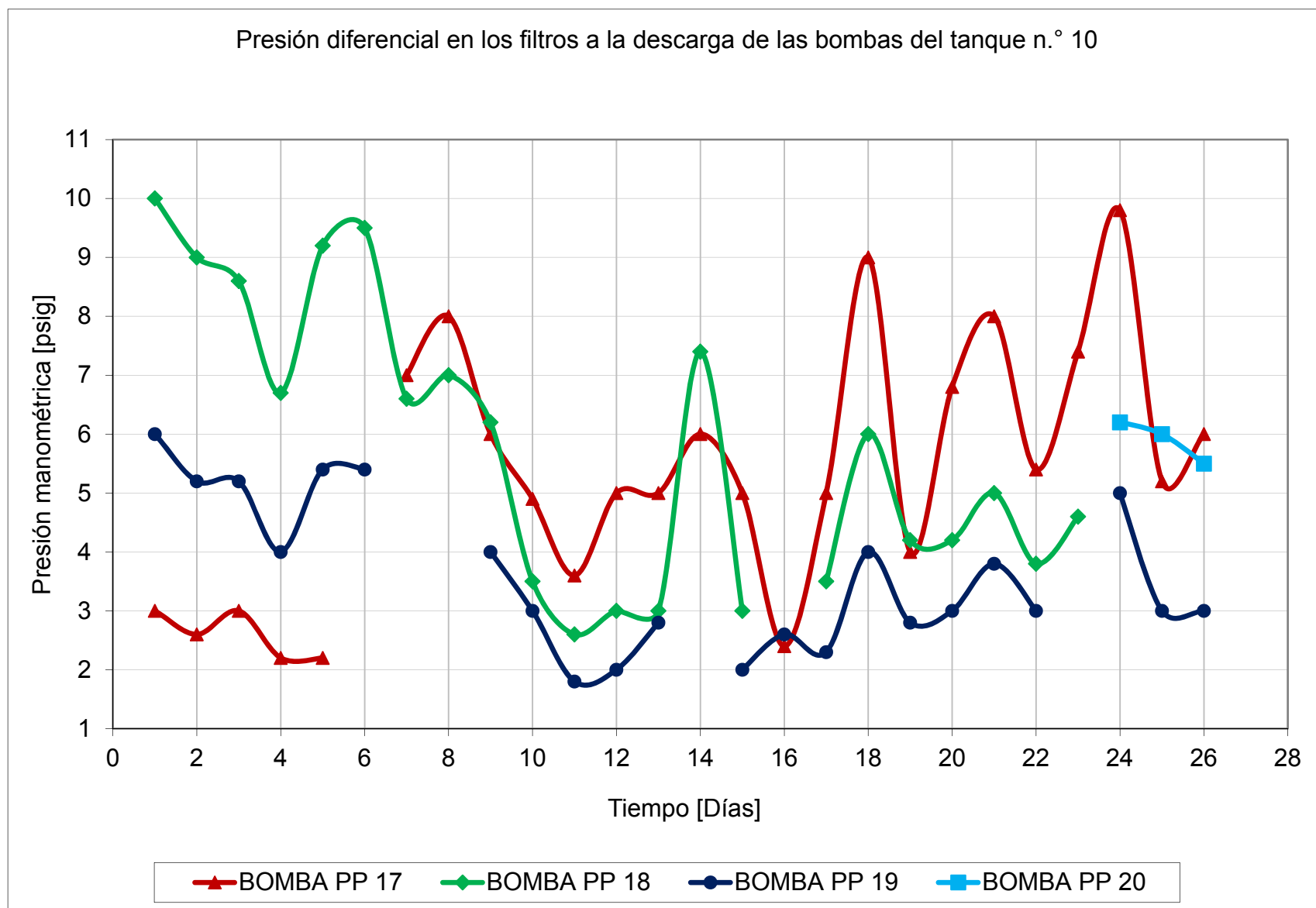


Gráfico 4.36 Presión diferencial en los filtros a la descarga de las bombas del tanque n.º 10.
(Fuente: Reportes Diarios de Operación. Gráfica: Elaboración propia)

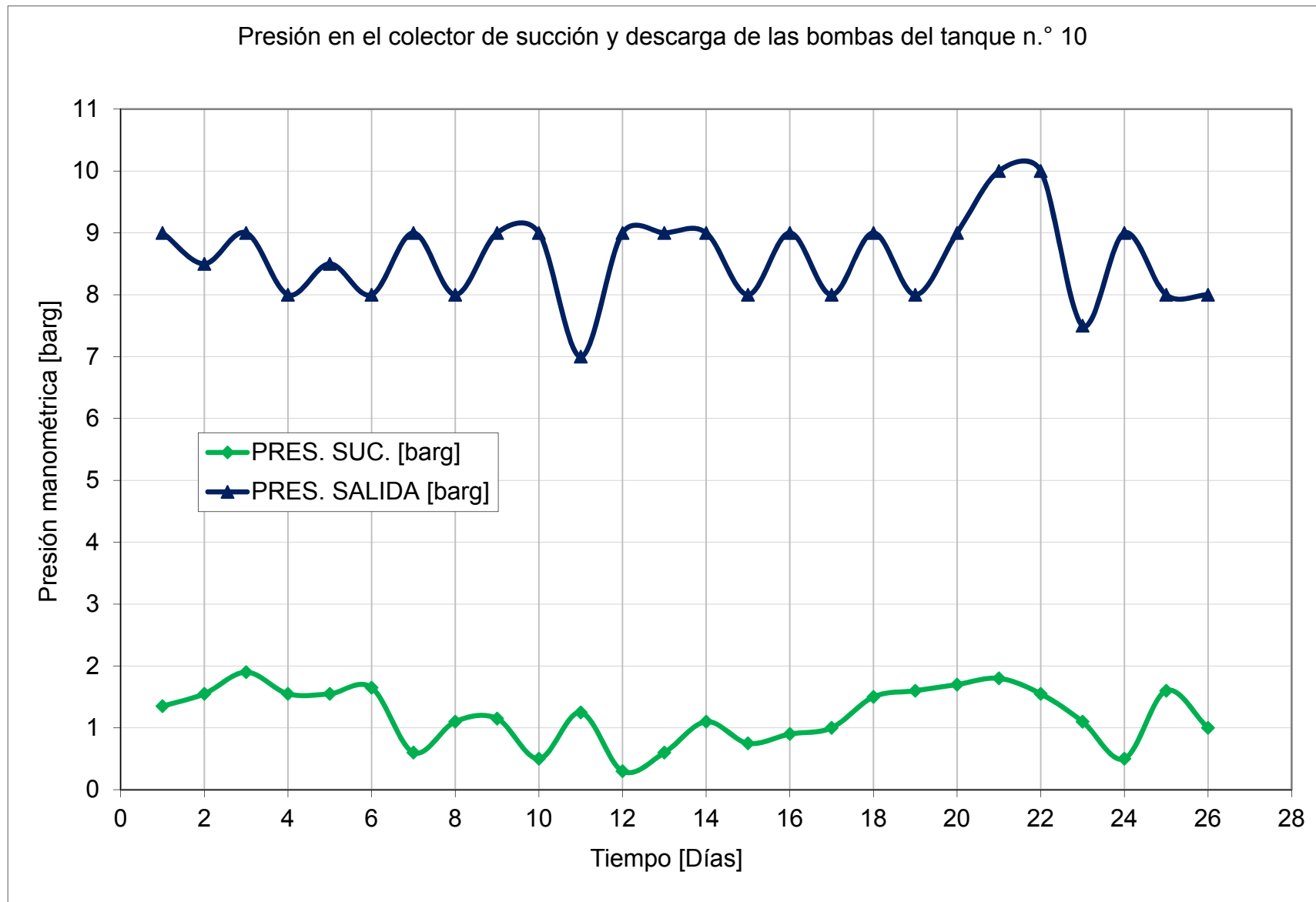


Gráfico 4.37 Presión en el colector de succión y descarga de las bombas del tanque n.º 10.
(Fuente: Reportes Diarios de Operación. Gráfica: Elaboración propia)

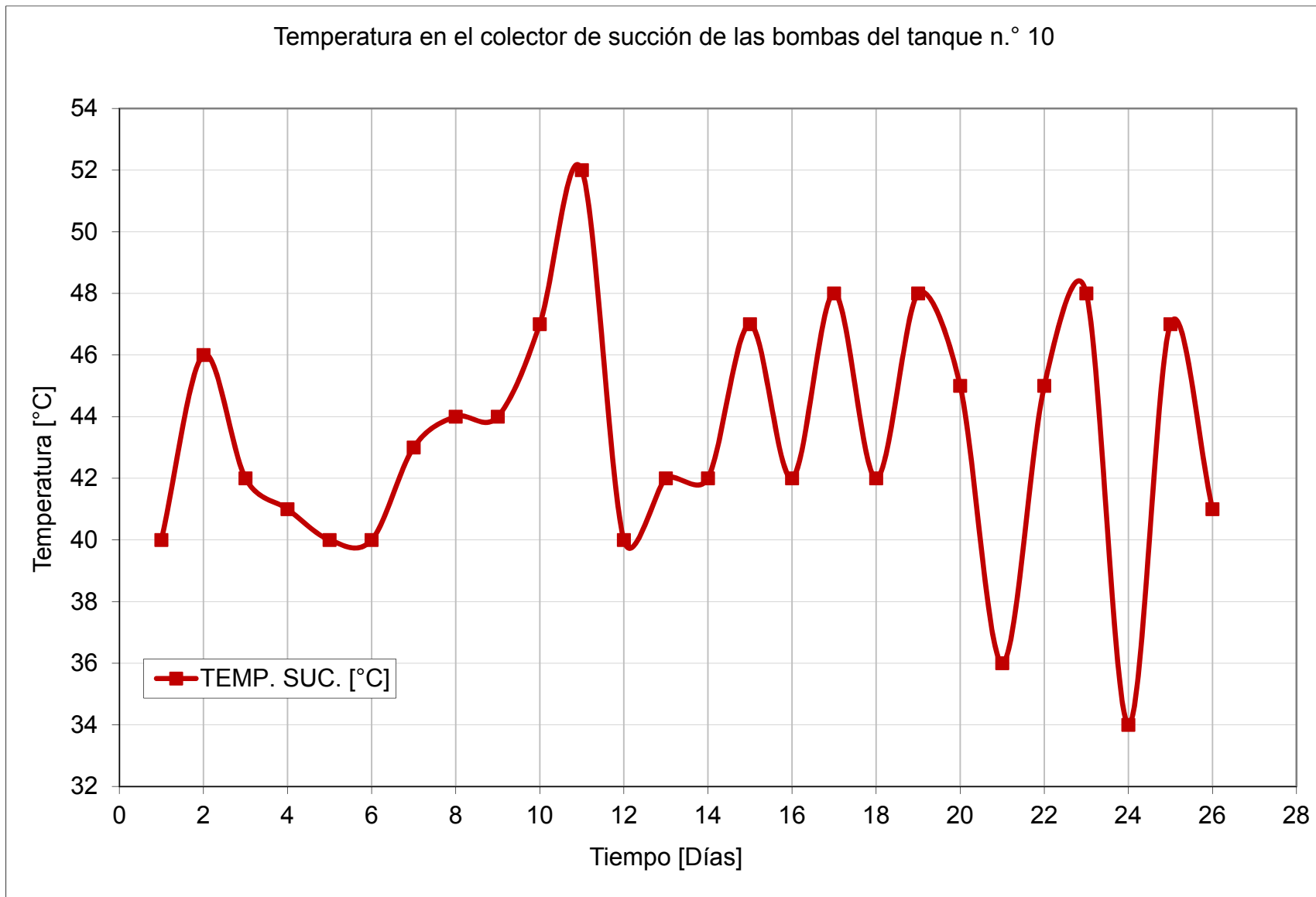


Gráfico 4.38 Temperatura en el colector de succión de las bombas del tanque n.º 10.
(Fuente: Reportes Diarios de Operación. Gráfica: Elaboración propia)

CAPÍTULO V
DESARROLLO NUMÉRICO Y DE CÁLCULO

5.1. CÁLCULOS Y DESARROLLO NUMÉRICO REALIZADOS BAJO EL AMBIENTE MATHCAD.

A continuación se explica y desarrolla paso a paso, uno de los casos de cálculo propuestos en el presente trabajo, para analizar y determinar mediante el método de Hardy-Cross con Newton-Raphson los parámetros de la red seleccionada, los mismos fueron desarrollados en el bajo el ambiente del programa Mathcad 14 (versión 14).

Las hojas de cálculo elaboradas en dicho programa corresponden a las diferentes redes o mallas propuestas como casos de análisis del sistema de combustible, el desarrollo de dichas hojas y sus resultados se muestran en el apéndice de este trabajo.

En dichas hojas se introducen las variables iniciales, parámetros del sistema, conversiones de unidades, datos de las tuberías y accesorios, pérdidas asociadas, así como las ecuaciones del método para la red propuesta, se realizan los cálculos con el número de iteraciones necesarias para garantizar la convergencia de los resultados, posterior a ello se muestran los resultados previos de la red por el método utilizado, luego se calculan otros parámetros importantes de la red y se generan los gráficos correspondientes.

Se toma como ejemplo el primer caso de estudio: que corresponde al trasegado de combustible del tanque número 10 a los tanques de almacenamiento diario, con una bomba de la estación de bombeo del mismo en servicio.

Para comenzar, se definen las variables y constantes iniciales: gravedad API del combustible, densidad del agua, constante gravitatoria o aceleración gravedad.

- Gravedad API $\rightarrow g_{API} := 10,6$ [Adimensional]
- Densidad del agua $\rightarrow \text{densH}_2\text{O} := 999,1$ [kg/m [kg/m³]
- Aceleración de gravedad $\rightarrow \text{grav} := 9,80665$ [m/s²]

Se calculan la gravedad específica, densidad y peso específico del combustible.

- Gravedad específica $\rightarrow g_{esp} := \frac{141,5}{131,5 + g_{API}} = 0,996$ [Adimensional]

- Densidad $\rightarrow \text{dens} := \text{gesp} \cdot \text{densH2O} = 994,881 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
- Peso específico $\rightarrow \text{pesp} := \text{dens} \cdot \text{grav} = 9756,454 \text{ [N/m}^3\text{]}$

Se introducen variables relacionadas con los valores de pérdidas en las tuberías por accesorios, como filtros y calentadores presentes en las líneas. Estos valores provienen de la hoja de datos o las placas de los equipos según el fabricante.

En este caso tomamos en cuenta la pérdida causada por los filtros a la succión y a la descarga del grupo de bombeo del tanque. Se hace la conversión de la unidad de presión en que viene expresada la pérdida por parte del fabricante a unidad de carga o altura de presión (metros de columna de líquido - mcl).

- Filtros a la succión de las bombas tanque n.º 10

Pérdida de presión máxima admisible en el filtro (Fsb10) es de: 1 psi

$$\text{Fsb10} := 1 \text{ psi} \cdot \frac{6894,757 \text{ Pa}}{1 \text{ psi}} \cdot \frac{1}{\text{pesp}} = \frac{6894,757 \text{ N/m}^2}{9756,454 \text{ N/m}^3} = 0,707 \text{ [mcl]}$$

- Filtros a la descarga de las bombas del tanque n.º. 10

Caída de presión máxima operacional (Fdb10m) es de: 1,2 bar

$$\text{Fdb10m} := 1,2 \text{ bar} \cdot \frac{100000 \text{ Pa}}{1 \text{ bar} \cdot \text{pesp}} = 0,707 \text{ [mcl]}$$

De la curva característica de la bomba de caudal, presión, potencia y eficiencia que proporciona el fabricante, se obtienen los puntos para construir una tabla y agrupar dichos datos.

BT10 :=

v1 mm ² /s	Dp bar	Q1 m ³ /h	P1 kW	v2 mm ² /s	Q2 m ³ /h	P2 kW
370	1,49	185	41,5	3300	185	78
370	5,04	182	58,9	3300	184	97,3
370	10	176	89,8	3300	181	124
370	15	172	117	3300	179	151
370	20,1	167	144	3300	176	178
370	25	160	171	3300	173	204
370	29,6	158	198	3300	172	229

Asignación de las variables y valores de las mismas.

- Viscosidad v1 $\rightarrow \text{Visc1} := \text{BT10}^{<1>} \text{ [mm}^2\text{/s]}$
- Caudal Q1 $\rightarrow \text{Q1_BT10} := \text{BT10}^{<3>} \cdot 3600 \text{ s/h [m}^3\text{/s]}$

- Potencia P1 $\rightarrow P1_BT10 := BT10^{<4>} [kW]$
- Altura de la bomba $\rightarrow DP_BT10 := \frac{BT10^{<2>} \cdot 100000 \text{ Pa/bar}}{pesp} [mcl]$
- Viscosidad v2 $\rightarrow Visc2 := BT10^{<5>} [mm^2/s]$
- Caudal Q2 $\rightarrow Q2_BT10 := BT10^{<6>} \cdot 3600 \text{ s/h} [m^3/s]$
- Potencia P2 $\rightarrow P2_BT10 := BT10^{<7>} [kW]$

Con estos datos y la ayuda de las funciones incluidas en el programa (*función regress*) se realiza un ajuste de la curva que mejor se adapte a los puntos mediante regresión lineal por mínimos cuadrados, entonces se obtienen los valores de pendiente (m) y punto de corte con el eje de las ordenadas (b), de la ecuación simplificada de la recta $y = m \cdot x + b$.

- Regresión lineal de los puntos de caudal (abscisas) contra altura total de la bomba (ordenadas) a una viscosidad de 370 cSt.

Regresión lineal $\rightarrow BT10A := regress(Q1_BT10, DP_BT10, 1)$

Punto de corte b $\rightarrow a1 := BT10A_{4,1}$

Pendiente de la recta m $\rightarrow a2 := BT10A_{5,1}$

Ecuación de altura total de la bomba $\rightarrow DPBT10A(x) := a2(x) + a1$

- Regresión lineal de los puntos de altura total de la bomba (abscisas) contra potencia en el eje de la bomba (ordenadas) a una viscosidad de 370 cSt.

Regresión lineal $\rightarrow BT10C := regress(DP_BT10, P1_BT10, 1)$

Punto de corte b $\rightarrow a5 := BT10C_{4,1}$

Pendiente de la recta m $\rightarrow a6 := BT10C_{5,1}$

Ecuación de altura total de la bomba $\rightarrow PBT10A(x) := a6(x) + a5$

De igual forma se realizan las regresiones lineales para las curvas a 3300 cSt.

- Regresión lineal de los puntos de caudal (abscisas) contra altura total de la bomba (ordenadas) a una viscosidad de 3300 cSt.

Regresión lineal $\rightarrow BT10B := regress(Q2_BT10, DP_BT10, 1)$

Punto de corte b $\rightarrow a3 := BT10B_{4,1}$

Pendiente de la recta m $\rightarrow a4 := BT10B_{5,1}$

Ecuación de altura total de la bomba $\rightarrow DPBT10A(x) := a4(x) + a3$

- Regresión lineal de los puntos de altura total de la bomba (abscisas) contra potencia en el eje de la bomba (ordenadas) a una viscosidad de 3300 cSt.

Regresión lineal $\rightarrow$ BT10D := regress(DP_BT10, P2_BT10,1)

Punto de corte b $\rightarrow$ a7 := BT10D_{4,1}

Pendiente de la recta m $\rightarrow$ a8 := BT10D_{5,1}

Ecuación de altura total de la bomba $\rightarrow$ PBT10A(x) := a8(x) + a7

De esta forma obtenemos las ecuaciones que representan las características principales de la bomba.

- Altura total de la bomba o carga de presión contra caudal.
- Potencia mecánica o en el eje de la bomba contra la altura total de la bomba.

En este informe se asignan valores a la viscosidad de 650, 780, 1600, 2000 y 3300 cSt, esto hace necesario ajustar la curva de la bomba para dichas viscosidades.

La curva proporcionada por el fabricante de la bomba se presenta para un fluido cuya viscosidad al momento de bombear es de 300 cSt y también se presenta para una viscosidad de 3300 cSt. Debido a que las lecturas de temperatura en el fluido en el tanque muestran variaciones, se realiza una aproximación de las curvas para una determinada viscosidad del fluido de trabajo.

Entonces proponemos una aproximación logarítmica de los puntos de las curvas para hallar la curva de la bomba a una determinada viscosidad, entre las viscosidades antes mencionadas: 650, 780, 1600, 2000 y 3300 cSt. De esta manera ajustamos aun mas el calcula para lo que seria el desempeño de la bomba a una determinada temperatura del fluido.

Se define la variable *visc* para introducir el valor de la viscosidad al programa. Luego por medio de un ajuste logarítmico calculamos la nueva curva a x viscosidad. En este ejemplo y para este caso definimos visc:= 2000 [cSt].

- Aproximación a la curva de la bomba según la viscosidad del fluido.

$$porc := \frac{(\log(visc) - \log(370))}{(\log(3300) - \log(370))} = 0,771 \text{ [\%]}$$

- Caudal @ x visc $\rightarrow$ QQQ := (Q2_BT10 – Q1_BT10)·porc + Q1_BT10 [m³/s]
- Potencia @ x visc $\rightarrow$ PPP := (P2_BT10 – P1_BT10)·porc + P1_BT10 [kW]

- Regresión lineal de los puntos de caudal (abscisas) contra altura total de la bomba (ordenadas) a una viscosidad variable (visc).

Regresión lineal $\rightarrow BT10E := \text{regress}(QQQ, DP_BT10, 1)$

Punto de corte b $\rightarrow a9 := BT10E_{4,1}$

Pendiente de la recta m $\rightarrow a10 := BT10E_{5,1}$

Ecuación de altura total de la bomba $\rightarrow DPBT10C(x) := a10(x) + a9$

- Regresión lineal de los puntos de altura total de la bomba (abscisas) contra potencia en el eje de la bomba (ordenadas) a una viscosidad variable (visc).

Regresión lineal $\rightarrow BT10F := \text{regress}(DP_BT10, PPP, 1)$

Punto de corte b $\rightarrow a11 := BT10F_{4,1}$

Pendiente de la recta m $\rightarrow a12 := BT10F_{5,1}$

Ecuación de altura total de la bomba $\rightarrow PBT10C(x) := a12(x) + a11$

Luego se presentan las respectivas curvas características de la bomba, a 370 y 3300 cSt además de la viscosidad seleccionada.

A continuación, se introducen los valores de longitud equivalente en tubería recta (L en m), diámetro interno de la tubería (d en pulgadas), altura de entrada a la tubería (Z en m) y caudal inicial (Qh - valor semilla para comenzar las iteraciones de cálculo en m^3/h). Dichos valores se presentan en las tablas de datos de la red de tuberías y accesorios según el caso (en el capítulo 4.5 del presente trabajo), los valores de longitud equivalente se muestran según el caso en la memoria de cálculo (en el capítulo 5.2 del presente trabajo).

L:=	151,9	d:=	19,25	Z:=	6,26	Qh:=	50
	143,5		19,25		5,1		50
	130,7		19,25		4,2		60
	120,8		29,25		4,164		170
	93,6		15,25		4,164		180
	62,5		10,02		5,2		180
	72,2		12		4,2		180
	67,3		19,25		4,2		170
	1420,9		15,25		24,6		90
	1502,7		15,25		37,26		80
	380,8		10,02		52,97		170
	101,1		7,98		52,91		10

Luego los valores de caudal, viscosidad, diámetro y caudal son convertidos para ser expresados sus unidades en metros y segundos en donde corresponda.

Se introducen al programa los valores de altura mínima de vaciado del tanque número 10, altura máxima de llenado del tanque número 4 y el valor de presión de regulación de la válvula de control (válvula de sustentación de presión – set point de la válvula) del grupo de bombas del tanque número 10, este ultimo es variado y se le asignan valores de 9, 10, 11 y 12 kgf/cm², con el fin de observar la implicación que tiene la válvula en el proceso de regulación de presión del combustible y el comportamiento de las bombas.

Teniendo toda la información recopilada y declarada en la hoja de cálculo, debemos introducir las ecuaciones pertinentes a fin de resolver el problema.

En este punto nos valemos de una herramienta de programación en Mathcad que permite colocar diversos pasos del cálculo (en este caso un sistema de ecuaciones) en orden, resolverlas y repetirlos en un bucle o ciclo anidado, de manera que halla iterativamente la solución del sistema de ecuaciones, el ciclo se repite hasta que la solución tenga un error mínimo, lo que nos garantiza que estamos numéricamente lo mas cerca posible de los valores solución de las ecuaciones.

Iniciamos calculando:

El término $Re = \frac{4 \cdot Q}{v \cdot \pi \cdot D}$ nos permite calcular el número de Reynolds en función del caudal en vez de la velocidad. [Adimensional].

El término $f = \frac{64}{Re}$ es el factor de fricción para flujo laminar. [Adimensional].

El término $h_f = K \cdot Q^2 \rightarrow K = \frac{8 \cdot f \cdot L}{D^5 \cdot \pi^2 \cdot g}$ viene de la ecuación de Darcy-Weisbach y nos permite obtener pérdidas de energía por fricción en términos de altura de presión o columna de líquido.

Para escribir las ecuaciones nos valemos de los esquemas mostrados en el capítulo 4 del presente trabajo (4.2. Esquemas de los casos propuestos a estudiar).

En este caso y para esta explicación utilizamos la figura 4.2 que representa la “*esqueletización*” de la red de tuberías para el primer caso de estudio - a continuación.

Primer caso: Trasegado de combustible del tanque n.º 10 a los tanques de almacenamiento diario

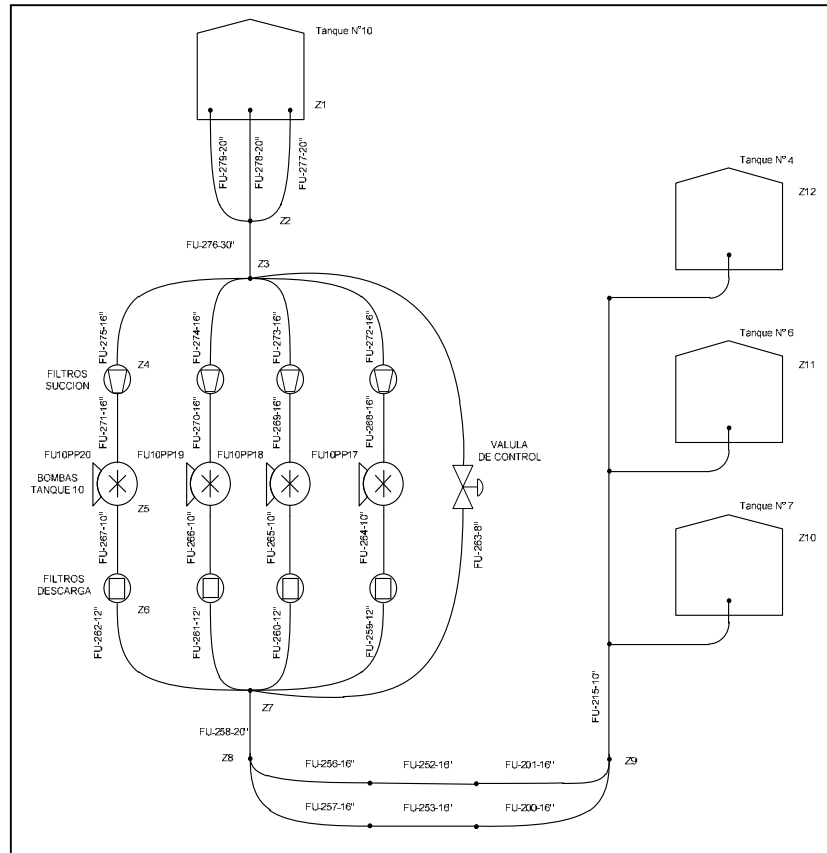


Figura 4.1. Esquema de la red de tuberías desde el tanque n.º 10 hasta los tanques diarios.

**Primer caso:
Trasegado de combustible del tanque n.º 10 a los tanques de almacenamiento diario**

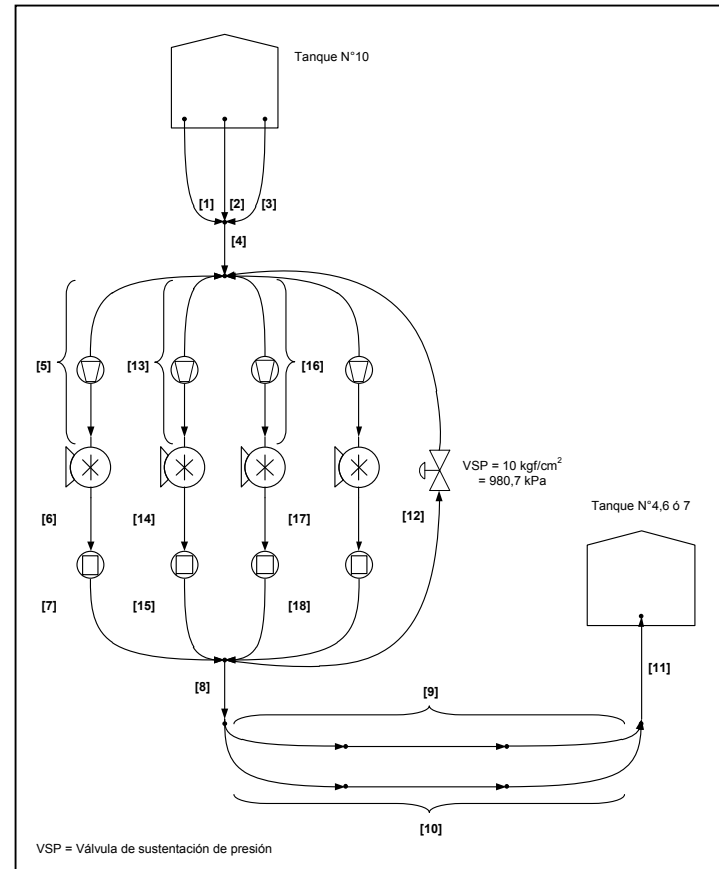


Figura 4.2. Esquema de la red equivalente en caudales para el primer caso de estudio por medio del método Hardy-Cross.

El número de ecuaciones va a depender del número de tuberías, el número de nodos y los lazos existentes, para este caso son:

Número de tuberías o líneas de tuberías en la red: doce (12) tuberías correspondientes a 12 caudales por determinar (un sistema de doce ecuaciones con doce incógnitas – los caudales).

Número de nodos en la red de tuberías: siete (7) nodos

Para una red con lazos como la que se estudia, el número de lazos o ciclos alrededor de la red con los que ecuaciones independientes pueden ser escritas, se determina restando el número de tuberías con el número de nodos. Esto nos da cinco (5) ecuaciones producto de los lazos en la red.

Para determinar las ecuaciones en los nodos utilizamos el principio de conservación de la masa o principio de continuidad, hacemos un volumen de control y balance masa en el nodo: igualamos los caudales que ingresan al nodo con los que salen del mismo (lo que entra es igual a lo que sale). Con ello determinamos siete ecuaciones de continuidad una por nodo presente en la red.

Luego debemos escribir las cinco ecuaciones restantes para completar el sistema, de las cuales una sola es un lazo real, es decir esta igualado a cero ya que el punto de partida y final es el mismo.

Las otras cuatro ecuaciones restantes son elaboradas a partir de los llamados pseudo-lazos que están presentes en la red, estos se componen de lazos no cerrados que inician y terminan en reservorios o tanques de la malla.

Ya que las válvulas de regulación tanto de reducción como de sustentación de presión se remplazan por reservorios o tanques “artificiales” con una elevación de la superficie del líquido en el mismo equivalente a la presión de regulación de la válvula. Solo se debe tomar en cuenta el modo de operación y regulación de válvula para ubicar correctamente el sentido de suministro del reservorio ficticio.

Teniendo la curva por ajuste de característica de la bomba, introducimos en nuestras ecuaciones de los lazos donde este presenta la bomba, así como también se toman en cuenta las pérdidas por accesorios como en este caso las producidas por los filtros de combustible presentes en las líneas.

Dicho estos escribimos las ecuaciones correspondientes al caso que estamos desarrollando:

Se escriben las ecuaciones equivalentes en los nodos (ecuación de continuidad), en este caso y como podemos ver en el esquema hay 5 nodos, las ecuaciones correspondientes son:

$$[\text{Ec. 1.}] \quad Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_4$$

$$[\text{Ec. 2.}] \quad Q_4 + Q_2 = Q_5$$

$$[\text{Ec. 3.}] \quad Q_8 + Q_{12} = Q_7$$

$$[\text{Ec. 4.}] \quad Q_8 = Q_9 + Q_{10}$$

$$[\text{Ec. 5.}] \quad Q_{11} = Q_9 + Q_{10}$$

Y dos ecuaciones de continuidad por igualdad de caudales:

$$[\text{Ec. 6.}] \quad Q_5 = Q_6$$

$$[\text{Ec. 7.}] \quad Q_6 = Q_7$$

Luego por el principio de la energía y trabajo planteamos las ecuaciones de sumatoria pérdida de carga, en los lazos y pseudo lazos de la red o malla.

$$[\text{Ec. 8.}] \quad Z_1 - k_1 \cdot (Q_1)^2 - k_4 \cdot (Q_4)^2 - k_5 \cdot (Q_5)^2 + (a_9 + a_{10} \cdot Q_5) - F_{sb10} - k_6 \cdot (Q_6)^2 - k_7 \cdot (Q_7)^2 - k_8 \cdot (Q_8)^2 - k_9 \cdot (Q_9)^2 - k_{11} \cdot (Q_{11})^2 = z_{\max t}$$

$$[\text{Ec. 9.}] \quad Z_1 - k_2 \cdot (Q_2)^2 - k_4 \cdot (Q_4)^2 - k_5 \cdot (Q_5)^2 + (a_9 + a_{10} \cdot Q_5) - F_{sb10} - k_6 \cdot (Q_6)^2 - k_7 \cdot (Q_7)^2 - k_8 \cdot (Q_8)^2 - k_9 \cdot (Q_9)^2 - k_{11} \cdot (Q_{11})^2 = z_{\max t}$$

$$[\text{Ec. 10.}] \quad Z_1 - k_3 \cdot (Q_3)^2 - k_4 \cdot (Q_4)^2 - k_5 \cdot (Q_5)^2 + (a_9 + a_{10} \cdot Q_5) - F_{sb10} - k_6 \cdot (Q_6)^2 - k_7 \cdot (Q_7)^2 - k_8 \cdot (Q_8)^2 - k_9 \cdot (Q_9)^2 - k_{11} \cdot (Q_{11})^2 = z_{\max t}$$

$$[\text{Ec. 11.}] \quad z_{\text{vsp}} + k_{12} \cdot (Q_{12})^2 - k_8 \cdot (Q_8)^2 - k_{10} \cdot (Q_{10})^2 - k_{11} \cdot (Q_{11})^2 - z_{\max t}$$

$$[\text{Ec. 12.}] \quad k_9 \cdot (Q_9)^2 = k_{10} \cdot (Q_{10})^2 \quad (\text{lazo real})$$

Con esto se completan las 22 ecuaciones con 22 incógnitas y se forma el sistema de ecuaciones a resolver.

El programa arroja los resultados del sistema de ecuaciones (los caudales), además nos da los valores de número de Reynolds, factor de fricción y K asociados a los caudales encontrados por ramal de tubería. Dichos resultados son mostrados en la matriz RQ, en la primera columna de la matriz el número de Reynolds, la segunda columna muestra el valor del factor de fricción, la tercera columna el valor de k o

coeficiente de resistencia, todos estos valores están asociados al caudal correspondiente y son adimensionales. En la cuarta columna el valor del caudal que satisface el sistema de ecuaciones planteado según la “esqueletización” de la red de tuberías propuesta en el primer caso de estudio, el caudal hallado se expresa en m³/s.

	Reynolds	f	k	Q [m ³ /s]
	1era	2da	3era	4ta
1	19,106	3,35	1504,936	0,01467
2	20,224	3,165	1343,094	0,01553
3	22,205	2,882	1114,176	0,01705
4	40,497	1,58	69,709	0,04726
5	81,739	0,783	694,668	0,04973
6	124,403	0,514	2488,8	0,04973
7	103,877	0,616	1397,633	0,04973
8	61,535	1,04	207,024	0,04726
9	39,924	1,603	21590,235	0,02429
10	37,751	1,695	24147,653	0,02297
11	118,219	0,541	15957,087	0,04726
12	7,766	8,241	201289,813	0,00247

Teniendo los caudales respectivos por tubería, podemos entonces y con ayuda de los gráficos (curva característica) determinar el punto de operación de la bomba, para ello utilizamos las ecuaciones que se hallaron antes por ajuste lineal:

- Altura total de la bomba:

$$DH_{bomba} := DPBT10C \left[(RQ^{(4)})_5 \right] = 120,31 [mcl] = 1173,71 [kPa]$$

- Potencia mecánica en la bomba (según curva característica):

$$P_{mecf} := PBT10C \left[DPBT10C \left[(RQ^{(4)})_5 \right] \right] = 125,13 [kW]$$

Calculamos la rata de llenado del tanque número 4 con el caudal encontrado que entra al tanque. Para ello dividimos este caudal entre el área de la circunferencia del tanque en m².

- Rata de llenado del tanque número 4:

$$Rata\ de\ llenado = \frac{(RQ^{(4)})_{11} \cdot 3600}{\pi \cdot (12,1)^2} = 0,37 [m/h]$$

- Se calcula la potencia hidráulica de la bomba:

$$Phid := dens \cdot grav \cdot (RQ^{(4)})_5 \cdot DHbomba \cdot 0,001 = 58,37 [kW]$$

- Cálculo de la eficiencia. Teniendo la potencia mecánica y la potencia hidráulica de la bomba, podemos calcular su eficiencia.

$$Eficiencia := \frac{Phid}{Pmecf} \cdot 100 = 46,65 [\%]$$

- Potencia en el motor: Teniendo el dato de la eficiencia del motor eléctrico podemos determinar la potencia absorbida por el motor de la línea de suministro eléctrico. En este caso la eficiencia del motor eléctrico es del 95 % (Em := 0,95).

$$Pelec := \frac{Pmecf}{Em} = 131,72 [kW]$$

- Corriente. Entonces calculamos la corriente eléctrica que pasa por el motor de la bomba. Motor trifásico con factor de potencia 86 % y 460 voltios.

$$Corrientemotor := \frac{Pelec \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 460 \cdot 0.86} = 192,23 [A]$$

- Velocidades del fluido en la tubería asociadas a cada tubería según el caudal encontrado.

$$\text{Velocidad} \rightarrow v := \frac{4 \cdot RQ^{(4)}}{\pi \cdot D^2} [m/s]$$

Velocidad del fluido en la tubería [m/s]											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,078	0,083	0,091	0,109	0,422	0,978	0,682	0,252	0,206	0,195	0,929	0,077

Teniendo de resultados anteriores el valor del coeficiente de resistencia k por cada ramal y el caudal asociado, podemos calcular las pérdidas en términos de presión (en pascales) y de altura de presión (metros de columna de líquido) por cada ramal. Calculamos las pérdidas de carga:

- Pérdidas de carga por cada ramal de tuberías hf:

$$hf_n := k_n \cdot (Q_n)^2$$

- Pérdida de presión por cada ramal de tuberías ΔP:

$$\Delta P_n := \frac{128 \cdot v1 \cdot dens \cdot L_n \cdot RQ_{n,4}}{\pi \cdot (D_n)^4}$$

	hf [mcl]	ΔP [Pa]
1	0,324	3161,325
2	0,324	3161,325
3	0,324	3161,325
4	0,156	1518,985
5	1,718	16762,286
6	6,156	60054,548
7	3,457	33724,769
8	0,462	4511,097
9	12,74	124287,808
10	12,74	124287,808
11	35,642	347709,142
12	1,231	12005,355

- Cálculo del NPSH disponible. El NPSH disponible en las bombas y el cabezal (carga o altura de presión) mínimo a la succión de la misma.

$$NPSHa = P_{atm} - P_{vap} + h_{st} - h_{fs}$$

$$P_{atm} := 101325 \text{ [Pa]}$$

$$P_{vap} := 4136,85 \text{ [Pa]}$$

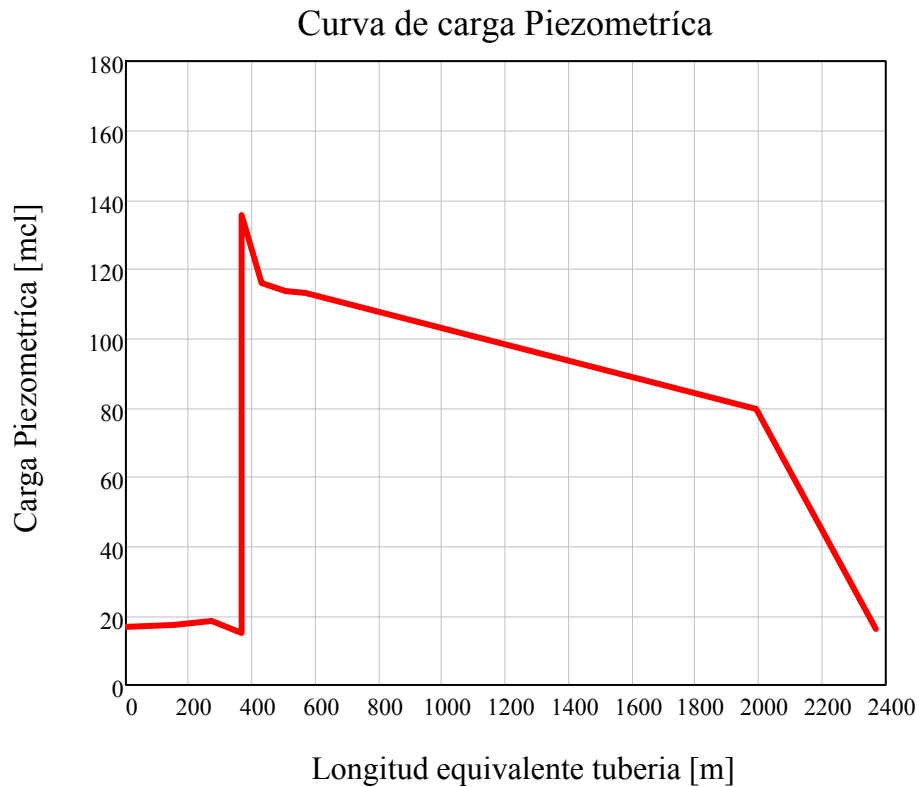
$$h_{st} := Z_1 - 4,164 = 2,1 \text{ [m]} \rightarrow 2,1 \cdot \rho \cdot g = 20447,481 \text{ [Pa]}$$

$$h_{fs} := \Delta P_1 + \Delta P_4 + \Delta P_5 + F_{sb10} \cdot \rho \cdot g = 3161,325 + 1518,985 + 16762,286 + 6894,067 = 28336,664 \text{ [Pa]}$$

$$NPSHa = 101325 - 4136,85 + 20486,502 - 28336,664 = 89298,96 \text{ [Pa]}$$

$$NPSHa = \frac{89298,96 \text{ Pa}}{9756,454 \text{ N/m}^3} = 9,58 \text{ [mcl]}$$

- Curva de carga piezométrica: se determinan las cargas piezométricas en los nodos de la red y se presenta el grafico correspondiente. Por cada nodo se suman los términos de carga de altura y carga de presión, y se le restan las pérdidas por tramos.



Posterior a la curva de carga piezométrica se presenta una matriz de datos con los resultados de este caso, variando la viscosidad y el valor de presión que regula la válvula (*set point*).

Como soporte se presenta una tabla típica de la extracción de datos del programa con las corridas de datos para cada variación aplicada.

5.2. MEMORIA DE CÁLCULO

Criterios para el cálculo

Según las exigencias de la EDC con respecto a las características del fueloil recibido de los buques tanqueros, el combustible debe tener entre 10 y 15 °API, debido a este margen de flexibilidad en cuanto a la gravedad API del combustible recibido y para realizar los cálculos, se toma un valor de la gravedad API de 10,6 este es el menor valor que nos permite asegurar teóricamente que a la temperatura ambiente el combustible sea menos denso que el agua a la misma temperatura, ya que un combustible con una gravedad API mayor a diez (10) es mas liviano (o menos denso) que el agua a la misma temperatura, por lo que tomamos el valor menor ya que da el valor de densidad y gravedad especifica lo mas elevado posible y representaría el caso de mayor esfuerzo para las bombas del sistema.

Se asume que la temperatura del fueloil almacenado en los tanques es de 35 °C, lo que implica un valor de viscosidad del fluido de aproximadamente 2000 cSt.

Se tomo la temperatura del fueloil desde la salida de los calentadores hasta las unidades en la planta de 50°C, lo que implica una viscosidad de 650 cSt.

El fueloil no tiene un cambio significativo de la densidad con respecto a los cambios de temperatura a las cuales se somete en el sistema, en base a esta afirmación y para efectos de cálculo en este trabajo asumimos que la densidad del combustible permanece constante.

El modo de operación de los calentadores es uno a la vez (uno en servicio el otro de respaldo), lo que implica que el flujo de combustible pasa por uno solo de los calentadores, tanto en el caso de los calentadores del nivel +26 como en los del nivel bombas en planta.

Para el cálculo del NPSH disponible se tomo el valor de la presión de vapor del fueloil en 0,6 psia a 37,8°C (ver anexo al final de este informe carta Maraven)

Para el caso de suministro a planta se considera que las tres unidades están en servicio a cargas iguales lo que implicaría un consumo “similar” de fueloil por unidad (sin tomar en cuenta otras variables que afectan el consumo de fueloil, eficiencia de la transferencia de calor en la caldera, calentadores de aire y vapor), así que podemos decir que el caudal que llega a planta se divide en tres partes iguales, por lo que realizamos los cálculos con una sola unidad y los valores se repetirían para las otras dos.

Se realiza el cálculo suponiendo la situación operativa de todos los quemadores de fueloil en servicio (16 aparatos) y la turbina a carga máxima de servicio (400 MW) por unidad generadora. Este caso sería bajo el supuesto de generar toda la carga únicamente disponiendo de fueloil como combustible. Bajo este supuesto, y de manera aproximada cada caldera consumiría 96 m³/h de fueloil, lo que implica la operación dos bombas de alta presión de combustible por caldera (58 m³/h cada bomba).

Las alturas de los niveles de líquido en los tanques están referidas a la base del tanque.

El nivel mínimo de vaciado de cada tanque está calculado respecto a la posición de la tubería de descarga en cada tanque y el diámetro de la tubería de descarga, no se está considerando el volumen de agua y de sedimentos presentes en el fondo del tanque (volumen muerto).

Para el caso del cálculo del NPSH disponible en las bombas del tanque n.º 10 y de las bombas del nivel 26, se tomó en cuenta solo la menor altura permisible de vaciado de dichos tanques.

Para el caso del NPSH disponible a la succión de las bombas de alta presión del nivel planta, se tomó en cuenta la recomendación del fabricante de las bombas y los parámetros de diseño establecidos en el proyecto, también se tomó en cuenta las nuevas recomendaciones según carta de Mitsubishi (anexo al final de este informe).

A continuación se presentan los cálculos métricos de las tuberías del sistema, separados por caso de estudio.

CÓMPUTOS MÉTRICOS DE LAS TUBERÍAS CORRESPONDIENTES AL PRIMER CASO:

Trasegado de combustible del tanque n.º 10 a los tanques de almacenamiento diario

En líneas generales este caso se comprende de las tuberías de descarga del tanque n.º 10, las tuberías de descarga del grupo de bombas del tanque n.º 10 y las tuberías correspondientes para el llenado de cada uno de los tanques.

Físicamente las tuberías se ubican en las instalaciones del tanque n.º 10 y la sala de bombas cercana a dicho tanque, las tuberías que atraviesan la explanada oeste y que llegan hasta los tanques ubicados en la quebrada de Arrecife.

SUCCIÓN DE LAS BOMBAS

Tramo de tubería desde el Tanque n.º 10 hasta el cabezal de succión de las bombas:

Nombre de la línea: FU-277-20"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	1	14,3	14,3
Codos de 45° Radio largo	3	7,6	22,9
Tees "T" de flujo derivado	1	42,7	42,7
Válvulas de compuerta	1	3,8	3,8
Entrada o Salida	1	9,1	9,1

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]

92,9

Longitud de la tubería [m]

37,8

LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]

130,7

Tramo de tubería desde el Tanque n.º 10 hasta el cabezal de succión de las bombas:

Nombre de la línea: FU-278-20"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	2	14,3	28,7
Codos de 45° Radio largo	2	7,6	15,3
Tees "T" de flujo derivado	1	42,7	42,7
Válvulas de compuerta	1	3,8	3,8
Entrada o Salida	1	9,1	9,1

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]

99,6

Longitud de la tubería [m]

43,9

LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]

143,5

Tramo de tubería desde el Tanque n.º 10 hasta el cabezal de succión de las bombas:

Nombre de la línea: FU-279-20"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	2	14,3	28,7
Codos de 45° Radio largo	2	7,6	15,3
Tees "T" de flujo derivado	1	42,7	42,7
Válvulas de compuerta	1	3,8	3,8
Entrada o Salida	1	9,1	9,1

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]

99,6

Longitud de la tubería [m]

52,3

LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]

151,9

Cabezal de succión de las bombas:

Nombre de la línea: FU-276-30"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	1	21,3	21,3
Codos de 45° Radio largo	1	11,4	11,4
Tees "T" de flujo en línea	9 (3x20" 4x16" 1x10" 1x8")	3·9,56+4·7,62+1·5,09+1·4,05	68,3

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	101,0
Longitud de la tubería [m]	19,8
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	120,8

Tramo de tubería que va desde el cabezal hasta la entrada del filtro, en la succión de la bomba:

Nombre de la línea: FU-272-16" y FU-275-16"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	5	11,4	57,2
Tees "T" de flujo derivado	1	22,9	22,9
Válvulas de compuerta	1	3,0	3,0

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	83,1
Longitud de la tubería [m]	6,0
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	89,0

Tramo de tubería que va desde el cabezal hasta la entrada del filtro, en la succión de la bomba:

Nombre de la línea: FU-273-16" y FU-274-16"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	1	11,4	11,4
Tees "T" de flujo derivado	1	22,9	22,9
Válvulas de compuerta	1	3,0	3,0

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	37,3
Longitud de la tubería [m]	2,2
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	39,6

Tramo de tubería a la salida del filtro y hasta la entrada de la bomba, en la succión de la bomba:

Nombre de la línea: FU-268-16" y FU-271-16"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Reducciones o Expansiones	1	1,7	1,7

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	1,7
Longitud de la tubería [m]	2,9
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	4,6

Tramo de tubería a la salida del filtro y hasta la entrada de la bomba, en la succión de la bomba:

Nombre de la línea: FU-269-16" y FU-270-16"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Reducciones o Expansiones	1	1,7	1,7

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	1,7
Longitud de la tubería [m]	2,3
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	4,0

DESCARGA DE LAS BOMBAS

Tramo de tubería que va desde la salida de la bomba hasta la entrada del filtro de descarga.

Nombre de la línea: FU-264-10" FU-265-10" FU-266-10" y FU-267-10"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	5	7,6	38,2
Tees "T" de flujo derivado	1	15,3	15,3
Válvulas de compuerta	1	2,0	2,0
Reducciones o Expansiones	1	2,7	2,7

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	58,2
Longitud de la tubería [m]	4,3
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	62,5

Tramo de tubería desde la salida del filtro hasta el cabezal de descarga de las bombas.

Nombre de la línea: FU-259-12" FU-260-12" FU-261-12" y FU-262-12"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	2	9,1	18,2
Tees "T" de flujo derivado	1	28,7	28,7
Válvulas de compuerta	1	2,4	2,4
Válvulas de retención	1	15,1	15,1
Reducciones o Expansiones	1	2,1	2,1

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	66,6
Longitud de la tubería [m]	5,6
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	72,2

Cabezal de descarga las bombas:

Nombre de la línea: FU-258-20"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Tees "T" de flujo en línea	7 (4x12" 1x8" 2x16")	4·6,06+1·4,05+2·7,62	43,6

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	43,6
Longitud de la tubería [m]	23,7
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	67,3

Líneas paralelas de suministro desde las instalaciones de bombeo del tanque número 10 hasta la nueva línea de llenado de los tanques pequeños (tanques números 4, 6 y 7)

FU-256-16" - FU-252-16" - FU-201-16"

Primer tramo de tubería de suministro, desde el cabezal de descarga de las bombas hasta la conexión con la línea FU-252-16"

Nombre de la línea: FU-256-16"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	3	11,4	34,3
Codos de 45° Radio largo	1	6,1	6,1
Tees "T" de flujo en línea	1	7,6	7,6
Tees "T" de flujo derivado	1	22,9	22,9

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]

70,9

Longitud de la tubería [m]

13,4

LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]

84,3

Segundo tramo y continuación de la tubería de suministro desde la conexión con la línea FU-256-16" hasta la conexión con la línea FU-201-16"

Nombre de la línea: FU-252-16"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	15	11,4	171,5
Codos de 45° Radio largo	4	6,1	24,4
Tees "T" de flujo en línea	1	7,6	7,6
Válvulas de compuerta	1	3,0	3,0

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]

206,5

Longitud de la tubería [m]

187,3

LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]

393,8

Tercer tramo y continuación de la tubería de suministro desde la conexión con la línea FU-252-16" hasta la unión con la tubería de llenado de los tanques diarios (Línea FU-215-10").

Nombre de la línea: FU-201-16"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	28	11,4	320,0
Codos de 45° Radio largo	9	6,1	54,9
Tees "T" de flujo en línea	1	7,6	7,6
Tees "T" de flujo derivado	1	22,9	22,9
Válvulas de compuerta	1	3,0	3,0
Válvulas de retención	1	19,1	19,1

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]

427,5

Longitud de la tubería [m]

515,3

LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]

942,8

La longitud total equivalente de los tres tramos de tuberías, correspondientes a las líneas FU-256-16", FU-252-16" y FU-201-16" es de: **1420,9 metros.**

FU-257-16" - FU-253-16" - FU-200-16"

Primer tramo de tubería de suministro, desde el cabezal de descarga de las bombas hasta la conexión con la línea FU-253-16"

Nombre de la línea: FU-257-16"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	3	11,4	34,3
Codos de 45° Radio largo	1	6,1	6,1
Tees "T" de flujo en línea	1	7,6	7,6
Tees "T" de flujo derivado	1	22,9	22,9
Total pérdidas por fricción en accesorios [m]			70,9
Longitud de la tubería [m]			37,9
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]			108,8

Segundo tramo y continuación de la tubería de suministro desde la conexión con la línea FU-257-16" hasta la conexión con la línea FU-200-16"

Nombre de la línea: FU-253-16"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	18	11,4	205,7
Codos de 45° Radio largo	2	6,1	12,2
Tees "T" de flujo en línea	1	7,6	7,6
Válvulas de compuerta	1	3,0	3,0
Total pérdidas por fricción en accesorios [m]			228,6
Longitud de la tubería [m]			188,6
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]			417,2

Tercer tramo y continuación de la tubería de suministro desde la conexión con la línea FU-253-16" hasta la unión con la tubería de llenado de los tanques diarios (Línea FU-215-10").

Nombre de la línea: FU-200-16"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	32	11,4	365,8
Codos de 45° Radio largo	7	6,1	42,7
Tees "T" de flujo en línea	1	7,6	7,6
Tees "T" de flujo derivado	1	22,9	22,9
Válvulas de compuerta	1	3,0	3,0
Válvulas de retención	1	19,1	19,1
Total pérdidas por fricción en accesorios [m]			461,0
Longitud de la tubería [m]			515,7
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]			976,7

La longitud total equivalente de los tres tramos de tuberías, correspondientes a las líneas FU-257-16", FU-253-16" y FU-200-16" es de: **1502,7 metros.**

LLENADO DE LOS TANQUES PEQUEÑOS

Tramo de tubería que va desde la unión de la FU-200-16" y FU-201-16" hasta la entrada del tanque n.º 7.
Nombre de la línea: FU-215-10"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	9	7,6	68,7
Codos de 45° Radio largo	4	4,1	16,3
Tees "T" de flujo derivado	2	15,3	30,5
Válvulas de compuerta	2	2,0	4,1
Entrada o Salida	1	4,6	4,6
Total pérdidas por fricción en accesorios [m]			124,2
Longitud de la tubería [m]			71,7
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]			195,9

Tramo de tubería que va desde la unión de la FU-200-16" y FU-201-16" hasta la entrada del tanque n.º 6.
Nombre de la línea: FU-215-10"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	11	7,6	84,0
Codos de 45° Radio largo	6	4,1	24,4
Tees "T" de flujo en línea	1	5,1	5,1
Tees "T" de flujo derivado	2	15,3	30,5
Válvulas de compuerta	2	2,0	4,1
Entrada o Salida	1	4,6	4,6
Total pérdidas por fricción en accesorios [m]			152,7
Longitud de la tubería [m]			127,2
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]			279,9

Tramo de tubería que va desde la unión de la FU-200-16" y FU-201-16" hasta la entrada del tanque n.º 4.
Nombre de la línea: FU-215-10"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	14	7,6	106,9
Codos de 45° Radio largo	8	4,1	32,6
Tees "T" de flujo en línea	2	5,1	10,2
Tees "T" de flujo derivado	1	15,3	15,3
Válvulas de compuerta	2	2,0	4,1
Entrada o Salida	1	4,6	4,6
Total pérdidas por fricción en accesorios [m]			173,6
Longitud de la tubería [m]			207,3
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]			380,8

RECIRCULACIÓN DE LA LÍNEA DE CONTROL

Tramo de tubería que conecta los colectores de succión y descarga de las bombas del tanque n.º 10 en donde están ubicadas las válvulas reguladoras de presión de combustible.

Nombre de la línea: FU-263-8"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	6	6,1	36,5
Tees "T" de flujo en línea	4	4,1	16,2
Válvulas de compuerta	2	1,6	3,2
Válvulas de Control	2	68,9	137,8

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	193,8
Longitud de la tubería [m]	8,4
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	202,2

CÓMPUTOS MÉTRICOS DE LAS TUBERÍAS CORRESPONDIENTES AL SEGUNDO CASO:
Bombeo de combustible del Tanque n.º 10 a las calderas de la unidades 7, 8 y 9.

Este caso al igual que el caso anterior comprende las líneas de descarga del tanque N.º 10 y de succión de las bombas, las líneas de descarga hasta los calentadores y después de los calentadores, las tuberías hacia y desde el nivel 42, el puente de tuberías, la conexión con el puente de tuberías en planta y las tomas correspondientes a cada unidad, las líneas que conectan las bombas, calentadores, válvulas de control hasta los quemadores de cada unidad.

Físicamente las tuberías se ubican en las instalaciones del tanque n.º 10 y la sala de bombas cercana a dicho tanque, las tuberías que atraviesan la explanada oeste, cruzan la quebrada de Arrecife y llegan a la estación de bombeo de transferencia y los calentadores de combustible (detrás de Arrecife), continua hasta superar la cota de 42 metros, para pasar por los puentes de conexión a planta y las líneas de suministro de cada unidad (comenzando por la u/7 y terminando en la u/9), para continuar en el nivel +3 metros en planta frente a la caldera en la estación de bombas, calentadores y finaliza en el primer piso de la caldera al conectar con el anillo de suministro de combustible.

Los cálculos métricos son iguales a los presentados en el caso anterior hasta la línea FU-215-10”.

DESCARGA DE LAS BOMBAS DEL TANQUE #10 (CORRECCIÓN EN QUEBRADA ARRECIFE)

Tercer tramo y continuación de la tubería de suministro desde la conexión con la línea FU-253-16” hasta la unión con la tubería FU-201-16” en el puente sobre la quebrada de Arrecife.

Nombre de la línea: FU-200-16”

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	32	11,4	365,8
Codos de 45° Radio largo	9	6,1	54,9
Tees “T” de flujo en línea	2	7,6	15,2
Tees “T” de flujo derivado	1	22,9	22,9
Válvulas de compuerta	2	3,0	6,1
Válvulas de retención	1	19,1	19,1
Total pérdidas por fricción en accesorios [m]			483,9
Longitud de la tubería [m]			561,4
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]			1045,3

La longitud total equivalente de los tres tramos de tuberías, correspondientes a las líneas FU-257, FU-253 y FU-200 hasta la unión con la tubería FU-201-16” en el puente sobre la quebrada de Arrecife es de: **1571,3 metros.**

Tercer tramo y continuación de la tubería de suministro desde la conexión con la línea FU-252-16” hasta la unión con la tubería FU-201-16” en el puente sobre la quebrada de Arrecife.

Nombre de la línea: FU-201-16”

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	32	11,4	365,8
Codos de 45° Radio largo	9	6,1	54,9
Tees “T” de flujo en línea	2	7,6	15,2
Tees “T” de flujo derivado	1	22,9	22,9
Válvulas de compuerta	2	3,0	6,1
Válvulas de retención	1	19,1	19,1
Total pérdidas por fricción en accesorios [m]			483,9
Longitud de la tubería [m]			560,4
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]			1044,3

La longitud total equivalente de los tres tramos de tuberías, correspondientes a las líneas FU-256, FU-252 y FU-201 hasta la unión con la tubería FU-201-16” en el puente sobre la quebrada de Arrecife es de: **1522,4 metros.**

**TRAMO DE TUBERÍAS ANTES Y DESPUÉS DE LOS CALENTADORES DE COMBUSTIBLE NIVEL 26
(PUENTE DE TUBERÍAS SOBRE EL NIVEL 26)**

Tramo de tubería de la línea FU-201-16" que va desde la unión de las tuberías de suministro FU-201 y FU-200 hasta la succión de los calentadores.

Nombre de la línea: FU-201-16"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	11	11,4	125,7

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	125,7
Longitud de la tubería [m]	106,1
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	231,8

Tramo de tubería de succión de los calentadores de combustible en la estación de transferencia.

Nombre de la línea: FU-316-16"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	3	11,4	34,3
Tees "T" de flujo derivado	1	22,9	22,9
Válvulas de compuerta	1	3,0	3,0
Reducciones o Expansiones	1	2,7	2,7

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	62,9
Longitud de la tubería [m]	10,0
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	72,9

Tramo de tubería de descarga de los calentadores de combustible en la estación de transferencia.

Nombre de la línea: FU-319-16"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	4	11,4	45,7
Codos de 45° Radio largo	2	6,1	12,2
Tees "T" de flujo derivado	1	22,9	22,9
Válvulas de compuerta	1	3,0	3,0
Reducciones o Expansiones	1	2,7	2,7

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	86,6
Longitud de la tubería [m]	8,8
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	95,3

Tramo de tubería de la línea FU-201-16" que va desde la descarga de los calentadores y hasta la conexión con el puente de tuberías en frente a las unidades en planta, en la toma de la unidad número siete (U/7).

Nombre de la línea: FU-201-16"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	32	11,4	365,8
Codos de 45° Radio largo	12	6,1	73,2
Tees "T" de flujo derivado	1	22,9	22,9
Válvulas de compuerta	1	3,0	3,0

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	464,8
Longitud de la tubería [m]	448,2
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	913,0

RETORNO DE COMBUSTIBLE DEL SISTEMA TANQUE #10 (RECIRCULACIÓN LARGA)

Tramo de tubería de la línea FU-254-10" que comprende el retorno desde el puente de tuberías en planta hasta la succión de las bombas del tanque n.º 10.

Nombre de la línea: FU-254-10"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	104	7,6	794,1
Codos de 45° Radio largo	32	4,1	130,3
Tees "T" de flujo en línea	1	5,1	5,1
Tees "T" de flujo derivado	2	15,3	30,5
Válvulas de compuerta	4	2,0	8,1

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	968,2
Longitud de la tubería [m]	1345,9
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	2314,0

CONEXIÓN CON EL PUENTE DE TUBERÍAS DE PLANTA

Comprende los tramos de tubería de suministro y de retorno que se desprenden de las líneas en el puente de tuberías en planta y que conectan con las válvulas respectivas de suministro y retorno de cada unidad. Así como también las que sirven de conexión entre las unidades y están dispuestas sobre el puente de tuberías de planta.

Tramo que conecta el puente de tubería de planta con la válvula de tres vías de suministro, línea de suministro de combustible a la unidad 7, 8 y 9 mediante el sistema de gravedad ó por el grupo de bombeo del tanque n.º 10.

Nombre de la línea: 7FU-113-8", 8FU-113-8" y 9FU-113-8".

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	6	6,1	36,5
Tees "T" de flujo derivado	1	12,2	12,2
Válvulas de compuerta	1	1,6	1,6
Reducciones o Expansiones	1	1,0	1,0

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	51,3
Longitud de la tubería [m]	12,9
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	64,2

Tramo que conecta el puente de tubería de planta con la válvula de tres vías de suministro, línea de suministro de combustible a la unidad 7, 8 y 9 mediante el sistema de transferencia (nivel 26).

Nombre de la línea: 7FU-114-8", 8FU-114-8" y 9FU-114-8".

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	6	6,1	36,5
Codos de 45° Radio largo	1	3,2	3,2
Tees "T" de flujo derivado	1	12,2	12,2
Válvulas de compuerta	1	1,6	1,6
Reducciones o Expansiones	1	1,0	1,0

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	54,5
Longitud de la tubería [m]	13,4
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	68,0

Tramo que conecta la válvula de tres vías de retorno con el puente de tubería de planta, línea de retorno de combustible de la unidad 7, 8 y 9 por el sistema de transferencia (nivel 26).

Nombre de la línea: 7FU-117-8", 8FU-117-8" y 9FU-117-8".

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	7	6,1	42,6
Codos de 45° Radio largo	1	3,2	3,2
Tees "T" de flujo derivado	1	12,2	12,2
Válvulas de compuerta	1	1,6	1,6

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	59,6
Longitud de la tubería [m]	15,1
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	74,7

Tramo que conecta la válvula de tres vías de retorno con el puente de tubería de planta, línea de retorno de combustible de la unidad 7, 8 y 9 por el sistema de gravedad (anillo de calentamiento en la esquina de "Tamakun") ó por el grupo de bombas del tanque 10.

Nombre de la línea: 7FU-118-8", 8FU-118-8" y 9FU-118-8".

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	2	6,1	12,2
Tees "T" de flujo derivado	1	12,2	12,2
Válvulas de compuerta	1	1,6	1,6
Reducciones o Expansiones	1	1,0	1,0

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	26,9
Longitud de la tubería [m]	6,5
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	33,4

Tramo de conexión de las líneas de suministro en el puente de tuberías en planta, entre la unidad 7 y 8, continuación de la línea de suministro de combustible mediante el sistema de transferencia.

Nombre de la línea: FU-11-16"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	6	11,4	68,6
Válvulas de compuerta	1	3,0	3,0

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	71,6
Longitud de la tubería [m]	80,8
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	152,5

Tramo de conexión de las líneas de retorno en el puente de tuberías en planta, entre la unidad 7 y 8, continuación de la línea de retorno de combustible hacia el sistema de transferencia.

Nombre de la línea: FU-12-10"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	6	7,6	45,8
Válvulas de compuerta	1	2,0	2,0

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	47,8
Longitud de la tubería [m]	80,8
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	128,7

Tramo de conexión de las líneas de suministro en el puente de tuberías en planta, entre la unidad 7 y 8, continuación de la línea de suministro de combustible mediante el sistema de gravedad o tanque n.º 10.

Nombre de la línea: FU-201-16"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	6	11,4	68,6
Válvulas de compuerta	1	3,0	3,0

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	71,6
Longitud de la tubería [m]	80,8
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	152,5

Tramo de conexión de las líneas de retorno en el puente de tuberías en planta, entre la unidad 7 y 8, continuación de la línea de retorno de combustible hacia el sistema de gravedad (anillo de calentamiento) o a la succión de las bombas del tanque n.º 10.

Nombre de la línea: FU-254-10"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	9	7,6	68,7
Codos de 45° Radio largo	1	4,1	4,1
Válvulas de compuerta	1	2,0	2,0
Total pérdidas por fricción en accesorios [m]			74,8
Longitud de la tubería [m]			87,5
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]			162,3

Tramo de conexión de las líneas de suministro en el puente de tuberías en planta, entre la unidad 8 y 9, continuación de la línea de suministro de combustible mediante el sistema de transferencia.

Nombre de la línea: FU-11-16"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	10	11,4	114,3
Válvulas de compuerta	1	3,0	3,0
Total pérdidas por fricción en accesorios [m]			117,3
Longitud de la tubería [m]			87,5
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]			204,9

Tramo de conexión de las líneas de retorno en el puente de tuberías en planta, entre la unidad 8 y 9, continuación de la línea de retorno de combustible hacia el sistema de transferencia.

Nombre de la línea: FU-12-10"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	6	7,6	45,8
Válvulas de compuerta	1	2,0	2,0
Total pérdidas por fricción en accesorios [m]			47,8
Longitud de la tubería [m]			87,7
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]			135,6

Tramo de conexión de las líneas de suministro en el puente de tuberías en planta, entre la unidad 8 y 9, continuación de la línea de suministro de combustible mediante el sistema de gravedad o tanque n.º 10.

Nombre de la línea: FU-201-16"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	6	11,4	68,6
Válvulas de compuerta	1	3,0	3,0
Total pérdidas por fricción en accesorios [m]			71,6
Longitud de la tubería [m]			82,2
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]			153,9

Tramo de conexión de las líneas de retorno en el puente de tuberías en planta, entre la unidad 8 y 9, continuación de la línea de retorno de combustible hacia el sistema de gravedad (anillo de calentamiento) o a la succión de las bombas del tanque n.º 10.

Nombre de la línea: FU-254-10"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	9	7,6	68,7
Codos de 45° Radio largo	1	4,1	4,1
Válvulas de compuerta	1	2,0	2,0
Total pérdidas por fricción en accesorios [m]			74,8
Longitud de la tubería [m]			87,1
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]			161,9

ESTACIÓN DE BOMBAS EN PLANTA Y SUMINISTRO A LOS QUEMADORES DE LA CALDERA

Tramo de tubería a la salida de la válvula tres vías, entrada a los filtros de succión.

Nombre de la línea: 7FU-01-10", 8FU-01-10" y 9FU-01-10".

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	1	7,6	7,6
Tees "T" de flujo en línea	1	5,1	5,1
Tees "T" de flujo derivado	1	15,3	15,3
Válvulas de compuerta	1	2,0	2,0
Total pérdidas por fricción en accesorios [m]			30,0
Longitud de la tubería [m]			3,7
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]			33,8

Tramo de tubería descarga de los filtros y colector de succión de las bombas del nivel planta.

Nombre de la línea: 7FU-06-10", 8FU-06-10" y 9FU-06-10".

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	3	7,6	22,9
Tees "T" de flujo en línea	1	5,1	5,1
Tees "T" de flujo derivado	2	15,3	30,5
Válvulas de compuerta	1	2,0	2,0
Total pérdidas por fricción en accesorios [m]			60,6
Longitud de la tubería [m]			14,6
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]			75,1

Tramo de tubería de succión correspondiente a cada bomba desde el colector y hasta la brida de entrada de la bomba.

Nombre de la línea: 7FU-10-8", 8FU-10-8" y 9FU-10-8".

Nombre de la línea: 7FU-11-8", 8FU-11-8" y 9FU-11-8".

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	4	6,1	24,3
Válvulas de compuerta	1	1,6	1,6
Reducciones o Expansiones	1	1,0	1,0
Total pérdidas por fricción en accesorios [m]			26,9
Longitud de la tubería [m]			8,1
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]			35,1

Tramo de tubería de descarga correspondiente a cada bomba desde la brida de salida hasta el colector de descarga.
Nombre de la línea: 7FU-13-6", 8FU-13-6" y 9FU-13-6".
Nombre de la línea: 7FU-14-6", 8FU-14-6" y 9FU-14-6".

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	2	4,6	9,2
Tees "T" de flujo en línea	2	3,1	6,2
Tees "T" de flujo derivado	2	9,2	18,5
Válvulas de compuerta	1	1,2	1,2
Válvulas de retención	1	15,4	15,4
Total pérdidas por fricción en accesorios [m]			50,5
Longitud de la tubería [m]			10,6
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]			61,1

Colector de descarga de las bombas.
Nombre de la línea: 7FU-33-8", 8FU-33-8" y 9FU-33-8".

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	2	6,1	12,2
Tees "T" de flujo en línea	1	4,1	4,1
Tees "T" de flujo derivado	2	12,2	24,3
Reducciones o Expansiones	1	1,0	1,0
Total pérdidas por fricción en accesorios [m]			41,5
Longitud de la tubería [m]			10,9
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]			52,5

Tramo de tubería que va desde el colector de descarga de las bombas hasta la válvula de control de presión.
Nombre de la línea: 7FU-34-8", 8FU-34-8" y 9FU-34-8".

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	2	6,1	12,2
Tees "T" de flujo en línea	1	4,1	4,1
Tees "T" de flujo derivado	1	12,2	12,2
Válvulas de compuerta	1	1,6	1,6
Reducciones o Expansiones	1	1,0	1,0
Total pérdidas por fricción en accesorios [m]			31,0
Longitud de la tubería [m]			9,7
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]			40,7

Tramo de tubería corriente debajo de la válvula de control de presión, descarga en la válvula tres vías de retorno.
Nombre de la línea: 7FU-36-8", 8FU-36-8" y 9FU-36-8".

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Tees "T" de flujo en línea	2	4,1	8,1
Tees "T" de flujo derivado	1	12,2	12,2
Válvulas de compuerta	1	1,6	1,6
Válvulas de retención	1	10,1	10,1
Reducciones o Expansiones	1	1,0	1,0
Válvulas de Control	1	68,9	68,9

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	102,0
Longitud de la tubería [m]	3,8
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	105,8

Tramo de tubería que va desde el colector de descarga de las bombas hasta la entrada a los filtros de descarga.
Nombre de la línea: 7FU-38-8", 8FU-38-8" y 9FU-38-8".

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	3	6,1	18,2
Tees "T" de flujo en línea	1	4,1	4,1
Tees "T" de flujo derivado	1	12,2	12,2
Válvulas de compuerta	1	1,6	1,6

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	36,1
Longitud de la tubería [m]	9,8
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	45,9

Tramo de tubería a la salida de los filtros de descarga.
Nombre de la línea: 7FU-39-8", 8FU-39-8" y 9FU-39-8".

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	5	6,1	30,4
Tees "T" de flujo derivado	1	12,2	12,2
Válvulas de compuerta	2	1,6	3,2

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	45,8
Longitud de la tubería [m]	21,4
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	67,2

Tramo de conexión entre la línea de descarga de los filtros y la entrada a los calentadores.
Nombre de la línea: 7FU-40-8", 8FU-40-8" y 9FU-40-8".

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	4	6,1	24,3
Tees "T" de flujo derivado	1	12,2	12,2
Válvulas de compuerta	1	1,6	1,6

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	38,1
Longitud de la tubería [m]	2,2
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	40,3

Tramo de tubería a la descarga del calentador.

Nombre de la línea: 7FU-42-8", 8FU-42-8" y 9FU-42-8".

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	4	6,1	24,3
Tees "T" de flujo derivado	1	12,2	12,2
Válvulas de compuerta	1	1,6	1,6

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	38,1
Longitud de la tubería [m]	4,1
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	42,2

Tramo de conexión entre las entradas y las descargas del par de calentadores.

Nombre de la línea: 7FU-46-8", 8FU-46-8" y 9FU-46-8".

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Tees "T" de flujo en línea	2	4,1	8,1
Válvulas de compuerta	1	1,6	1,6

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	9,7
Longitud de la tubería [m]	3,6
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	13,3

Tramo de tubería a la salida de los calentadores y finaliza a la entrada de la válvula de control de flujo en el primer piso de la caldera.

Nombre de la línea: 7FU-47-8", 8FU-47-8" y 9FU-47-8".

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	14	6,1	85,1
Tees "T" de flujo en línea	2	4,1	8,1
Válvulas de compuerta	2	1,6	3,2
Válvulas de Control	1	68,9	68,9

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	165,4
Longitud de la tubería [m]	40,5
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	206,0

Tramo de tubería a la descarga de la válvula de control de flujo y hasta la válvula de bloqueo de combustible.

Nombre de la línea: 7FU-51-8", 8FU-51-8" y 9FU-51-8".

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Tees "T" de flujo en línea	22	4,1	89,2
Válvulas de compuerta	2	1,6	3,2
Reducciones o Expansiones	1	1,0	1,0
Válvulas de Control	1	68,9	68,9

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	162,4
Longitud de la tubería [m]	5,8
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	168,1

Tramo a la descarga de la válvula de bloqueo y conexión con la placa orificio.
Nombre de la línea: 7FU-55-8", 8FU-55-8" y 9FU-55-8".

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	3	6,1	18,2
Tees "T" de flujo en línea	2	4,1	8,1
Reducciones o Expansiones	2	1,0	2,0

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	28,4
Longitud de la tubería [m]	3,6
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	32,0

Tramo de tubería de la placa orificio
Nombre de la línea: 7FU-56-4", 8FU-56-4" y 9FU-56-4".

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	0,0
Longitud de la tubería [m]	1,2
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	1,2

Tramo de tubería a la salida de la placa orificio y hasta la Tee "T" de conexión con el anillo de la caldera.
Nombre de la línea: 7FU-57-8", 8FU-57-8" y 9FU-57-8".

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	4	6,1	24,3
Tees "T" de flujo derivado	1	12,2	12,2

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	36,5
Longitud de la tubería [m]	4,2
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	40,7

Tubería correspondiente al anillo de suministro de combustible que rodea la caldera y surte a los 16 quemadores.
Nombre de la línea: 7FU-58-6", 8FU-58-6" y 9FU-58-6".

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	2	4,6	9,2
Codos de 45° Radio largo	8	2,5	19,7
Tees "T" de flujo derivado	4	9,2	37,0

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	65,9
Longitud de la tubería [m]	75,2
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	141,2

CÓMPUTOS MÉTRICOS DE LAS TUBERÍAS CORRESPONDIENTES AL TERCER CASO:

Bombeo de combustible de los tanques diarios (n.º 4 y 6) a las calderas de las unidades 7, 8 y 9, por medio del sistema de transferencia

Comprende las líneas de descarga de los tanques pequeños, la línea de suministro a las bombas del sistema de transferencia, el colector de succión y descarga de dichas bombas, la línea de succión y descarga de los calentadores, la línea sobre el puente de tuberías del nivel +42, la conexión con el puente de tuberías en planta y las líneas correspondientes de suministro de combustible a cada unidad, así como la línea de retorno de combustible.

Se presentan los cálculos métricos de las líneas de tuberías desde los tanques diarios hasta la conexión en planta, ya que los cálculos de las que continúan hasta la caldera son iguales a los presentados en el caso anterior.

Tramo de descarga del tanque n.º 6

Nombre de la línea: FU-07A-16"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	2	11,4	22,9
Tees "T" de flujo derivado	1	22,9	22,9
Válvulas de compuerta	1	3,0	3,0
Válvulas de retención	1	19,1	19,1
Entrada o Salida	1	7,0	7,0

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]

74,8

Longitud de la tubería [m]

5,4

LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]

80,3

Tramo de descarga del tanque n.º 4

Nombre de la línea: FU-07B-16"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	1	11,4	11,4
Tees "T" de flujo derivado	1	22,9	22,9
Válvulas de compuerta	1	3,0	3,0
Válvulas de retención	1	19,1	19,1
Entrada o Salida	1	7,0	7,0

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]

63,4

Longitud de la tubería [m]

7,5

LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]

70,9

Línea de descarga de los tanques y suministro al colector de succión de las bombas en el sistema de transferencia.

Esta línea comprende tres tramos: el primero desde el anillo de recirculación cercano al desmantelado tanque n.º 3 hasta la descarga del tanque n.º 4, el segundo desde la descarga del tanque n.º 4 hasta la descarga del tanque n.º 6, y el tercer tramo que va desde la descarga del tanque n.º 6 hasta el colector de succión de las bombas del nivel +26.

Nombre de la línea: FU-109-16"

Primer tramo	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	1	11,4	11,4
Tees "T" de flujo en línea	1	7,6	7,6
Tees "T" de flujo derivado	1	22,9	22,9

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]

41,9

Longitud de la tubería [m]

28,7

LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]

70,7

Segundo tramo	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	2	11,4	22,9
Codos de 45° Radio largo	3	6,1	18,3
Tees “T” de flujo en línea	1	7,6	7,6

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	48,8
Longitud de la tubería [m]	90,3
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	139,1

Tercer tramo	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	16	11,4	182,9
Codos de 45° Radio largo	3	6,1	18,3
Tees “T” de flujo derivado	1	22,9	22,9
Válvulas de retención	1	19,1	19,1

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	243,1
Longitud de la tubería [m]	171,9
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	415,0

Colector de succión de las bombas del sistema de transferencia (nivel 26)

Nombre de la línea: FU-08A-16”

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	2	11,4	22,9
Tees “T” de flujo en línea	5	7,6	38,1
Válvulas de compuerta	1	3,0	3,0

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	64,0
Longitud de la tubería [m]	14,4
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	78,4

Tramo de tubería a la entrada de las bombas del nivel 26, desde el colector hasta el filtro de succión.

Nombre de la línea: FU-09A-12”, FU-09B-12”, FU-09C-12” y FU-09D-12”

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Tees “T” de flujo derivado	1	18,2	18,2
Válvulas de compuerta	1	2,4	2,4
Reducciones o Expansiones	1	1,7	1,7

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	22,3
Longitud de la tubería [m]	3,4
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	25,7

Tramo de tubería a la entrada de las bombas del nivel 26, desde la descarga del filtro hasta la succión de la bomba.
Nombre de la línea: FU-13A-12", FU-13B-12", FU-13C-12" y FU-13D-12"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	1	9,1	9,1
Reducciones o Expansiones	1	1,7	1,7

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	10,8
Longitud de la tubería [m]	1,9
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	12,7

Tramo de descarga de la bomba del nivel 26 y conexión con el colector a la salida de las mismas.
Nombre de la línea: FU-110A-10", FU-110B-10", FU-110C-10" y FU-110D-10"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	1	7,6	7,6
Codos de 45° Radio largo	1	4,1	4,1
Tees "T" de flujo derivado	1	15,3	15,3
Válvulas de compuerta	1	2,0	2,0
Válvulas de retención	1	12,7	12,7

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	41,8
Longitud de la tubería [m]	3,7
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	45,5

Colector de descarga de las bombas y conexión con los calentadores de combustible del nivel 26.
Nombre de la línea: FU-111-16"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	2	11,4	22,9
Tees "T" de flujo en línea	4	7,6	30,5
Tees "T" de flujo derivado	2	22,9	45,7

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	99,1
Longitud de la tubería [m]	21,1
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	120,2

Entrada a los calentadores de combustible líquido (Fueloil #6)
Nombre de la línea: FU-112A-14" y FU-112B-14"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	1	10,0	10,0
Válvulas de compuerta	1	2,7	2,7
Reducciones o Expansiones	1	2,4	2,4

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	15,1
Longitud de la tubería [m]	1,3
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	16,4

Descarga de los calentadores y conexión con la línea de suministro a planta.

Nombre de la línea: FU-113A-14" y FU-113B-14"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	1	10,0	10,0
Válvulas de compuerta	1	2,7	2,7
Reducciones o Expansiones	1	2,4	2,4

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	15,1
Longitud de la tubería [m]	1,3
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	16,4

Tramo de tubería a la salida de los calentadores que conduce el fluido sobre el puente de tuberías en el nivel +26, superando la cota del nivel +42, para luego conectar con el puente de tuberías en planta (suministro a las unidades)
Nombre de la línea: FU-11-16"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	27	11,4	308,6
Codos de 45° Radio largo	12	6,1	73,2
Tees "T" de flujo en línea	1	7,6	7,6
Tees "T" de flujo derivado	2	22,9	45,7

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	435,1
Longitud de la tubería [m]	460,1
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	895,3

RETORNO DE COMBUSTIBLE POR EL SISTEMA DE TRANSFERENCIA

Tramo de tubería de retorno de combustible desde el puente de tuberías en planta hasta el anillo de retorno ubicado y conectado a la descarga del tanque n.º 4 (por la línea de salida del tanque).

Comprende dos tramos: primer tramo desde el anillo de recirculación hasta la válvula de control en el sistema de transferencia, segundo tramo desde la misma válvula de control hasta la conexión con el puente de tuberías en planta.

Nombre de la línea: FU-12-10"

Primer tramo	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	26	7,6	198,5
Codos de 45° Radio largo	7	4,1	28,5
Tees "T" de flujo en línea	2	5,1	10,2
Tees "T" de flujo derivado	3	15,3	45,8
Válvulas de compuerta	1	2,0	2,0
Válvulas de retención	1	12,7	12,7

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	297,8
Longitud de la tubería [m]	311,0
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	608,7

Segundo tramo	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	32	7,6	244,3
Codos de 45° Radio largo	9	4,1	36,6
Tees "T" de flujo derivado	1	15,3	15,3

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	296,2
Longitud de la tubería [m]	466,5
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	762,8

Tramo de conexión entre el colector de descarga de las bombas y la línea de retorno de combustible, en esta se encuentra la válvula reguladora para el control de presión de la descarga de las bombas del sistema de transferencia.

Nombre de la línea: FU-12A-8"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	2	6,1	12,2
Tees "T" de flujo en línea	2	4,1	8,1
Tees "T" de flujo derivado	2	12,2	24,3
Válvulas de compuerta	2	1,6	3,2
Reducciones o Expansiones	2	1,2	2,4
Válvulas de Control	1	68,9	68,9

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	119,2
Longitud de la tubería [m]	7,3
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	126,5

CÓMPUTOS MÉTRICOS DE LAS TUBERÍAS CORRESPONDIENTES AL CUARTO CASO:

Suministro de combustible desde el tanque n.º 7 a la caldera de las unidad 7, por medio del sistema de gravedad

Este caso comprende la línea de descarga del tanque n.º 7, que conducen el combustible a planta por la diferencia de cota entre el tanque y planta (por acción de la gravedad), así como la línea de retorno de dicho sistema que mezcla el combustible no quemado del retorno con la línea de suministro, en el anillo de recalentamiento en la esquina de “Tamakun” (frente a la planta Tacoa).

La memoria de cálculo para este caso contempla las tuberías desde el tanque n.º 7 hasta la conexión con el puente de tuberías en planta, ya que los demás tramos son iguales a los mostrados en el primer caso.

Esta línea comprende dos tramos de tubería: uno desde la descarga del tanque n.º 7 hasta el anillo de recalentamiento, y el segundo desde el anillo de recalentamiento hasta la conexión con el puente en planta.

Nombre de la línea: FU-Gravedad-16”

Tramo desde el tanque	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	10	11,4	114,3
Codos de 45° Radio largo	5	6,1	30,5
Válvulas de compuerta	2	3,0	6,1
Entrada o Salida	1	7,0	7,0
Total pérdidas por fricción en accesorios [m]			157,9
Longitud de la tubería [m]			548,8
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]			706,6

Enlace del retorno	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	16	11,4	182,9
Codos de 45° Radio largo	3	6,1	18,3
Tees “T” de flujo en línea	1	7,6	7,6
Tees “T” de flujo derivado	2	22,9	45,7
Válvulas de compuerta	2	3,0	6,1
Total pérdidas por fricción en accesorios [m]			260,6
Longitud de la tubería [m]			235,8
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]			496,5

Tramo de tubería de la línea de retorno de combustible que conduce el fueloil no quemado al anillo de recirculación y recalentamiento en Tacoa.

Nombre de la línea: FU-Gravedad-10”

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	13	7,6	99,3
Codos de 45° Radio largo	3	4,1	12,2
Tees “T” de flujo derivado	2	15,3	30,5
Válvulas de compuerta	2	2,0	4,1
Total pérdidas por fricción en accesorios [m]			146,1
Longitud de la tubería [m]			229,4
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]			375,5

Tramo de tubería del retorno que conecta el puente de tuberías en planta hasta la derivación por la línea de retorno del anillo de recirculación y recalentamiento.

Nombre de la línea: FU-254-10"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	1	7,6	7,6
Tees "T" de flujo derivado	2	15,3	30,5

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	38,2
Longitud de la tubería [m]	17,8
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	56,0

Tramo de tubería de retorno de combustible caliente no quemado de la caldera.

Nombre de la línea: FU-52-1½"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	1	1,2	1,2
Tees "T" de flujo derivado	1	2,5	2,5
Válvulas de retención	1	4,1	4,1
Reducciones o Expansiones	1	1,0	1,0
Válvulas de Control	1	13,9	13,9

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	22,7
Longitud de la tubería [m]	1,4
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	24,1

Tramo de tubería de retorno de combustible caliente no quemado de la caldera.

Nombre de la línea: FU-53-4"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	5	3,1	15,3
Reducciones o Expansiones	1	1,0	1,0

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	16,3
Longitud de la tubería [m]	6,3
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	22,6

Tramo de tubería de retorno de combustible caliente no quemado de la caldera.

Nombre de la línea: FU-84-5"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	14	3,8	53,8
Tees "T" de flujo derivado	1	7,7	7,7

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	61,5
Longitud de la tubería [m]	47,4
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	108,9

Tramo de tubería de retorno de combustible caliente no quemado de la caldera.

Nombre de la línea: FU-87-5"

	Cantidad	Pérdidas por fricción en los accesorios, longitud eqv. [m]	Total de pérdidas, longitud eqv. [m]
Codos de 90° Radio largo	2	3,8	7,7
Tees "T" de flujo derivado	3	7,7	23,1
Válvulas de compuerta	2	1,0	2,1
Válvulas de retención	1	12,8	12,8
Reducciones o Expansiones	1	1,0	1,0

Total pérdidas por fricción en accesorios [m]	46,6
Longitud de la tubería [m]	8,7
LONGITUD TOTAL DE LA TUBERÍA EQUIVALENTE [m]	55,3

CAPÍTULO VI
ESTUDIO DE LAS PROPUESTAS DE MEJORA

6.1. PROPUESTAS DE MEJORA

Tenemos tres subsistemas que funcionan independientes uno del otro, y que juntos componen el sistema de suministro de combustible líquido (fueloil) del cual dispone la planta ampliación, estos son:

El formado por el tanque 10 y la estación de bombas ubicada en la proximidad de dicho tanque y la red de tuberías del mismo, que le permite llevar combustible hasta los tanque diarios y hasta la planta independientemente de los otros subsistemas, cuenta con una conexión a un par de intercambiadores de calor (calentadores de combustible) que están ubicados en el patio de bombas del nivel 26. Este tanque esta en capacidad de recibir y almacenar 25000 toneladas de combustible procedente de los buques tanqueros por medio de una conexión de tuberías y mangueras submarinas.

El formado por los tanques diarios números 4 y 6, que reciben combustible del tanquero directamente, o del tanque 10 pero necesitando la acción de las bombas asociadas a dicho tanque (bombas del tanque 10). De estos tanques el combustible es bombeado a planta en las condiciones de presión y temperatura necesarias por medio de la acción del sistema de bombeo de transferencia o también llamado nivel 26, que dispone de cuatro bombas en paralelo, válvulas de control de presión y de un par de calentadores de combustible.

Y por ultimo el subsistema formado por el tanque diario número 7, que recibe combustible del tanque 10 por medio de las bombas de dicho tanque, o directamente del buque tanquero. El tanque 7 descarga, envía o suministra el combustible a las bombas de la caldera por medio de una conexión de tuberías a planta carente de bombas y calentadores, solo por la acción de la gravedad. Este sistema presenta un accesorio o aditamento bien importante para mejorar la temperatura del fluido a la entrada de las bombas, posee una reconexión con el fluido no quemado que retorna a mayor temperatura de la caldera y se mezcla con el proveniente del tanque, esto ocurre mucho antes de la succión de las bombas de combustible de la caldera, a esto se le llama anillo de recirculación y calentamiento del sistema de gravedad. Lo que

permite elevar la temperatura del fluido y por lo tanto disminuir sus viscosidad, esto es debido a la condición requerida de viscosidad a la entrada de las bombas.

Sumado a estos tres subsistemas esta el sistema de boyas y anclajes para el buque banquero que transporta el fueloil, que transfiere el combustible a los tanques apoyado en una manguera submarina que conecta con una tubería en tierra en la explanada oeste.

Adicionalmente están las bombas de combustible de la caldera (llamadas de alta presión) que reciben el combustible proveniente de cualquiera de los subsistemas de alimentación de fueloil y le elevan la presión del combustible hasta la presión de trabajo de los quemadores de la caldera. A la descarga de dichas bombas están ubicados los calentadores de combustible que elevan la temperatura del fueloil para llevarlo a los valores de viscosidad requeridos para la correcta operación de los quemadores de la caldera.

Habiendo expuesto corta y rápidamente el sistema de combustible, nos concentramos en las propuestas y planteamientos de mejora

Se plantea la reutilización de equipos de bombeo de combustible de la planta Arrecifes para optimizar el uso del combustible almacenado en el tanque n.º 7.

Se propone la adquisición de nuevos equipos de bombeo para optimizar el uso del combustible almacenado en el tanque n.º 7.

Para ello debemos estudiar la opción de colocar bombas a la descarga del tanque n.º 7, para elevar la presión de suministro de combustible líquido fueloil a la succión de las bombas de la caldera, ya que dicho sistema funciona mediante gravedad. Estas bombas pueden ser unas bombas nuevas (a adquirir) o unos equipos ya existentes y que pudieran ser reutilizados y aprovechados en esta propuesta de mejora. Se pueden colocar dichas bombas a trasegar combustible a los tanques diarios, a bombear combustible directamente a la planta por medio del sistema de gravedad o por medio del sistema de transferencia.

Eliminar el tanque 7, esta dentro de las opciones pero además de representar un costo adicional, no da mayor beneficio y reduce el combustible disponible almacenado y por lo tanto la autonomía de operatividad de la planta a base de fueloil.

Debido a la capacidad de almacenamiento de combustible del tanque n.º 7, estamos ante la disyuntiva de si se debe invertir en este viejo tanque (tiempo de vida, uso y funcionamiento del tanque) o en un nuevo tanque con mayor capacidad y que sea conectado al ya existente sistema de bombas del tanque 10 (futuro y proyectado tanque 11). La propuesta implica, la adquisición de los equipos (entiéndase bombas y sus motores), tendido eléctrico y el sistema de potencia de los mismos, tendido de tuberías, instalación y conexión de las mismas, sistema de control y de la instrumentación necesaria, para el correcto funcionamiento de las instalaciones. Debemos también, tomar en cuenta el costo del transporte, ingeniería, procura, construcción, instalación y puesta en funcionamiento de los equipos.

Otra opción sería colocar calentadores a la salida del tanque 7, pero tomando en cuenta la experiencia y los sucesos vividos en planta, no se debe de calentar el combustible en áreas cercanas a los tanques de almacenamiento de fueloil, evitar la recirculación de combustible caliente al tanque, para evitar que se presente el fenómeno de *Boil Over*.

En resumen:

- Eliminar el tanque 7.
- Mover el tanque 7 a un sitio de mayor cota.
- Instalar calentadores de combustible a la descarga del tanque 7.
- Instalar bombas en el anillo de calentamiento de combustible de Tacoa.
- Instalar bombas a la descarga tanque 7 hacia sistema de gravedad.
- Instalar bombas a la descarga tanque 7 hacia sistema de transferencia.
- Instalar bombas a la descarga tanque 7 hacia tanques diarios.

Las primera cuatro no son viables técnica y económicamente, por lo que nos concentramos en las tres restantes.

En la propuesta estamos tomando en consideración la reutilización de 6 bombas que no están en uso, provenientes de la planta Arrecifes, así como la adquisición de nuevos equipos de bombeo.

Según la información y datos recolectados sobre las características operacionales de las bombas de Arrecifes, estas son capaces de manejar 530

litros/minuto de combustible con una viscosidad de 780 cSt, a una presión de descarga de solo 10 bares y con una potencia en el eje de 20 kW, lo que se traduce que solo una bomba es capaz de manejar 31,8 m³/h de fueloil, dicha presión a la descarga es suficiente para elevar considerablemente la presión a la succión de las bombas de la caldera, pero el caudal que maneja una sola bomba muy bajo; esto sin tomar en cuenta que la viscosidad del fueloil a una temperatura de 30 °C es 3300 cSt, y esta viscosidad esta por encima de la que nos muestra la curva de la bomba, por lo que necesitaríamos hacer pruebas o buscar el apoyo del fabricante para determinar la capacidad de dicha bomba para manejar el fueloil a temperatura ambiente.

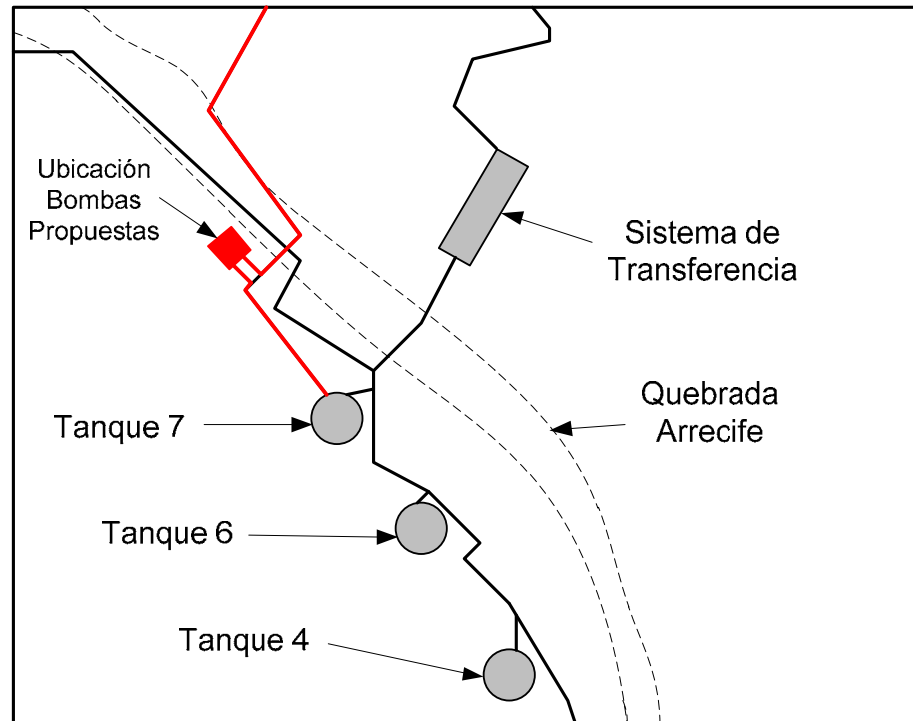
Esto implicaría colocar al menos tres de estas bombas en paralelo para suministrar un caudal total de 95,4 m³/h, este caudal esta ligeramente por debajo del caudal teórico que consume una sola unidad generadora a toda capacidad (400 MW) quemando únicamente fueloil, que son 96 m³/h, dicho esto necesitaríamos al menos que colocar cuatro bombas en paralelo, para satisfacer las necesidades de consumo de solo una unidad. Seria necesario instalar una bomba más para que opere en modo de espera, alerta de servicio o *stand by*. En total instalaríamos 5 bombas para satisfacer las necesidades de combustible de solo una caldera.

Lo ideal seria tener una bomba o un par de ellas que sean capaces de manejar el caudal requerido por una caldera, teniendo una adicional en modo de espera.

En las tres alternativas se propone instalar las bombas en una cota por debajo a la del tanque 7, en un lugar fuera del bunker o talud de seguridad del tanque, donde es posible construir las fundaciones o bases de las mismas, instalar la acometida eléctrica y la conexión a la red de tuberías.

La diferencia entre ellas reside en la conexión a la descarga de las bombas, es decir, se conectan a las líneas: de suministro por el sistema gravedad, de suministro por el sistema transferencia, y de llenado de los tanques diarios provenientes del tanque 10. Esta última opción nos da la oportunidad de trasegar el combustible almacenado en el tanque 7 a los tanques diarios 4 y 6, de esta manera aprovechar el combustible de dicho tanque y llevarlo a los de mayor cota, que se valen del sistema de transferencia para llevar el combustible a planta.

Figura 6.1. Instalar bombas a la descarga tanque 7 hacia el sistema de gravedad.



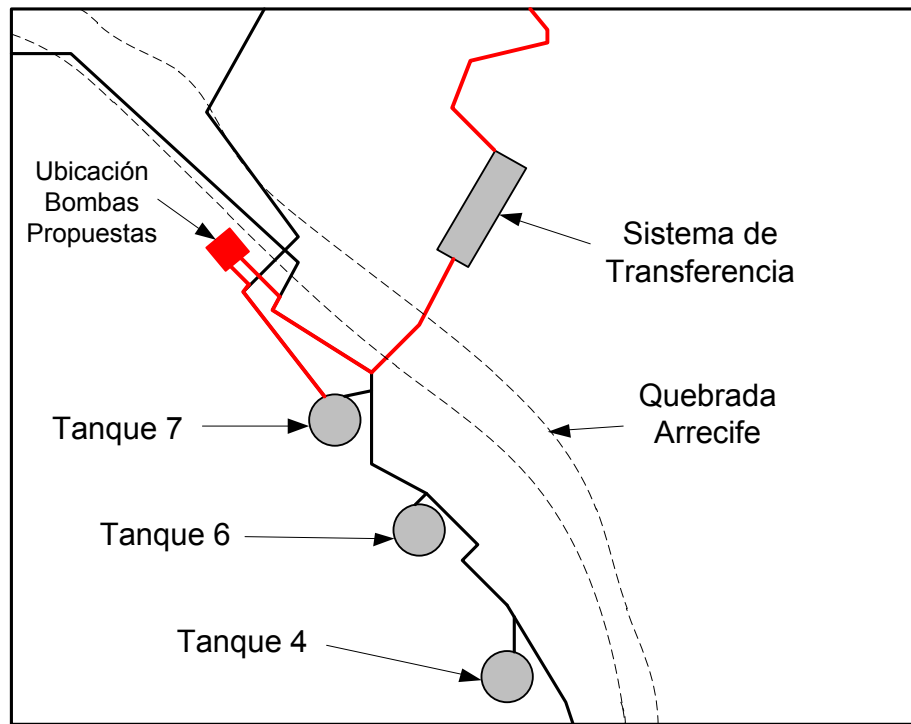
El grupo de bombeo se puede emplazar hacia el sur de los tanques diarios en la margen derecha de la quebrada de Arrecife, cercano al sitio donde está la válvula manual FU-226 para el paso de combustible de llenado de los tanques diarios.

La cota de este sitio es 24,57 msnm y esta por debajo de la cota inferior de llenado del tanque 7 que es 26,23 msnm, con esto aseguramos una presión por gravedad y columna de líquido en la succión de las bombas. Dichas bombas deben tener un bajo NPSH ya que el disponible es bajo y va a depender de la cantidad de fueloil almacenado en el tanque.

La succión y la descarga de las bombas se conectarían a la descarga por el sistema de gravedad del tanque 7, es decir a la línea de servicio por gravedad. Con esto se logra elevar la presión de servicio en la tubería de gravedad, y elevar la presión a la succión de las bombas de combustible de la caldera.

Para evitar el retroceso de combustible hacia el tanque se colocaría una válvula de un solo paso o válvula check.

Figura 6.2. Instalar bombas a la descarga tanque 7 hacia el sistema de transferencia.

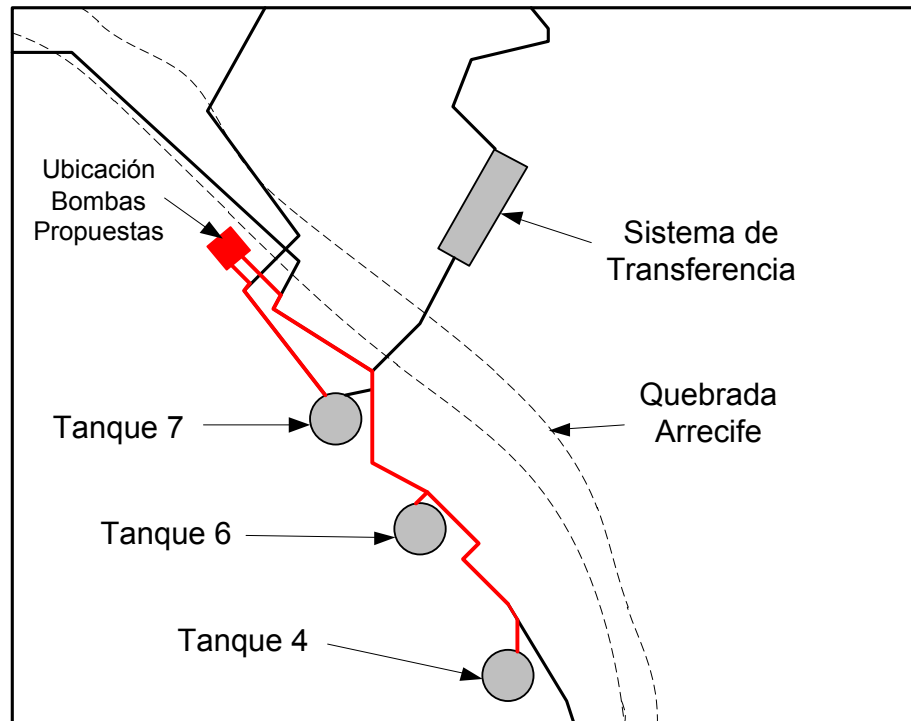


A diferencia de la anterior en esta propuesta se conectaría de descarga de las bombas a la succión de las bombas del sistema de transferencia, con esto lograríamos elevar la presión del combustible a la succión de las bombas del sistema de transferencia cuando se usa el combustible del tanque 7, lo que actualmente no es posible ya que la cota del tanque y de las bombas es la misma, y no están conectados por líneas de tuberías.

Esto nos brinda la posibilidad de alimentar a las calderas de combustible desde el tanque 7, aumenta la disponibilidad y confiabilidad al agregar bombas que fortalecen el sistema.

Es posible combinar las dos alternativas vistas y tener más opciones para el uso del combustible de dicho tanque.

Figura 6.3. Instalar bombas a la descarga tanque 7 hacia los tanques diarios.



En esta alternativa elegimos unir la descarga de las bombas propuestas a la conexión de llenado de los tanques 4 y 6, con esto se transfiere o trasiega el combustible del tanque 7 a los otros dos, en este caso nos serviríamos de las líneas de llenado existentes y de sus válvulas selectoras de llenado, para elegir el tanque y realizar la operación de trasegado de combustible.

Esta alternativa nos permite mejorar la oferta de almacenaje de la planta y funcionar como un tanque para transferencia de combustible, también nos permite dar un descanso a las bombas del grupo tanque 10, también aumenta la disponibilidad de combustible y en caso de alguna emergencia apoya al resto del sistema de combustible de la planta. Tampoco es necesario colocar cuatro bombas como en el primer caso si de trasegar el combustible a los otros tanques con solo dos bombas es suficiente.

Así como los dos casos anteriores, es posible armar un híbrido de las tres propuestas, conectando el grupo de bombas a las líneas de tuberías y satisfacer las tres alternativas.

CAPÍTULO VII
RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1. RESULTADOS

De los sistemas de ecuaciones propuestos por el método de Hardy-Cross se obtienen las incógnitas planteadas en los sistemas (los caudales de la red) de allí podemos determinar los puntos de operación de las bombas (caudal, presión total, potencia, NPSH disponible), las presiones en los diferentes puntos de la red, las pérdidas de presión por fricción y los accesorios (calculadas como longitud equivalente de tubería recta).

Con dichos valores podemos entonces analizar el comportamiento de red al realizar cambios en las variables del sistema o subsistema planteado y en los casos en que apliquen, como lo son variar el valor del punto de ajuste o *set point* de la válvula de regulación de presión, niveles de combustible almacenado en los tanques, y la viscosidad del fluido; en este ultimo punto de la viscosidad del fluido es importante hacer la acotación de que las viscosidades se plantea variarlas según el caso y posibilidad real de tener cambios de temperatura en dichos casos. Por ejemplo en el primer caso: la viscosidad depende de la temperatura a la que este se encuentre el en tanque número 10, de esto podemos decir que se encontró que los tanqueros aumentan la temperatura del combustible para mejorar el bombeo hacia el tanque cuando descargan, por lo que el tanque recibe combustible a mayor temperatura y esto impacta en el comportamiento de las bombas.

Para el segundo caso, se toma igualmente en cuenta la temperatura del combustible almacenado en el tanque número 10 y que es bombeado directamente a la succión de las bombas de la caldera de las diferentes unidades de generación, como es de esperarse esa variación de temperatura a la que hacemos referencia también impacta en el desempeño de las bombas del grupo tanque 10.

En los dos casos anteriores también se varía el punto de ajuste de la válvula de regulación de presión del grupo de bombas del tanque 10, esta válvula conecta el colector de descarga de las bombas con el de succión de las mismas y permite el retorno de combustible como medida para la regulación de presión; esta variación se

realiza con la finalidad de determinar como impacta la configuración de dicha válvula en la operación del sistema.

Para el tercer caso, se varían la temperatura a la succión de las bombas del sistema de transferencia y el nivel de combustible almacenado en el tanque número 6 se toma este tanque ya que es el caso mas desfavorable, ya que la base de dicho tanque esta en un nivel mas bajo con respecto a la base del tanque numero 4. El cambio de temperatura esta asociado al combustible un poco mas caliente que retorno de la caldera y en menor medida a la temperatura que tiene al ser trasegado del tanque número 10 que en la mayoría de los casos esta a mayor temperatura.

Para el cuarto y ultimo caso, se varia la temperatura del fluido desde el anillo de retorno en frente a la planta Tocoa, y la altura o nivel de combustible almacenado en el tanque número 7, dicho tanque es el que alimenta el sistema de gravedad.

Para todos los resultados son los que consideramos mas importantes y que dan una clara idea de como funciona el sistema, y si este esta operando en buenas condiciones bajo las variables definidas al inicio de los cálculos.

En el anexo del presente trabajo se encuentran las hojas de cálculo por cada caso propuesto y su desarrollo, se detallan los cálculos y paso a paso de cada una de las redes de tuberías analizadas y que conforman el sistema de combustible de la planta.

Posteriormente se muestran tablas a manera de resumen de los valores determinados por el cálculo de longitud equivalente de tubería recta por cada tramo de tubería presente en las redes propuestas.

Por ultimo se presentan tablas con los resultados del cálculo por caso, realizados con los datos de los reportes de operación diarios y con los datos tomados del DCS.

7.1.1. RESULTADOS DEL PRIMER CASO

Tabla 7.1 Resultados del análisis de la red propuesta en el primer caso (una bomba).

Cuadro resumen de resultados por el método Hardy-Cross con Newton-Raphson
Primer caso: Trasegado de combustible del tanque n.º 10 a los tanques de
almacenamiento diario
Una bomba del grupo del tanque n.º 10 en operación

			Valor ajuste válvula control [kgf/cm ²]				
			9	10	11	12	
Temperatura Fueloil n.º 6 [°C]	30	3300	67,8	53,2	38,7	24,1	Caudal de retorno [m³/h]
			12,9	13,5	14,2	14,9	Presión total de la bomba [bar]
			0,24	0,27	0,30	0,34	Rata de llenado del tanque [m/h]
			46,15	47,22	48,24	49,2	Eficiencia de la Bomba [%]
			213,9	219,4	224,8	230,3	Corriente en el motor [A]
	35	2000	32,8	8,9	-15,0	-38,9	Caudal de retorno [m³/h]
			11,1	11,7	12,4	13,1	Presión total de la bomba [bar]
			0,32	0,37	0,42	0,47	Rata de llenado del tanque [m/h]
			45,42	46,65	47,80	48,88	Eficiencia de la Bomba [%]
			186,7	192,2	197,7	203,2	Corriente en el motor [A]
	40	1600	10,6	-19,2	-49,1	-78,9	Caudal de retorno [m³/h]
			10,5	11,2	11,9	12,5	Presión total de la bomba [bar]
			0,37	0,43	0,50	0,56	Rata de llenado del tanque [m/h]
			45,59	46,88	48,07	49,19	Eficiencia de la Bomba [%]
			176,6	182,1	187,7	193,2	Corriente en el motor [A]
	45	780	-105,8	-166,8	-227,8	-288,8	Caudal de retorno [m³/h]
			9,4	10,1	10,7	11,4	Presión total de la bomba [bar]
			0,62	0,75	0,88	1,01	Rata de llenado del tanque [m/h]
			47,99	49,37	50,64	51,80	Eficiencia de la Bomba [%]
			149,2	154,8	160,4	166,0	Corriente en el motor [A]
	50	650	-151,3	-224,4	-297,5	-370,6	Caudal de retorno [m³/h]
			9,2	9,9	10,5	11,2	Presión total de la bomba [bar]
			0,72	0,88	1,03	1,19	Rata de llenado del tanque [m/h]
			49,02	50,41	51,67	52,82	Eficiencia de la Bomba [%]
			143,1	148,7	154,4	160,0	Corriente en el motor [A]

Tabla 7.2 Resultados del análisis de la red propuesta en el primer caso (dos bombas).

Cuadro resumen de resultados por el método Hardy-Cross con Newton-Raphson
Primer caso: Trasegado de combustible del tanque n.º 10 a los tanques de
almacenamiento diario
Dos bombas del grupo del tanque n.º 10 en operación

			Valor ajuste válvula control [kgf/cm ²]					
			9	10	11	12		
Temperatura Fueloil n.º 6 [°C]	30	Viscosidad [cSt]	3300	187,3	172,6	157,8	143,1	Caudal de retorno [m ³ /h]
				15,6	16,2	16,9	17,5	Presión total de la bomba [bar]
				0,37	0,40	0,43	0,46	Rata de llenado del tanque [m/h]
				50,15	51,01	51,81	52,58	Eficiencia de la Bomba [%]
				236,0	241,4	246,8	252,2	Corriente en el motor [A]
	35		2000	152,6	128,4	104,3	80,1	Caudal de retorno [m ³ /h]
				12,7	13,4	14,0	14,7	Presión total de la bomba [bar]
				0,44	0,50	0,55	0,60	Rata de llenado del tanque [m/h]
				48,30	49,34	50,32	51,24	Eficiencia de la Bomba [%]
				200,2	205,7	211,2	216,7	Corriente en el motor [A]
	40		1600	130,5	100,4	70,3	40,1	Caudal de retorno [m ³ /h]
				11,8	12,5	13,1	13,8	Presión total de la bomba [bar]
				0,49	0,56	0,62	0,68	Rata de llenado del tanque [m/h]
				48,03	49,14	50,18	51,15	Eficiencia de la Bomba [%]
				187,5	193,0	198,5	204,0	Corriente en el motor [A]
	45		780	14,1	-47,3	-108,6	-170,0	Caudal de retorno [m ³ /h]
				10,0	10,7	11,4	12,0	Presión total de la bomba [bar]
				0,74	0,88	1,00	1,14	Rata de llenado del tanque [m/h]
				49,31	50,58	51,74	52,81	Eficiencia de la Bomba [%]
				154,5	160,1	165,7	171,3	Corriente en el motor [A]
	50		650	-31,4	-104,9	-178,4	-251,9	Caudal de retorno [m ³ /h]
				9,7	10,4	11,1	11,7	Presión total de la bomba [bar]
				0,84	1,00	1,16	1,30	Rata de llenado del tanque [m/h]
				50,13	51,42	52,59	53,66	Eficiencia de la Bomba [%]
				147,6	153,2	158,8	164,4	Corriente en el motor [A]

Tabla 7.3 Resultados del análisis de la red propuesta en el primer caso (tres bombas).

Cuadro resumen de resultados por el método Hardy-Cross con Newton-Raphson
Primer caso: Trasegado de combustible del tanque n.º 10 a los tanques de
almacenamiento diario
Tres bombas del grupo del tanque n.º 10 en operación

				Valor ajuste válvula control [kgf/cm ²]				
				9	10	11	12	
Temperatura Fueloil n.º 6 [°C]	30	Viscosidad [cSt]	3300	305,1	290,1	275,1	260,2	Caudal de retorno [m ³ /h]
				18,2	18,8	19,5	20,1	Presión total de la bomba [bar]
				0,49	0,52	0,55	0,58	Rata de llenado del tanque [m/h]
				53,32	54,00	54,65	55,27	Eficiencia de la Bomba [%]
				257,7	263,0	268,4	273,7	Corriente en el motor [A]
	35		2000	271,1	246,6	222,2	197,7	Caudal de retorno [m ³ /h]
				14,3	15,0	15,6	16,3	Presión total de la bomba [bar]
				0,57	0,62	0,67	0,72	Rata de llenado del tanque [m/h]
				50,73	51,62	52,45	53,24	Eficiencia de la Bomba [%]
				213,6	219,0	224,8	230,0	Corriente en el motor [A]
	40		1600	249,2	218,8	188,4	158,0	Caudal de retorno [m ³ /h]
				13,1	13,8	14,4	15,1	Presión total de la bomba [bar]
				0,62	0,68	0,74	0,81	Rata de llenado del tanque [m/h]
				50,13	51,10	52,01	52,86	Eficiencia de la Bomba [%]
				198,2	203,7	209,2	214,6	Corriente en el motor [A]
	45		780	133,2	71,5	9,8	-51,9	Caudal de retorno [m ³ /h]
				10,7	11,3	12,0	12,6	Presión total de la bomba [bar]
				0,87	1,00	1,13	1,26	Rata de llenado del tanque [m/h]
				50,52	51,69	52,76	53,74	Eficiencia de la Bomba [%]
				159,9	165,5	171,0	176,6	Corriente en el motor [A]
	50		650	87,8	13,9	-59,9	-133,8	Caudal de retorno [m ³ /h]
				10,3	10,9	11,6	12,3	Presión total de la bomba [bar]
				0,97	1,12	1,28	1,44	Rata de llenado del tanque [m/h]
				51,16	52,35	53,44	54,44	Eficiencia de la Bomba [%]
				152,0	157,6	163,3	168,9	Corriente en el motor [A]

7.1.1.1. GRÁFICOS DE LOS RESULTADOS DEL PRIMER CASO

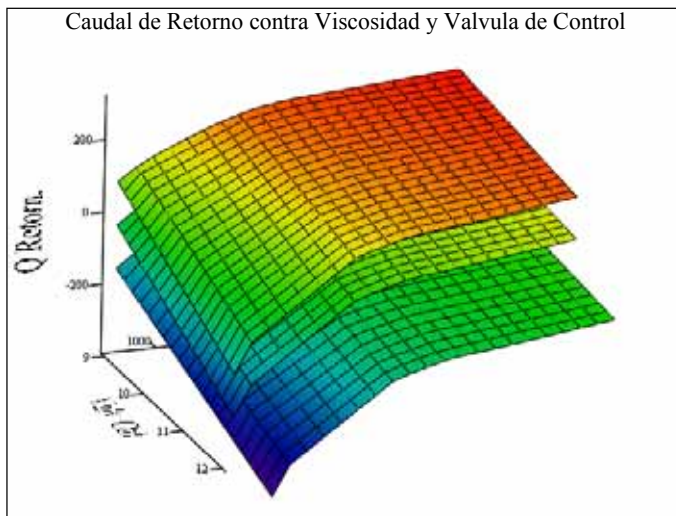


Gráfico 7.1.

Caudal de combustible que retorna por la acción de la válvula de regulación de presión del grupo de bombas del tanque n.º 10, contra la viscosidad del combustible almacenado en el tanque n.º 10 y el valor de control de la válvula de regulación presión del grupo de bombas del tanque n.º 10.

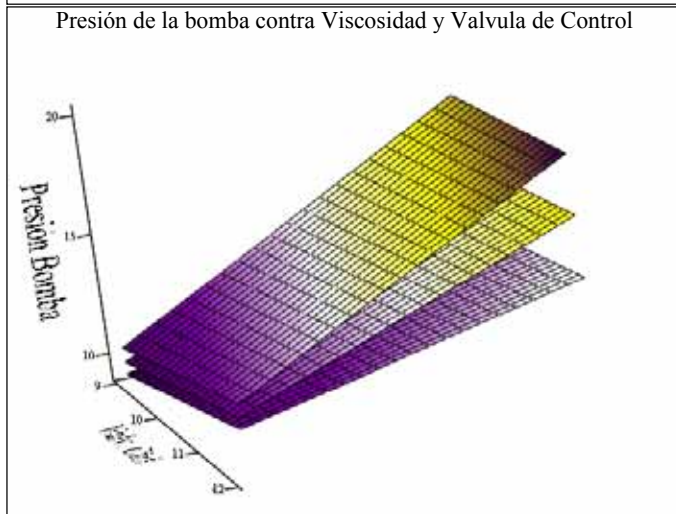


Gráfico 7.2.

Presión total de la bomba (presión de descarga menos la presión de succión) en servicio del grupo de bombas del tanque n.º 10, contra la viscosidad del combustible almacenado en el tanque n.º 10 y el valor de control de la válvula de regulación presión del grupo de bombas del tanque n.º 10

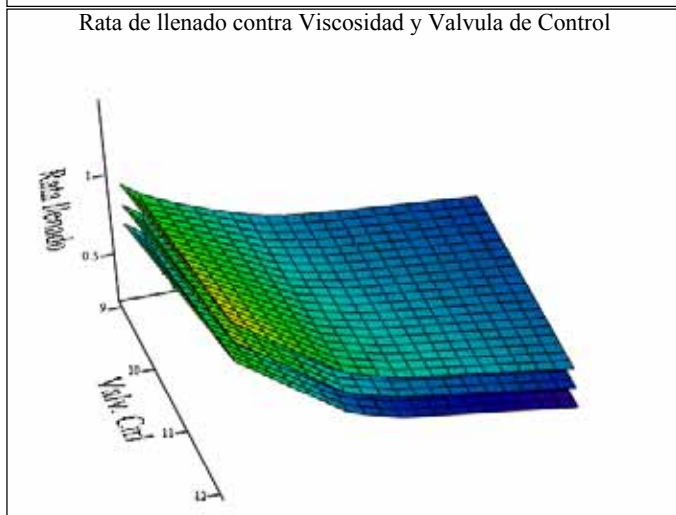


Gráfico 7.3.

Rata de llenado del tanque n.º 4 en metros de nivel de combustible en el mismo tanque por hora, con el fueloil trasegado desde el tanque n.º 10, contra la viscosidad del combustible almacenado en el tanque n.º 10 y el valor de control de la válvula de regulación presión del grupo de bombas del tanque n.º 10.

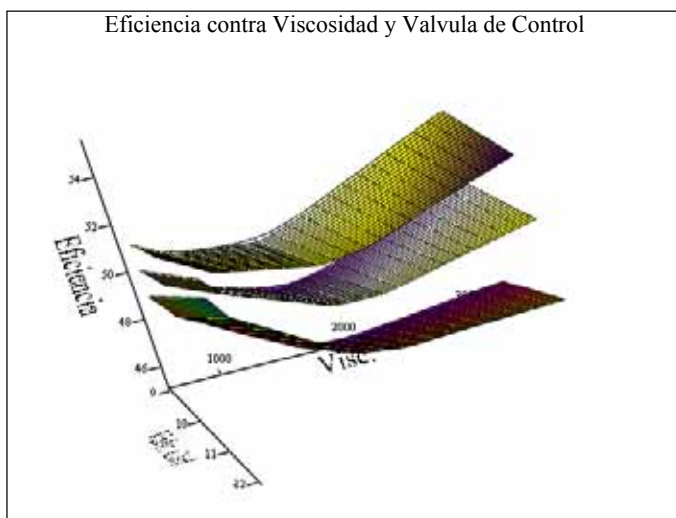


Gráfico 7.4.

Eficiencia de las bombas de combustible del grupo de bombeo del tanque n.º 10, contra la viscosidad del combustible almacenado en el tanque n.º 10 y el valor de control de la válvula de regulación presión del grupo de bombas del tanque n.º 10.

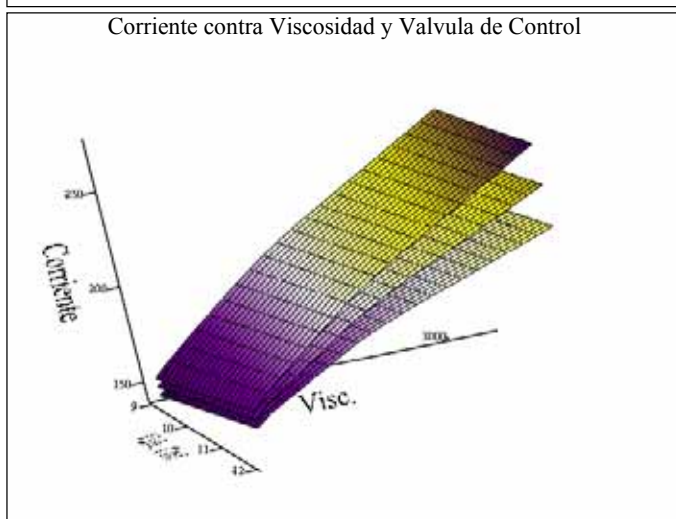


Gráfico 7.5.

Intensidad de corriente que el motor de la bomba del grupo de tanque n.º 10 absorbe de la red de suministro de energía eléctrica, contra la viscosidad del combustible almacenado en el tanque n.º 10 y el valor de control de la válvula de regulación presión del grupo de bombas del tanque n.º 10.

7.1.2. RESULTADOS DEL SEGUNDO CASO

Tabla 7.4 Resultados del análisis de la red propuesta en el segundo caso.

Cuadro resumen de resultados por el método Hardy-Cross con Newton-Raphson
Segundo caso: Bombeo de combustible del Tanque n.º 10 a las unidades 7, 8 y 9.

Dos bombas del grupo del tanque n.º 10 en operación

				Valor ajuste válvula control [kgf/cm ²]				
				12	11	10	9	
Temperatura Fueloil n.º 6 [°C]	30	Viscosidad [cSt]	3300	3,42	5,09	6,75	8,41	Caudal de retorno [m³/h]
				15,12	14,18	13,24	12,31	Presión total de la bomba [bar]
				64,75	64,02	63,29	62,55	Caudal de retorno [m³/h]
				49,57	48,22	46,76	45,17	Eficiencia de la Bomba [%]
				232,45	224,73	217,01	209,29	Corriente en el motor [A]
				25,93	26,86	27,79	28,71	Presión total de la bomba [bar]
				59,87	60,51	61,12	61,69	Eficiencia de la Bomba [%]
				12,96	13,25	13,54	13,84	Corriente en el motor [A]
	35		2000	-0,40	1,51	3,42	5,33	Caudal de retorno [m³/h]
				14,00	13,05	12,10	11,15	Presión total de la bomba [bar]
				66,68	65,93	65,18	64,44	Caudal de retorno [m³/h]
				50,29	48,86	47,29	45,56	Eficiencia de la Bomba [%]
				211,03	203,13	195,24	187,35	Corriente en el motor [A]
				23,50	24,44	25,39	26,33	Presión total de la bomba [bar]
				58,00	58,76	59,48	60,15	Eficiencia de la Bomba [%]
				12,19	12,49	12,78	13,08	Corriente en el motor [A]
	40		1600	-1,91	0,11	2,13	4,15	Caudal de retorno [m³/h]
				13,67	12,71	11,76	10,80	Presión total de la bomba [bar]
				67,28	66,53	65,78	65,03	Caudal de retorno [m³/h]
				50,95	49,51	47,91	46,14	Eficiencia de la Bomba [%]
				202,81	194,85	186,89	178,92	Corriente en el motor [A]
				22,74	23,69	24,64	25,59	Presión total de la bomba [bar]
				57,35	58,15	58,91	59,62	Eficiencia de la Bomba [%]
				11,95	12,25	12,55	12,85	Corriente en el motor [A]
	45		780	-6,27	-3,90	-1,53	0,83	Caudal de retorno [m³/h]
				13,00	12,04	11,07	10,11	Presión total de la bomba [bar]
				68,54	67,78	67,02	66,26	Caudal de retorno [m³/h]
				54,25	52,85	51,26	49,47	Eficiencia de la Bomba [%]
				179,68	171,53	163,37	155,22	Corriente en el motor [A]
				21,15	22,11	23,07	24,03	Presión total de la bomba [bar]
				55,88	56,78	57,64	58,43	Eficiencia de la Bomba [%]
				11,44	11,75	12,05	12,36	Corriente en el motor [A]
	50		650	-7,30	-4,85	-2,39	0,06	Caudal de retorno [m³/h]
				12,90	11,93	10,97	10,00	Presión total de la bomba [bar]
				68,74	67,98	67,22	66,45	Caudal de retorno [m³/h]
				55,34	53,97	52,42	50,65	Eficiencia de la Bomba [%]
				174,35	166,16	157,96	149,76	Corriente en el motor [A]
				20,89	21,85	22,82	23,78	Presión total de la bomba [bar]
				55,63	56,55	57,42	58,23	Eficiencia de la Bomba [%]
				11,36	11,67	11,97	12,28	Corriente en el motor [A]

7.1.2.1. GRÁFICOS DEL SEGUNDO CASO

Caudal de Retorno en Reguladora del T10

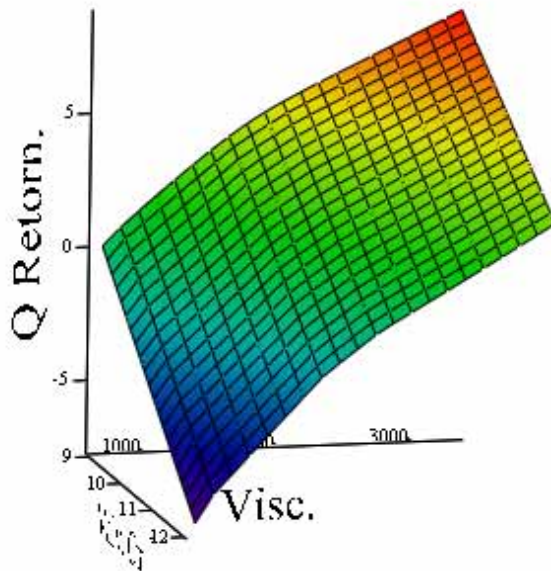


Gráfico 7.6.

Caudal de combustible que retorna (retorno corto) por la acción de la válvula de regulación de presión del grupo de bombas del tanque n.º 10, contra la viscosidad del combustible almacenado en el tanque n.º 10 y el valor de control de la válvula de regulación presión del grupo de bombas del tanque n.º 10.

Presión Total de la bomba en T10

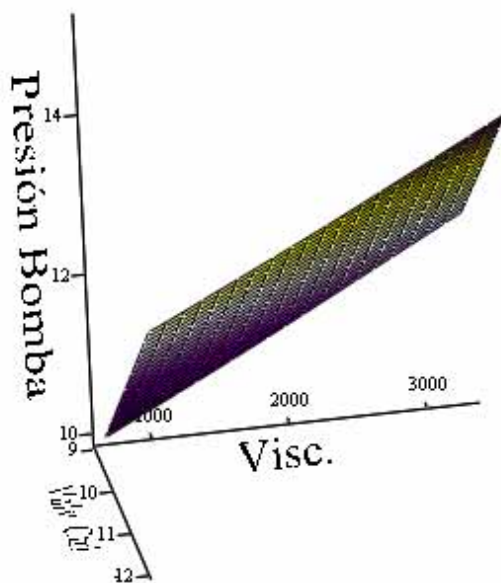


Gráfico 7.7.

Presión total de la bomba (presión de descarga menos la presión de succión) en servicio del grupo de bombas del tanque n.º 10, contra la viscosidad del combustible almacenado en el tanque n.º 10 y el valor de control de la válvula de regulación presión del grupo de bombas del tanque n.º 10.

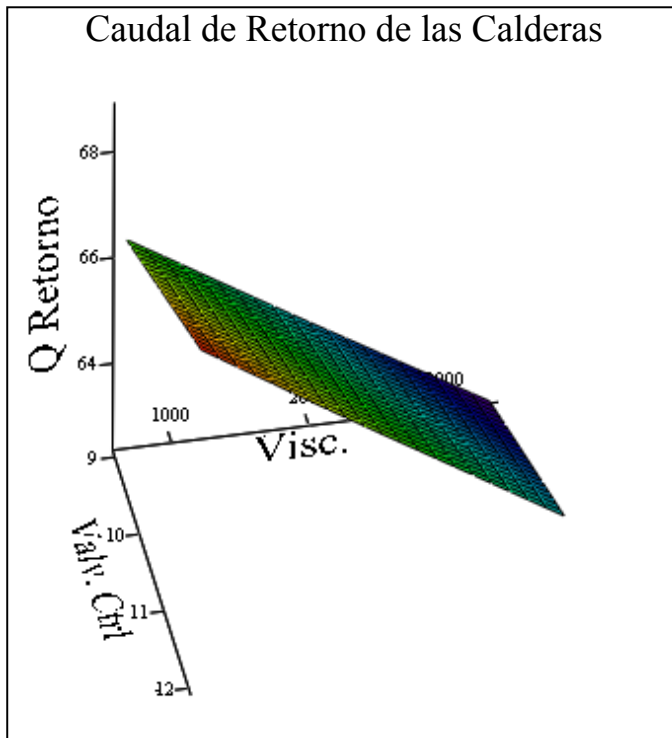


Gráfico 7.8.

Caudal de combustible que retorna (retorno largo) por la acción de la válvula de regulación de presión a la descarga del grupo de bombas de combustible de la caldera, contra la viscosidad del combustible almacenado en el tanque n.º 10 y el valor de control de la válvula de regulación presión del grupo de bombas del tanque n.º 10.

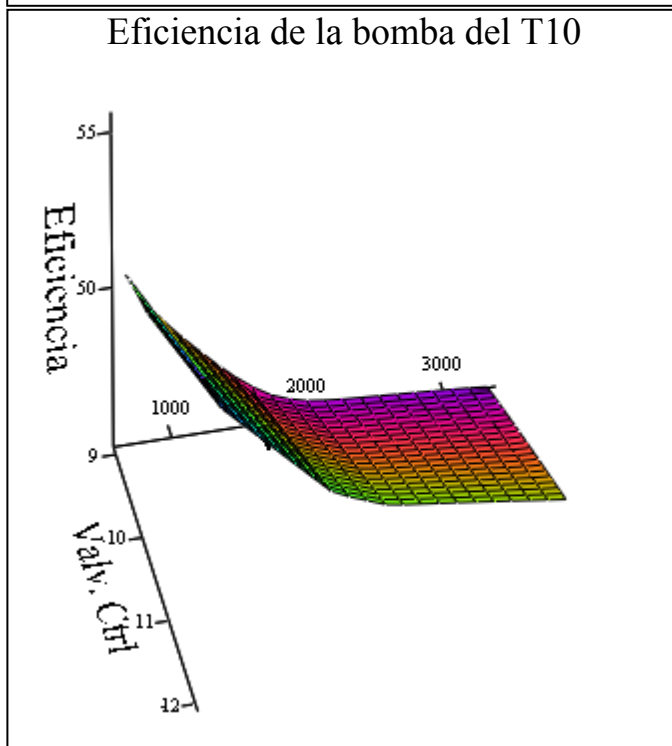


Gráfico 7.9.

Eficiencia de las bombas de combustible del grupo de bombeo del tanque n.º 10, contra la viscosidad del combustible almacenado en el tanque n.º 10 y el valor de control de la válvula de regulación presión del grupo de bombas del tanque n.º 10.

Corriente en el motor de la bomba del T10

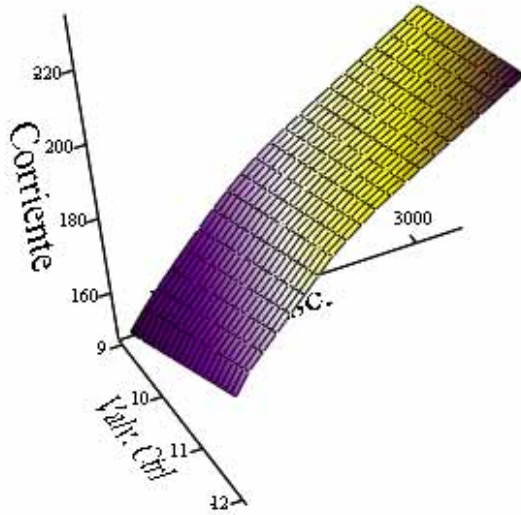


Gráfico 7.10.

Intensidad de corriente que el motor de la bomba del grupo de tanque n.º 10 absorbe de la red de suministro de energía eléctrica, contra la viscosidad del combustible almacenado en el tanque n.º 10 y el valor de control de la válvula de regulación presión del grupo de bombas del tanque n.º 10.

Presión Total en la bomba de la Caldera

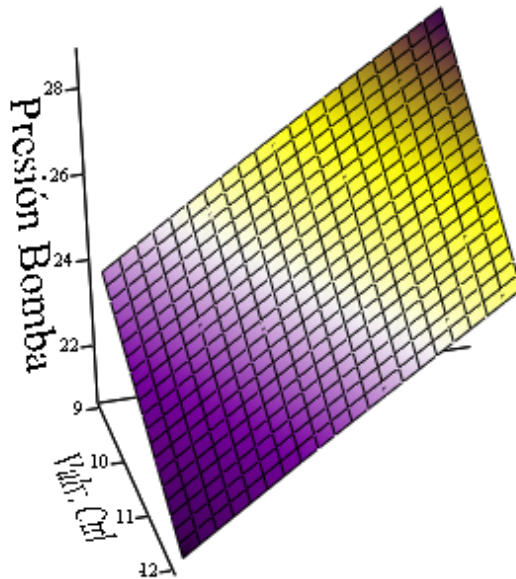


Gráfico 7.11.

Presión total de la bomba (presión de descarga menos la presión de succión) en servicio del grupo de bombas combustible de la caldera, contra la viscosidad del combustible almacenado en el tanque n.º 10 y el valor de control de la válvula de regulación presión del grupo de bombas del tanque n.º 10.

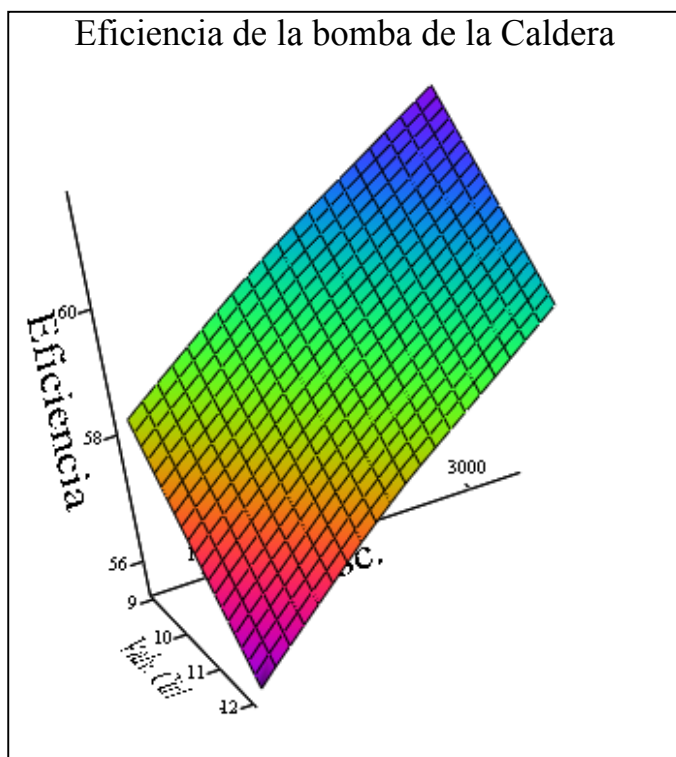


Gráfico 7.12.

Eficiencia de las bombas de combustible del grupo de bombas combustible de alta presión de la caldera, contra la viscosidad del combustible almacenado en el tanque n.º 10 y el valor de control de la válvula de regulación presión del grupo de bombas del tanque n.º 10.

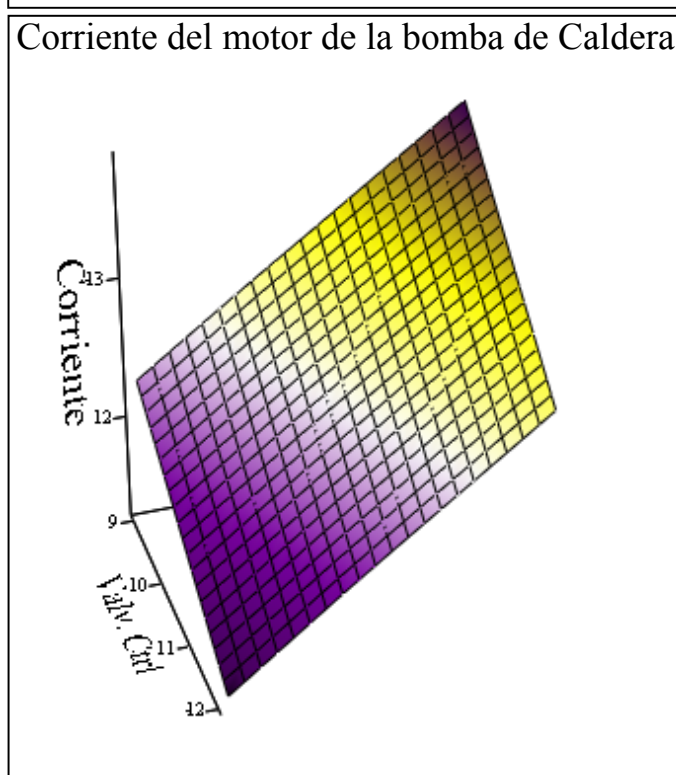


Gráfico 7.13.

Intensidad de corriente que el motor de la bomba del grupo de bombas combustible de alta presión de la caldera absorbe de la red de suministro de energía eléctrica, contra la viscosidad del combustible almacenado en el tanque n.º 10 y el valor de control de la válvula de regulación presión del grupo de bombas del tanque n.º 10.

7.1.3. RESULTADOS DEL TERCER CASO

Tabla 7.5 Resultados del análisis de la red propuesta en el tercer caso.

Cuadro resumen de resultados por el método Hardy-Cross con Newton-Raphson

Tercer caso: Bombeo de combustible de los tanques diarios n.º 4 y 6 a la caldera de las unidades 7, 8 y 9, por medio del sistema de transferencia

Tres bombas del sistema de transferencia en operación, dos bombas de combustible de la caldera en operación por unidad

				Nivel de combustible almacenado en el tanque n.º 6 [msnm]			
				41,79	47,38	52,97	
Temperatura Fueloil n.º 6 [°C]	30	Viscosidad [cSt]	3300	86,28	87,78	89,27	Caudal de retorno n26 [m³/h]
				10,81	10,33	9,85	Presión total de la bomba n26 [bar]
				66,11	66,15	66,18	Caudal de retorno caldera[m³/h]
				57,94	57,15	56,30	Eficiencia de la Bomba n26 [%]
				117,17	113,89	110,61	Corriente en el motor n26 [A]
				24,19	24,15	24,10	Presión total de la bomba caldera [bar]
				58,56	58,53	58,49	Eficiencia de la Bomba caldera [%]
				12,40	12,39	12,38	Corriente en el motor b. caldera[A]
	40		1600	101,09	102,70	104,31	Caudal de retorno n26 [m³/h]
				6,38	5,87	5,36	Presión total de la bomba n26 [bar]
				65,36	65,38	65,40	Caudal de retorno caldera[m³/h]
				47,53	45,70	43,69	Eficiencia de la Bomba n26 [%]
				87,00	83,51	80,02	Corriente en el motor n26 [A]
				25,14	25,11	25,09	Presión total de la bomba caldera [bar]
				59,29	59,27	59,26	Eficiencia de la Bomba caldera [%]
				12,70	12,70	12,69	Corriente en el motor b. caldera[A]
	50		650	110,36	112,04	113,72	Caudal de retorno n26 [m³/h]
				3,64	3,10	2,57	Presión total de la bomba n26 [bar]
				64,80	64,81	64,82	Caudal de retorno caldera[m³/h]
				35,16	31,82	28,04	Eficiencia de la Bomba n26 [%]
				68,30	64,68	61,06	Corriente en el motor n26 [A]
				25,84	25,83	25,83	Presión total de la bomba caldera [bar]
				59,81	59,80	59,80	Eficiencia de la Bomba caldera [%]
				12,93	12,93	12,92	Corriente en el motor b. caldera[A]

7.1.3.1. GRÁFICOS DEL TERCER CASO

Caudal de retorno en reguladora del n26

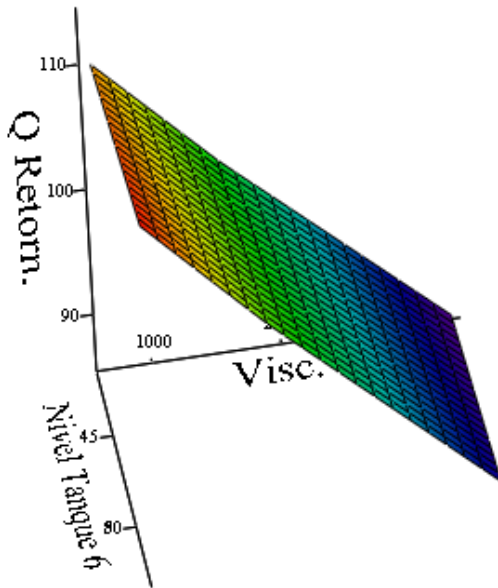


Gráfico 7.14.

Caudal de combustible que retorna (retorno corto) por la acción de la válvula de regulación de presión a la descarga del grupo de bombas del sistema de transferencia (nivel 26), contra la viscosidad del combustible almacenado en el tanque n.º 6, y el nivel de combustible almacenado en el tanque n.º 6.

Presión Total de la bomba del n26

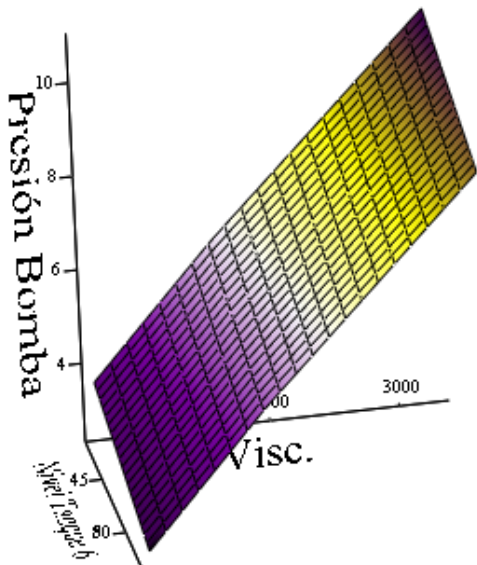


Gráfico 7.15.

Presión total de la bomba (presión de descarga menos la presión de succión) en servicio del grupo de bombas del sistema de transferencia (nivel 26), contra la viscosidad y el nivel de combustible almacenado en el tanque n.º 6.

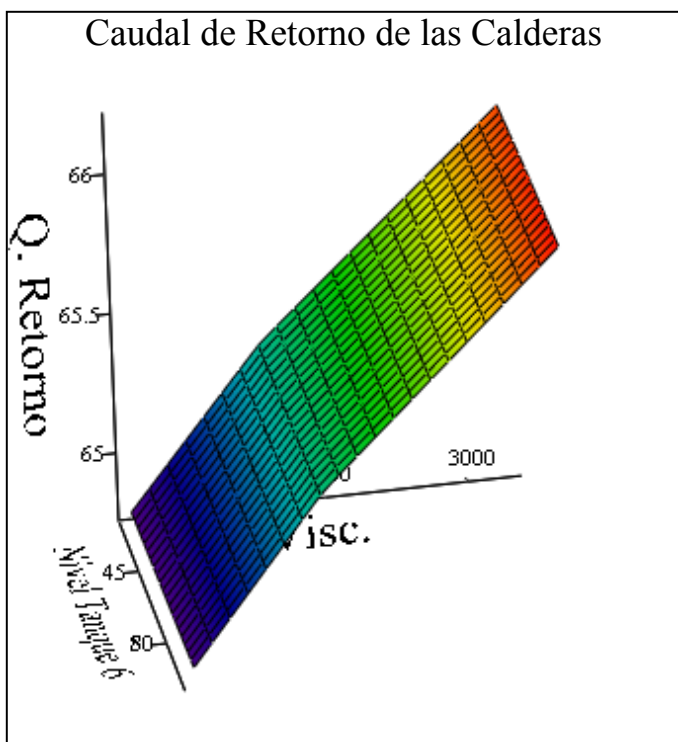


Gráfico 7.16.

Caudal de combustible que retorna (retorno largo) por la acción de la válvula de regulación de presión a la descarga del grupo de bombas de combustible de la caldera mas el caudal que retorna por el bypass de arranque (retorno que va al anillo de calentamiento en frente a planta Tocoa), contra la viscosidad y el nivel de combustible almacenado en el tanque n.º 6

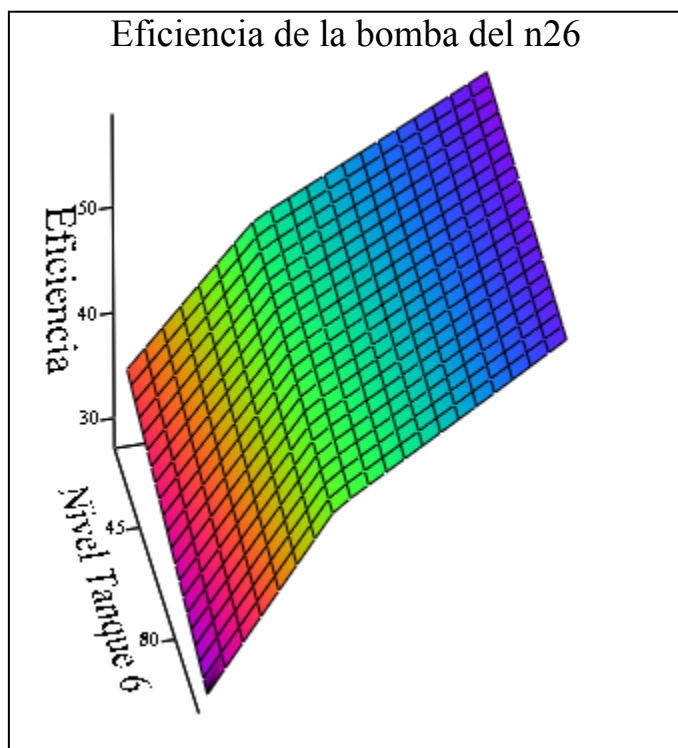


Gráfico 7.17.

Eficiencia de las bombas de combustible del grupo del grupo de bombas del sistema de transferencia (nivel 26), contra la viscosidad y el nivel de combustible almacenado en el tanque n.º 6.

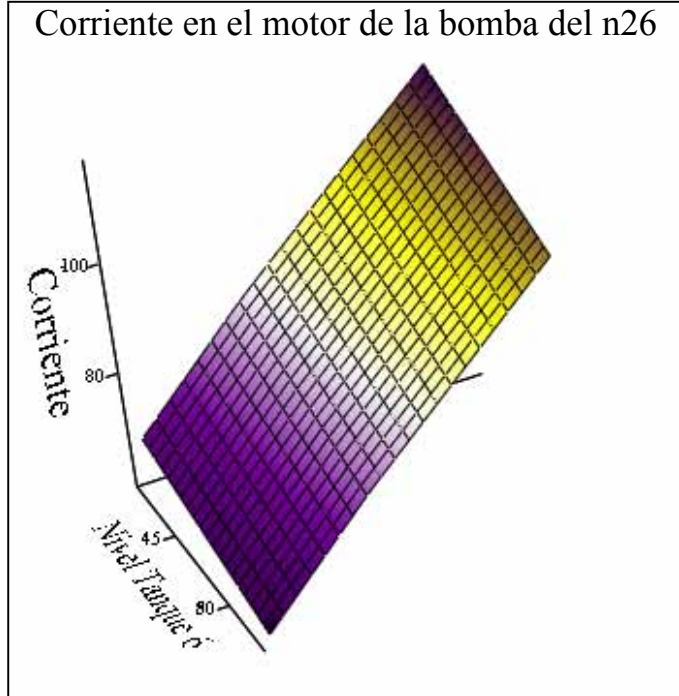


Gráfico 7.18.

Intensidad de corriente que el motor de la bomba del grupo sistema de transferencia (nivel 26) absorbe de la red de suministro de energía eléctrica, contra la viscosidad y el nivel de combustible almacenado en el tanque n.º 6.

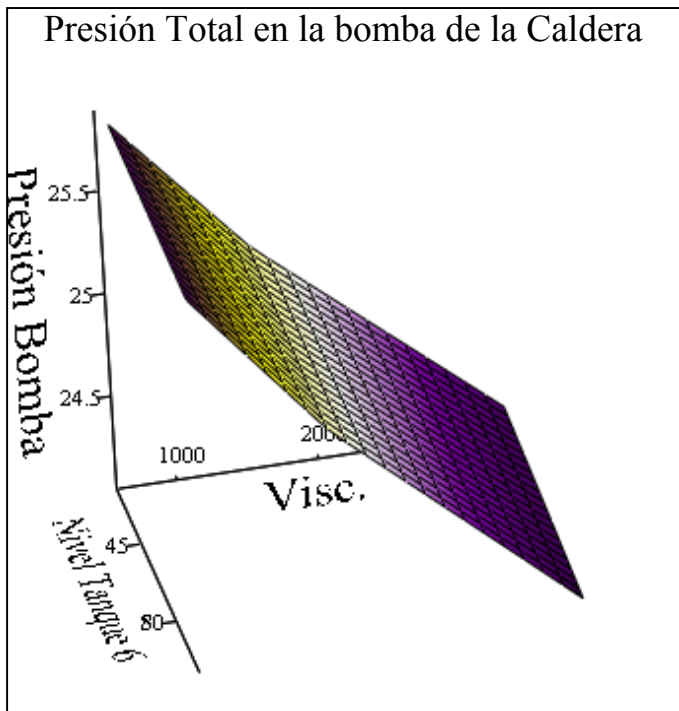


Gráfico 7.19.

Presión total de la bomba (presión de descarga menos la presión de succión) en servicio del grupo de bombas combustible de la caldera, contra la viscosidad y el nivel de combustible almacenado en el tanque n.º 6.

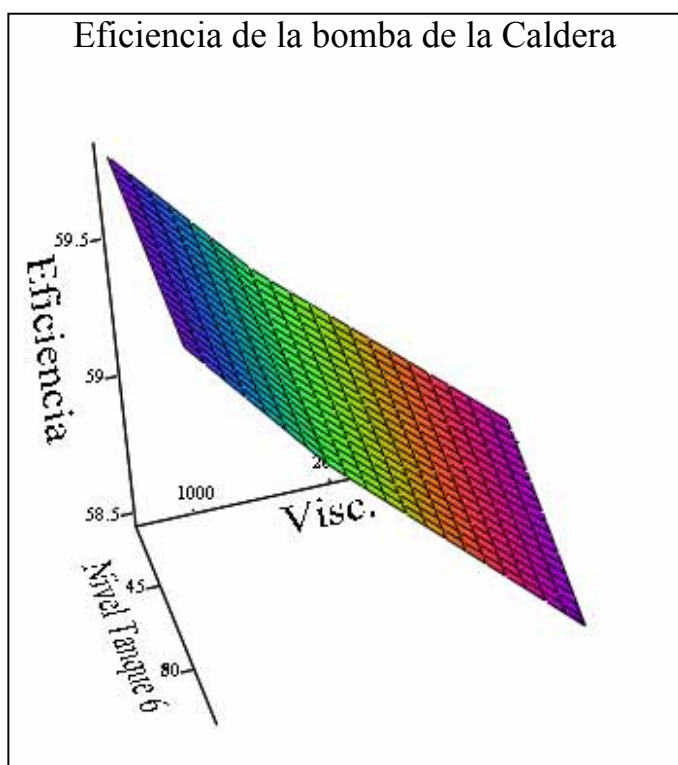


Gráfico 7.20.

Eficiencia de las bombas de combustible del grupo de bombas combustible de alta presión de la caldera, contra la viscosidad y el nivel de combustible almacenado en el tanque n.º 6.

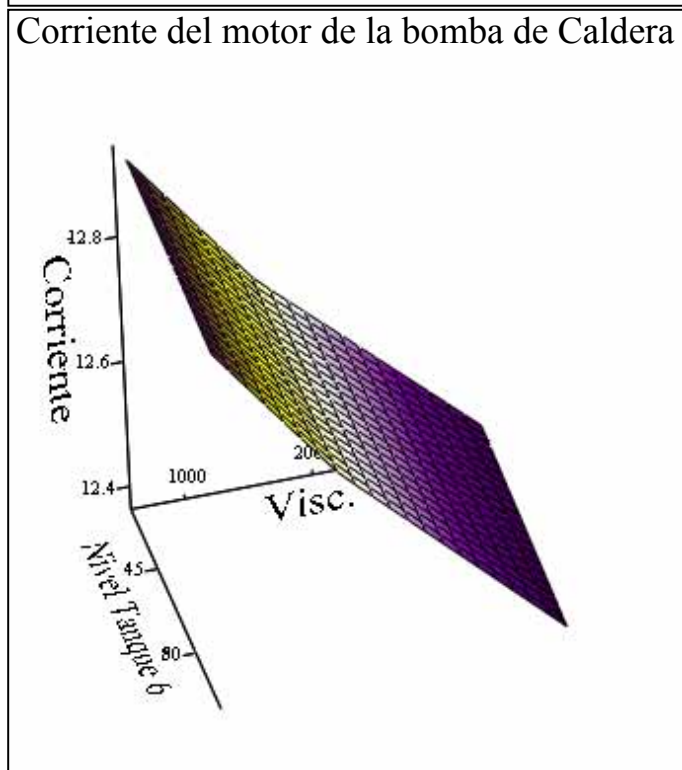


Gráfico 7.21.

Intensidad de corriente que el motor de la bomba del grupo de bombas combustible de alta presión de la caldera absorbe de la red de suministro de energía eléctrica, contra la viscosidad y el nivel de combustible almacenado en el tanque n.º 6.

7.1.4. RESULTADOS DEL CUARTO CASO

Tabla 7.6 Resultados del análisis de la red propuesta en el cuarto caso.

Cuadro resumen de resultados por el método Genérico de Hardy-Cross

Cuarto caso: Suministro de combustible desde el tanque n.º 7 a la caldera de la unidad 7, por medio del sistema de gravedad

Dos bombas de combustible de la caldera en operación en la unidad 7.

				Nivel de combustible almacenado en el tanque n.º 7 [msnm]			
				26,13 (min)	31,695	37,26 (máx)	
Temperatura Fueloil n.º 6 [°C]	60	Viscosidad [cSt]	280	21,18	21,32	21,46	Caudal de retorno - anillo [m³/h]
				11,86	11,86	11,86	Caudal de retorno - bypass [m³/h]
				28,96	28,42	27,88	Presión total de la bomba [bar]
				61,84	61,51	61,18	Eficiencia de la Bomba [%]
				13,92	13,75	13,57	Corriente en el motor [A]
	50		650	20,91	21,05	21,19	Caudal de retorno - anillo [m³/h]
				11,86	11,86	11,86	Caudal de retorno - bypass [m³/h]
				29,99	29,45	28,91	Presión total de la bomba [bar]
				62,42	62,12	61,8	Eficiencia de la Bomba [%]
				14,24	14,07	13,9	Corriente en el motor [A]
	45		780	20,81	20,96	21,1	Caudal de retorno - anillo [m³/h]
				11,86	11,86	11,86	Caudal de retorno - bypass [m³/h]
				30,34	29,8	29,26	Presión total de la bomba [bar]
				62,62	62,32	62,01	Eficiencia de la Bomba [%]
				14,35	14,18	14,01	Corriente en el motor [A]
	40		1600	20,22	20,36	20,5	Caudal de retorno - anillo [m³/h]
				11,86	11,86	11,86	Caudal de retorno - bypass [m³/h]
				32,59	32,05	31,51	Presión total de la bomba [bar]
				63,75	63,5	63,23	Eficiencia de la Bomba [%]
				15,06	14,89	14,72	Corriente en el motor [A]

7.1.4.1. GRÁFICOS DEL CUARTO CASO

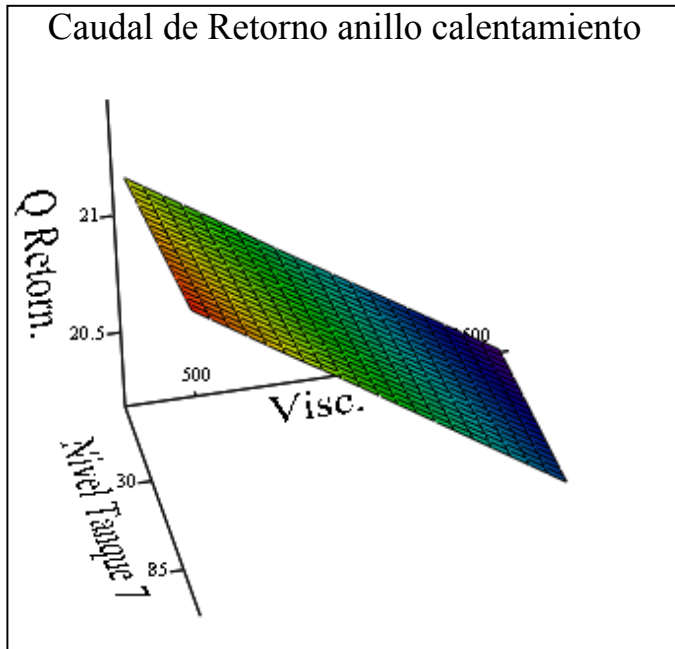


Gráfico 7.22.

Caudal de combustible “caliente” que retorna por la acción de la válvula de regulación de presión y del bypass de arranque y se mezcla con el combustible mas frio que proviene del tanque n.º 7 en el anillo de calentamiento frente a planta Tocoa, contra la viscosidad del combustible a la succión de las bombas de combustible de la caldera, y el nivel de combustible almacenado en el tanque n.º 7.

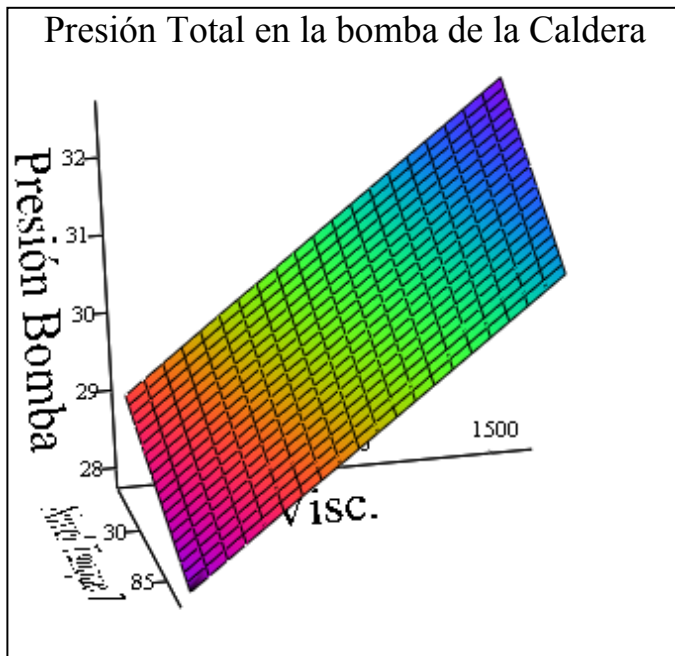


Gráfico 7.23.

Presión total de la bomba (presión de descarga menos la presión de succión) en servicio del grupo de bombas combustible de la caldera, contra la viscosidad del combustible a la succión de las bombas de combustible de la caldera, y el nivel de combustible almacenado en el tanque n.º 7.

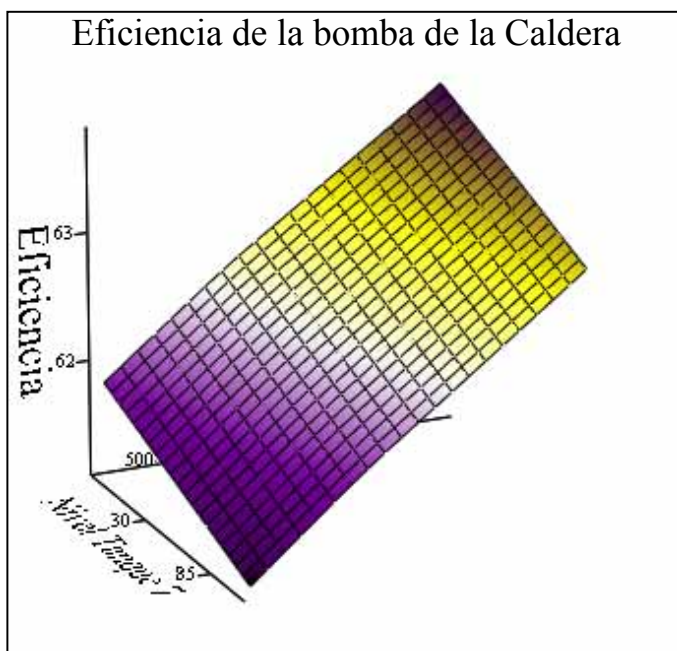


Gráfico 7.24.

Eficiencia de las bombas de combustible del grupo de bombas combustible de alta presión de la caldera, contra la viscosidad del combustible a la succión de las bombas de combustible de la caldera, y el nivel de combustible almacenado en el tanque n.º 7.

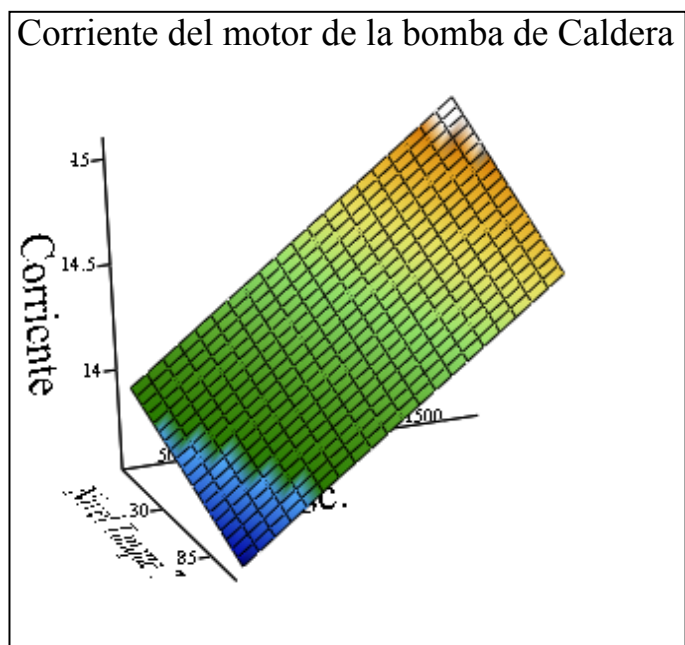


Gráfico 7.25.

Intensidad de corriente que el motor de la bomba del grupo de bombas combustible de alta presión de la caldera absorbe de la red de suministro de energía eléctrica, contra la viscosidad del combustible a la succión de las bombas de combustible de la caldera, y el nivel de combustible almacenado en el tanque n.º 7.

7.1.5. PÉRDIDAS Y LONGITUDES EQUIVALENTES DE TUBERÍAS

Como ya se indico las pérdidas de energía en las tuberías están principalmente a asociadas al roce producto de la fricción del fluido con las paredes de la tubería, el paso del fluido por los accesorios (cambios de dirección, estrechamientos, ensanchamientos, etc.) también produce pérdidas de energía, por lo que se necesita calcular ambas pérdidas.

Para el caso de las pérdidas en tramos de tubería “recta” se realiza el cálculo con la ecuación de Darcy-Weisbach, pero para calcular las pérdidas en los accesorios utilizamos los datos experimentales hallados para estas pérdidas con agua como fluido de ensayo, esto es debido a que carecemos de resultados de pérdidas y ensayos para fluidos viscosos. Es por ello que tomamos la pérdida en el accesorio como la resistencia que ofrece en su equivalente de tubería recta.

Luego se suman las dos longitudes, la sumatoria total de la longitud de los tramos de tubería recta, con la sumatoria de la longitud equivalente en tubería recta que ofrecen los accesorios, con ello obtenemos un valor de total de longitud de tubería equivalente. Esto nos permite calcular la pérdida que hay en la tubería incluyendo los accesorios.

A continuación mostramos los resultados de longitud de tubería equivalente total, para los tramos de tubería que componen el sistema de combustible, según el caso propuesto de estudio y su utilidad a la hora de simplificar el cálculo de la red propuesta por el método de Hardy-Cross con Newton-Raphson.

Para un mejor entendimiento hay un desglose del cálculo realizado para hallar las longitudes equivalentes se encuentra en la memoria de cálculo (capítulo 5.2) de este informe.

Tabla 7.7 Resumen de la memoria de calculo de las longitudes equivalentes de las tuberías por caso propuestos de calculo
Primer caso: Trasegado de combustible del tanque n.º 10 a los tanques de almacenamiento diario

Nombre de la línea	FU-277-20"	FU-278-20"	FU-279-20"	FU-276-30"	FU-272-16"	FU-273-16"	FU-274-16"	FU-275-16"
Longitud de tubería recta [m]	37,8	43,9	52,3	19,8	6,0	2,2	2,2	6,0
Perdidas en accesorios [m]	92,9	99,6	99,6	101,0	83,1	37,3	37,3	83,1
Longitud total equiv. [m]	130,7	143,5	151,9	120,8	89,0	39,6	39,6	89,0

Nombre de la línea	FU-268-16"	FU-269-16"	FU-270-16"	FU-271-16"	FU-264-10"	FU-265-10"	FU-266-10"	FU-267-10"
Longitud de tubería recta [m]	2,9	2,3	2,3	2,9	4,3	4,3	4,3	4,3
Perdidas en accesorios [m]	1,7	1,7	1,7	1,7	58,2	58,2	58,2	58,2
Longitud total equiv. [m]	4,6	4,0	4,0	4,6	62,5	62,5	62,5	62,5
	93,6	43,5						

Nombre de la línea	FU-259-12"	FU-260-12"	FU-261-12"	FU-262-12"	FU-263-8"	FU-258-20"	FU-256-16"	FU-252-16"	FU-201-16"
Longitud de tubería recta [m]	5,6	5,6	5,6	5,6	8,4	23,7	13,4	187,3	515,3
Perdidas en accesorios [m]	66,6	66,6	66,6	66,6	193,8	43,6	70,9	206,5	427,5
Longitud total equiv. [m]	72,2	72,2	72,2	72,2	202,2	67,3	84,3	393,8	942,8
									1420,9

				Tanque n.º 4	Tanque n.º 6	Tanque n.º 7
Nombre de la línea	FU-257-16"	FU-253-16"	FU-200-16"	FU-215-10"	FU-215-10"	FU-215-10"
Longitud de tubería recta [m]	37,9	188,6	515,7	207,3	127,2	71,7
Perdidas en accesorios [m]	70,9	228,6	461,0	173,6	152,7	124,2
Longitud total equiv. [m]	108,8	417,2	976,7	380,8	279,9	195,9
			1502,7			

Tabla 7.8 Resumen de la memoria de calculo de las longitudes equivalentes de las tuberías por caso propuestos de calculo
Segundo caso: Bombeo de combustible del Tanque n.º 10 a las calderas de las unidades 7, 8 y 9.

Nombre de la línea	FU-277-20"	FU-278-20"	FU-279-20"	FU-276-30"	FU-272-16"	FU-273-16"	FU-274-16"	FU-275-16"	FU-268-16"	FU-269-16"
Longitud de tubería recta [m]	37,8	43,9	52,3	19,8	6,0	2,2	2,2	6,0	2,9	2,3
Perdidas en accesorios [m]	92,9	99,6	99,6	101,0	83,1	37,3	37,3	83,1	1,7	1,7
Longitud total equiv. [m]	130,7	143,5	151,9	120,8	89,0	39,6	39,6	89,0	4,6	4,0

Nombre de la línea	FU-270-16"	FU-271-16"	FU-264-10"	FU-265-10"	FU-266-10"	FU-267-10"	FU-259-12"	FU-260-12"	FU-261-12"	FU-262-12"
Longitud de tubería recta [m]	2,3	2,9	4,3	4,3	4,3	4,3	5,6	5,6	5,6	5,6
Perdidas en accesorios [m]	1,7	1,7	58,2	58,2	58,2	58,2	66,6	66,6	66,6	66,6
Longitud total equiv. [m]	4,0	4,6	62,5	62,5	62,5	62,5	72,2	72,2	72,2	72,2

Nombre de la línea	FU-263-8"	FU-258-20"	FU-257-16"	FU-253-16"	FU-200-16"	FU-256-16"	FU-252-16"	FU-201-16"	FU-201-16"	FU-316-16"
Longitud de tubería recta [m]	8,4	23,7	37,9	188,6	561,4	13,4	187,3	560,4	106,1	10,0
Perdidas en accesorios [m]	193,8	43,6	70,9	228,6	483,9	70,9	206,5	483,9	125,7	62,9
Longitud total equiv. [m]	202,2	67,3	108,8	417,2	1045,3	84,3	393,8	1044,3	231,8	72,9
					1571,3			1522,4		304,8

Nombre de la línea	FU-319-16"	FU-201-16"	7FU113-8"	FU01-10"	FU06-10"	FU10-8"	FU11-8"	FU13-6"	FU14-6"	FU33-8"
Longitud de tubería recta [m]	8,8	448,2	12,88	3,7	14,6	8,1	8,1	10,6	10,6	10,9
Perdidas en accesorios [m]	86,6	464,8	51,27	30,0	60,6	26,9	26,9	50,5	50,5	41,5
Longitud total equiv. [m]	95,3	913,0	64,2	33,8	75,1	35,1	35,1	61,1	61,1	52,5
		1008,3								

Nombre de la línea	FU34-8"	FU38-8"	FU39-8"	FU40-8"	FU42-8"	FU46-8"	FU47-8"	FU51-8"	FU55-8"	FU56-4"
Longitud de tubería recta [m]	9,7	9,8	21,4	2,2	4,1	3,6	40,5	5,8	3,6	1,2
Perdidas en accesorios [m]	31,0	36,1	45,8	38,1	38,1	9,7	165,4	162,4	28,4	0,0
Longitud Total EQ [m]	40,7	45,9	67,2	40,3	42,2	13,3	206,0	168,1	32,0	1,2
				153,4			261,5			

Conexión puente tuberías									
Retomo					Entre U/7 y U/8		Entre U/8 y U/9		
					FU-201-16"	FU-254-10"	FU-201-16"	FU-254-10"	FU-254-10"
Nombre de la línea	FU57-8"	FU58-6"	FU-254-10"	FU118-8"	FU36-8"	FU-201-16"	FU-254-10"	FU-201-16"	FU-254-10"
Longitud de tubería recta [m]	4,2	75,2	1345,9	6,47	3,8	80,8	87,5	82,2	87,1
Perdidas en accesorios [m]	36,5	65,9	968,2	26,95	102,0	71,6	74,8	71,6	74,8
Longitud Total EQ [m]	40,7	141,2	2314,0	33,4	105,8	152,5	162,3	153,9	161,9

Tabla 7.9 Resumen de la memoria de calculo de las longitudes equivalentes de las tuberías por caso propuestos de calculo
Tercer caso: Bombeo de combustible de los tanques diarios (n.º 4 y 6) a las unidades 7, 8 y 9, por medio del sistema de transferencia

			Conexión Retorno	Conexión Tanques	Descarga Tanque n.º. 6				
Nombre de la línea	FU-07A-16"	FU-07B-16"	FU-109-16"	FU-109-16"	FU-109-16"	FU-08A-16"	FU-09A-12"	FU-09B-12"	FU-09C-12"
Longitud de tubería recta [m]	5,4	7,5	28,7	90,3	171,9	14,4	3,4	3,4	3,4
Perdidas en accesorios [m]	74,8	63,4	41,9	48,8	243,1	64,0	22,3	22,3	22,3
Longitud total equiv. [m]	80,3	70,9	70,7	139,1	415,0	78,4	25,7	25,7	25,7

Nombre de la línea	FU-09D-12"	FU-13A-12"	FU-13B-12"	FU-13C-12"	FU-13D-12"	FU-110A-10"	FU-110B-10"	FU-110C-10"	FU-110D-10"
Longitud de tubería recta [m]	3,4	1,9	1,9	1,9	1,9	3,7	3,7	3,7	3,7
Perdidas en accesorios [m]	22,3	10,8	10,8	10,8	10,8	41,8	41,8	41,8	41,8
Longitud total equiv. [m]	25,7	12,7	12,7	12,7	12,7	45,5	45,5	45,5	45,5

			Entrada Calent. 1	Entrada Calent. 2	Salida Calent. 1	Salida Calent. 2			
Nombre de la línea	FU-111-16"	FU-112A-14"	FU-112B-14"	FU-113A-14"	FU-113B-14"	FU-11-16"	Retorno valv.-tanque	Retorno unidad-valv.	
Longitud de tubería recta [m]	21,1	1,3	1,3	1,3	1,3	460,1	FU-12-10"	FU-12-10"	FU-12A-8"
Perdidas en accesorios [m]	99,1	15,1	15,1	15,1	15,1	435,1	297,8	296,2	119,2
Longitud total equiv. [m]	120,2	16,4	16,4	16,4	16,4	895,3	608,7	762,8	126,5

		Conexión puente tuberías							
		Entre U/7 y U/8		Entre U/8 y U/9					
Nombre de la línea	7FU114-8"	7FU117-8"	FU-11-16"	FU-12-10"	FU-11-16"	FU-12-10"	FU01-10"	FU06-10"	FU10-8"
Longitud de tubería recta [m]	13,44	15,09	80,8	80,8	87,5	87,7	3,7	14,6	8,1
Perdidas en accesorios [m]	54,52	59,60	71,6	47,8	117,3	47,8	30,0	60,6	26,9
Longitud total equiv. [m]	68,0	74,7	152,5	128,7	204,9	135,6	33,8	75,1	35,1

Nombre de la línea	FU11-8"	FU13-6"	FU14-6"	FU33-8"	FU34-8"	FU36-8"	FU38-8"	FU39-8"	FU40-8"
Longitud de tubería recta [m]	8,1	10,6	10,6	10,9	9,7	3,8	9,8	21,4	2,2
Perdidas en accesorios [m]	26,9	50,5	50,5	41,5	31,0	102,0	36,1	45,8	38,1
Longitud total equiv. [m]	35,1	61,1	61,1	52,5	40,7	105,8	45,9	67,2	40,3

Nombre de la línea	FU42-8"	FU46-8"	FU47-8"	FU51-8"	FU55-8"	FU56-4"	FU57-8"	FU58-6"
Longitud de tubería recta [m]	4,1	3,6	40,5	5,8	3,6	1,2	4,2	75,2
Perdidas en accesorios [m]	38,1	9,7	165,4	162,4	28,4	0,0	36,5	65,9
Longitud total equiv. [m]	42,2	13,3	206,0	168,1	32,0	1,2	40,7	141,2

Tabla 7.10 Resumen de la memoria de calculo de las longitudes equivalentes de las tuberías por caso propuestos de calculo
Cuarto caso: Suministro de combustible desde el tanque n.º 7 a la caldera de la unidad 7, por medio del sistema de gravedad

	Enlace retorno		Desde el tanque					
Nombre de la línea	FU-254-10"	FU-Gravedad 10"	FU-Gravedad 16"	FU-Gravedad 16"	7FU113-8"	FU01-10"	FU06-10"	FU10-8"
Longitud de tubería recta [m]	17,8	229,4	235,8	548,8	12,88	3,7	14,6	8,1
Perdidas en accesorios [m]	38,2	146,1	260,6	157,9	51,27	30,0	60,6	26,9
Longitud total equiv. [m]	56,0	375,5	496,5	706,6	64,2	33,8	75,1	35,1

Nombre de la línea	FU11-8"	FU13-6"	FU14-6"	FU33-8"	FU34-8"	FU38-8"	FU39-8"	FU40-8"
Longitud de tubería recta [m]	8,1	10,6	10,6	10,9	9,7	9,8	21,4	2,2
Perdidas en accesorios [m]	26,9	50,5	50,5	41,5	31,0	36,1	45,8	38,1
Longitud total equiv. [m]	35,1	61,1	61,1	52,5	40,7	45,9	67,2	40,3
								153,4

Nombre de la línea	FU42-8"	FU46-8"	FU47-8"	FU51-8"	FU55-8"	FU56-4"	FU57-8"	FU58-6"
Longitud de tubería recta [m]	4,1	3,6	40,5	5,8	3,6	1,2	4,2	75,2
Perdidas en accesorios [m]	38,1	9,7	165,4	162,4	28,4	0,0	36,5	65,9
Longitud total equiv. [m]	42,2	13,3	206,0	168,1	32,0	1,2	40,7	141,2
			261,5					

Nombre de la línea	FU52-1.5"	FU53-4"	FU84-5"	FU87-5"	FU118-8"	FU36-8"
Longitud de tubería recta [m]	1,4	6,3	47,4	8,7	6,47	3,8
Perdidas en accesorios [m]	22,7	16,3	61,5	46,6	26,95	102,0
Longitud total equiv. [m]	24,1	22,6	108,9	55,3	33,4	105,8

	Conexión puente tuberías			
	Entre U/7 y U/8		Entre U/8 y U/9	
Nombre de la línea	FU-201-16"	FU-254-10"	FU-201-16"	FU-254-10"
Longitud de tubería recta [m]	80,8	87,5	82,2	87,1
Perdidas en accesorios [m]	71,6	74,8	71,6	74,8
Longitud total equiv. [m]	152,5	162,3	153,9	161,9

7.2. RESULTADOS CON BASE EN LA DATA DEL DCS

A partir de la data proporcionada por el DCS, y con ayuda de ecuaciones básicas obtenemos valores que igualmente representan el funcionamiento del sistema, estos nos proporciona valores con lo que comparar los resultados obtenidos mediante la representación esquemática y posterior calculo por el método de Hardy-Cross,

Se calculan diferencias de altura en tanques, volúmenes de combustible movilizado o bombeado, tiempo de operación, volumen por tiempo de operación, altura de llenado del tanque por hora o rata de llenado del tanque que recibe el combustible trasegado, flujo por bomba, potencia hidráulica, potencia mecánica, eficiencia de la bomba, potencia útil en la bomba.

Tabla 7.11 Resultados de los cálculos elaborados a partir de la data del Sistema de Control Distribuido (DCS) de la Planta Ampliación Tacoa del Complejo Generador Josefa Joaquina Sánchez Bastidas (Primer caso)

Fecha	Hora inicio	Hora finalización	Dif Altura Tanque 10 [m]	Volumen [m ³]	N.º bombas	Corriente prom. [Amperes]	Tanque de llegada	Dif Altura Tanque llegada [m]	Volumen [m ³]	Diferencia de Volumen [m ³]	Presión descga. [kgf/cm ²]	Tiempo operación [horas]	Volumen operación p/hora [m ³ /h]	Altura/ hora [m/h]	Flujo por bomba [m ³ /h]	Potencia hidráulica [kW]	Potencia mecánica [kW]	Eficiencia bomba [%]	Potencia Útil [kW]	Temp. Tanque 10 [°C]
01/11/2008	10:00 a.m.	12:00 p.m.	0,90	1075,1	3	169,45	4	1,93	886,3	188,8	12,14	2	537,6	1,17	179,2	58,9	116,1	0,55	106,8	53,7
02/11/2008	10:00 a.m.	12:00 p.m.	0,96	1149,8	3	167,97	7	2,14	890,8	259,0	12,06	2	574,9	1,38	191,6	62,6	115,1	0,59	105,9	52,9
03/11/2008	11:00 a.m.	02:00 p.m.	1,46	1739,6	3	171,56	4	3,33	1532,7	207,0	12,43	3	579,9	1,26	193,3	65,1	117,6	0,60	108,2	52,5
04/11/2008	10:00 a.m.	12:00 p.m.	0,90	1075,1	3	169,69	4	1,91	878,1	197,0	11,91	2	537,6	1,17	179,2	57,8	116,3	0,54	107,0	51,3
05/11/2008	06:00 p.m.	08:00 p.m.	0,85	1015,4	3	183,67	4	1,88	866,7	148,7	14,18	2	507,7	1,10	169,2	65,0	125,9	0,56	115,8	44,5
06/11/2008	10:00 a.m.	01:00 p.m.	0,91	1090,1	2	179,84	4	1,57	723,1	367,0	12,89	3	363,4	0,79	181,7	63,5	123,2	0,56	113,4	43,9
07/11/2008	09:00 a.m.	01:00 p.m.	1,21	1448,4	2	182,11	4	1,86	853,7	594,8	12,66	4	362,1	0,79	181,1	62,1	124,8	0,54	114,8	43,7
09/11/2008	11:00 a.m.	12:00 p.m.	0,30	358,4	2	169,69	7	0,77	321,6	36,8	11,96	1	358,4	0,86	179,2	58,1	116,3	0,54	107,0	42,7
11/11/2008	10:00 a.m.	11:00 a.m.	0,30	358,4	2	172,89	7	0,74	309,2	49,1	12,86	1	358,4	0,86	179,2	62,5	118,5	0,57	109,0	42,1
15/11/2008	10:00 a.m.	11:00 a.m.	0,31	365,8	2	189,84	4	0,68	313,4	52,5	11,21	1	365,8	0,79	182,9	55,6	130,1	0,46	119,7	40,5
16/11/2008	07:00 p.m.	09:00 p.m.	0,92	1097,5	3	188,28	4 y 7	0,98	432,7	664,8	10,53	2	548,8	1,19	182,9	52,2	129,0	0,44	118,7	40,1
18/11/2008	06:00 p.m.	09:00 p.m.	1,31	1567,9	3	203,36	4	3,32	1526,1	41,8	8,95	3	522,6	1,14	174,2	42,3	139,3	0,33	128,2	39,3
19/11/2008	09:00 a.m.	12:00 p.m.	1,38	1642,6	3	178,36	7	3,27	1358,5	284,0	8,88	3	547,5	1,32	182,5	43,9	122,2	0,39	112,4	39,1
21/11/2008	09:00 a.m.	04:00 p.m.	2,06	2463,8	2	198,83	4 y 7	2,49	1038,5	1425,3	8,88	7	352,0	0,76	176,0	42,3	136,2	0,34	125,3	38,3
22/11/2008	05:00 p.m.	07:00 p.m.	0,60	716,8	2	162,58	7	1,67	695,4	21,3	9,63	2	358,4	0,86	179,2	46,7	111,4	0,46	102,5	47,5
23/11/2008	09:00 a.m.	10:00 a.m.	0,30	358,4	2	170,63	6	0,67	306,3	52,0	9,03	1	358,4	0,78	179,2	43,8	116,9	0,41	107,6	46,5
24/11/2008	10:00 a.m.	01:00 p.m.	0,86	1022,9	2	180,78	6	1,80	826,6	196,3	9,78	3	341,0	0,74	170,5	45,2	123,9	0,40	114,0	46,0
27/11/2008	06:00 p.m.	09:00 p.m.	1,27	1515,6	3	164,45	7	2,88	1198,5	317,1	10,98	3	505,2	1,22	168,4	50,1	112,7	0,48	103,7	46,8
28/11/2008	09:00 a.m.	11:00 a.m.	0,90	1075,1	3	177,03	4	1,81	832,4	242,7	10,08	2	537,6	1,17	179,2	48,9	121,3	0,44	111,6	46,2
29/11/2008	08:00 a.m.	10:00 a.m.	0,89	1067,7	3	183,98	4	2,30	1059,3	8,3	10,38	2	533,8	1,16	177,9	50,0	126,1	0,43	116,0	45,8
01/12/2008	10:00 a.m.	12:00 p.m.	0,65	776,5	2	179,84	4	1,66	762,3	14,2	9,99	2	388,2	0,84	194,1	52,6	123,2	0,46	113,4	45,0
03/12/2008	05:00 p.m.	07:00 p.m.	0,86	1022,9	3	180,94	4	1,88	866,7	156,2	11,63	2	511,4	1,11	170,5	53,7	124,0	0,47	114,1	44,4
04/12/2008	08:00 p.m.	09:00 p.m.	0,45	537,6	3	186,02	4	0,92	424,4	113,2	11,56	1	537,6	1,17	179,2	56,1	127,5	0,48	117,3	43,2
08/12/2008	06:00 p.m.	08:00 p.m.	0,96	1142,3	3	161,48	7	2,20	913,9	228,4	10,66	2	571,2	1,37	190,4	55,0	110,6	0,54	101,8	49,9
11/12/2008	10:00 a.m.	12:00 p.m.	0,81	970,6	3	172,58	4	1,91	878,1	92,5	9,83	2	485,3	1,05	161,8	43,1	118,3	0,40	108,8	48,1

7.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para el primer caso:

Se observa que el caudal de retorno disminuye con el aumento de temperatura del fueloil (disminuye la viscosidad), y disminuye también con el aumento del valor del punto de trabajo o *set point* de la válvula reguladora ubicada entre la descarga y la succión de las bombas del tanque 10.

La presión de la bomba aumenta linealmente con el aumento en la viscosidad (disminución de la temperatura) y aumenta ligeramente con respecto al aumento en el valor del *set point* de la válvula reguladora.

La rata de llenado de los tanques diarios 4 y 7 aumenta con la disminución de la viscosidad, así como también aumenta cuando el valor del *set point* de la válvula reguladora crece.

Se advierte que la eficiencia de la bomba aumenta con el aumento de la temperatura del fluido para el caso de las bombas del tanque 10, esto para el caso de una sola bomba en operación. Para el caso de dos o más bombas en operación varia la eficiencia tendiendo a disminuir pero se mantiene en un rango similar.

Y como era de esperarse la corriente en el motor de la bomba aumenta con el aumento en la viscosidad y también aumenta ligeramente con la elevación del *set point* de la válvula reguladora.

Todo esto tiene su razón en que con el aumento de temperatura la viscosidad disminuye y mejoran las condiciones de trabajo para la bomba, resulta energéticamente más económico bombear un fluido a menor viscosidad con este tipo de bombas, ya que requiere menos energía para bombearlo. Solo que siendo menos viscoso la bomba no tiene la capacidad de bombearlo a tan alta presión.

El rango de trabajo de la bomba permite el bombeo de fluidos de entre baja y alta viscosidad, por lo que se desempeña bastante bien ante los cambios de temperatura registrados en el combustible almacenado en el tanque 10.

Para el segundo caso:

Los dos primeras variables tienen un comportamiento similar al del caso anterior:

El caudal de retorno por desvío en la válvula reguladora de las bombas del tanque disminuye con el aumento de temperatura del fueloil.

La presión de la bomba aumenta linealmente con el aumento en la viscosidad.

Ahora bien, el caudal de retorno de combustible de las calderas disminuye con el aumento de la viscosidad y permanece casi constante con respecto a la variación del *set point* de la válvula de regulación de las bombas del tanque 10.

Se evidencia que la eficiencia de la bomba del tanque 10 disminuye bruscamente ante el aumento de la viscosidad. Por el contrario se observa que la eficiencia de la bomba de combustible de la caldera aumenta linealmente a medida que la viscosidad se hace mayor.

Como era de esperarse las corrientes en los motores de las bombas aumentan a medida que el fluido es mas viscoso y varían muy poco frente al cambio en el *set point* de la válvula reguladora.

Para el tercer caso:

El caudal que retorna o se desvía por la acción de control de la válvula reguladora del sistema de transferencia disminuye a medida que se eleva la viscosidad del fluido.

Se repite que la presión de la bomba aumenta a medida que el fluido es mas viscoso.

Apreciamos que el caudal de retorno por desvío en la válvula reguladora de las bombas de la caldera disminuye con el aumento de temperatura del fueloil, solo que la diferencia es de a penas $1 \text{ m}^3/\text{h}$ entre el fluido mas viscoso y el menos viscoso.

Se observa que la eficiencia de la bomba del sistema de transferencia aumenta ante el aumento de la viscosidad. Por el contrario la eficiencia de la bomba de combustible de la caldera disminuye a medida que se eleva la viscosidad

La presión total de la bomba de la caldera disminuye al elevarse la viscosidad del fueloil.

Al igual que en los casos anteriores la corriente en el motor de la bomba del sistema de transferencia aumenta a mayor viscosidad del fluido bombeado. Pero la bomba de la caldera presenta un comportamiento distinto al disminuir levemente la corriente con respecto al aumento de la viscosidad del combustible bombeado.

Para el cuarto caso:

Se advierte que el caudal de retorno disminuye en apenas 0,5 m³/h al pasar la temperatura de 50 a 30 °C.

Rápidamente observamos que la presión total en la bomba, la eficiencia de la bomba, y la corriente en el motor de la bomba de la caldera aumenta con el aumento de la viscosidad.

Del cálculo de las longitudes equivalentes:

Se observa que la porción de longitud de tubería que corresponde al equivalente por los accesorios presentes es en la mayor parte de los casos al menos igual o mayor a la longitud real de la tubería en donde están ubicados los accesorios.

CAPÍTULO VIII
ANÁLISIS ECONÓMICO

8.1. ANÁLISIS ECONÓMICO

Técnicamente la instalación de un grupo de bombas de desplazamiento positivo, es la alternativa factible. En este capítulo se presenta, los costos asociados a la adquisición del equipo y los costos detallados por operación y mantenimiento.

Los costos asociados para la adquisición de las bombas se obtuvieron, a través de contacto vía electrónica con las distintas empresas con capacidad de importar y suministrar dichos equipos en Venezuela, y los costos por operación y mantenimiento son estimaciones del personal del Departamento de Mantenimiento de la Planta Ampliación Tocoa.

Tabla 8.1. Costos asociados a la adquisición del equipo.

VARIABLES	DATOS
Interés (%)	15
Vida Útil del Equipo (Años)	25
\$/Kwh generado.	0,09
Costos por adquisición del Equipo (\$.)	45.000
Costos por traslado de equipos (\$)	17.500
Costo por instalación del equipo (\$)	21.000
Inversión inicial (\$)	83.500

Tabla 8.2. Costos operativos y de mantenimiento anuales

ACTIVIDAD	FRECUENCIA	COSTO (\$.)
Consumo eléctrico de los motores de las bombas	1 vez al año	7.500
Mantenimiento mecánico correctivo	2 veces al año	950
Mantenimiento correctivo eléctrico (instrumentación y control)	1 vez al año	1.050
Stock de repuestos y piezas de cambio	1 vez al año	860
Costos totales operativos y de mantenimiento anuales (\$)		10.360,00

Dentro del análisis económico, además de determinar los costos de lo anteriormente expuesto, existen otras consideraciones que tienen su influencia en la parte técnica.

En primer lugar, cuando el diseñador de la instalación no es el propio usuario, los intereses de ambos no suelen coincidir, y lo que es rentable para uno de ellos puede no serlo para el otro. Algunos ejemplos que ilustran esto son los siguientes:

- Gastos de funcionamiento: una tubería de mayor diámetro es más cara, pero tiene menores pérdidas de carga. Esto repercute en un menor consumo de energía por parte de las bombas.
- El período de vida útil de los distintos elementos influye en los costes futuros de reparación y sustitución, que estarán a cargo del usuario, no de quien diseñó y construyó la instalación.

En relación con estos y otros muchos aspectos se debe llegar a un acuerdo. Debemos tener en cuenta que las soluciones más baratas no siempre son técnicamente buenas. Los aspectos de seguridad, facilidad de control, fiabilidad, etc. son difíciles de apreciar económicamente, pero en ellos entra en juego el prestigio del diseñador.

Otro punto importante a tener en cuenta es la demanda futura. Suele ser difícil de determinar, y sobredimensionar una instalación plantea otros muchos problemas. A menudo las soluciones se reducen a tres:

- Construir una instalación grande desde el principio.
- Construir una instalación ajustada a las necesidades actuales, y sustituirla por otra mayor en el futuro.
- Construir una instalación ajustada a las necesidades actuales y duplicarla en el futuro.

En principio, y si la disponibilidad económica lo permite, resulta más barato sobredimensionar la instalación, pero esto puede traer ciertos problemas de carácter hidráulico:

- Si la velocidad del fluido es baja se puede producir sedimentación en la tubería, complicándose además el desalojo del aire en las tuberías.

- El sistema de regulación trabajará cerca de los límites admisibles, lo que se traduce en grandes pérdidas de energía y riesgo de cavitación en las válvulas.

Una posibilidad intermedia consiste en sobredimensionar ciertas partes de la instalación como los depósitos y líneas principales, y cambiar las bombas y el sistema de regulación cuando sea necesario. Esta solución puede resultar la mejor si la demanda crece lentamente y se agota el período de vida útil de la instalación.

También se puede aumentar el caudal en una instalación sustituyendo las bombas de manera que sean capaces de vencer unas pérdidas de carga mayores. En este caso se produce un mayor consumo de energía, y además existe el riesgo de que la tubería no sea capaz de soportar las mayores presiones generadas por las bombas. Este defecto se minimiza construyendo estaciones de bombeo intermedias.

Dentro del análisis económico se debe tener en cuenta que algunos problemas como la cavitación o los transitorios, que únicamente se pueden calibrar adecuadamente con un análisis preciso en la etapa de diseño. A veces no se detectan hasta después de poner en marcha la instalación y su coste puede ser muy elevado.

CONCLUSIONES

La limitación que representa el cálculo con solo datos experimentales para el agua y no para fluidos viscosos.

Con el aumento de temperatura del fueloil (menor viscosidad) mejoran las condiciones a la succión de la bomba y aumenta el valor mayor del NPSH disponible.

Con el aumento de temperatura del fueloil disminuyen las perdidas de carga o presión en las tuberías.

Las velocidad promedio del fluido esta dentro de los rangos aceptables.

En un sistema de tuberías en paralelo la perdida de carga entre los nodos es similar.

El aumento de temperatura del fueloil mejora el rendimiento de las bombas.

La altura mínima de servicio de los tanques ha ido variando con el tiempo y actualmente se le saca el mayor provecho al combustible almacenado en los tanques.

El uso de programas de cálculo hidráulico esta sujeto al tipo de fluido a simular y si esta registrado en la base de datos del programa.

Los sistemas de tuberías y/o redes de tuberías se pueden reducir a casos sencillos, sin mayor complicación que un gran numero de codos, válvulas y demás accesorios, al menos en lo que a caudal y pérdidas de carga se refiere.

Es factible la utilización de las bombas de combustible fuera de servicio de la planta Arrecife para bombear el combustible a los diferentes.

RECOMENDACIONES

Realizar un estudio que permita mejorar la acometida eléctrica de la estación de bombas del tanque 10, para su uso en el suministro de combustible a la planta y mejorar la confiabilidad y autonomía de la planta.

Retomar el proyecto y llevar a cabo construcción del llamado tanque 11, que estaría ubicado al oeste del actual tanque 10.

Determinar y estudiar las causas del rápido deterioro y falla en los cojinetes, rodamientos y sellos de las bombas de alta presión de combustible de la caldera, esto implica una parada de la bomba para su reparación.

Investigar los efectos del alto porcentaje de azufre en el fueloil sobre los materiales que componen la tubería.

Profundizar en el tema del asentamiento del combustible en las tuberías, así como el apelmazamiento o acumulación del fueloil en las paredes de la tubería por las bajas temperaturas asociadas al mismo.

Elevar la presión de bombeo del combustible en las bombas del sistema de transferencia en ocasión de elevar la presión a la entrada de las bombas de la caldera, de esta manera ayudar a reducir el efecto que tienen las bajas presiones de succión en dichas bombas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Cameron. (1988). *“Hydraulic data”*. USA. Ingersoll-rand.
2. Crane. (1982). *“Flow of fluid through valves, fittings, and pipe”*. USA. McGraw-Hill.
3. Fuchslocher-Schulz. (1964). *“Bombas: funcionamiento, cálculo y construcción”*, Barcelona, España. Editorial Labor.
4. Greene,W. *“Válvulas. Selección y mantenimiento”*. McGraw-Hill. Interamericana de México SA.
5. Giles, R. (1995). *“Mecánica de los fluidos e hidráulica”*. (Tercera edición). Schaum McGraw-Hill Interamericana de México SA.
6. Jeppson, R., Larock, B. y Watters, G. (2000). *“Hydraulics of pipeline Systems”*. New York - USA. CRC Press.
7. Karassik, I., and Krutzsch, W. (1983). *“Manual de bombas: Diseño, aplicación, especificaciones, operación y mantenimiento”*. México. McGraw-Hill.
8. Karassik, I. J., Mesina J. P., Cooper P. (2001). *“Pump handbook”*. USA. McGraw-Hill.
9. Mataix, C. (1986). *“Mecánica de fluidos y maquinas hidráulicas”*. Madrid, España. Ediciones del Castillo,
10. Kreith, F. (1999) *“Mechanical engineering Handbook”*. USA. CRC Press.
11. Méndez, M. (1995). *“Tuberías a presión en los sistemas de agua”*. Caracas, Venezuela. Fundación Polar y la Universidad Católica Andrés Bello.
12. Nesbitt, B. (2006). *“Handbook of pumps and pumping/ pumping manual international”*. Elsevier science and technology books.
13. Nelik, L. (1999). *“Centrifugal and Rotary Pumps. Fundaments with Applications”*. New York - USA. CRC press.

14. McNaughton, K. (1992). *"Bombas: Selección, uso y mantenimiento"*, México. McGraw-Hill.
15. PDVSA. (1994). Manual de ingeniería de diseño, *"Cálculo hidráulico de tuberías"*. Revisión 0.
16. PDVSA. (1996). Manual de diseño de proceso, *"Principios básicos"*. Revisión 0.
17. Plasencia, F. (1980). *"Análisis del sistema de calentamiento de petróleo en la planta termoeléctrica Tacoa"*, UCV. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Caracas, Venezuela.
18. Potter, M. C. y Wiggert, D. C. (2002). *"Mecánica de fluidos"*. México. Thomsom.
19. Shames, I. (1995). *"Mecánica de fluidos"*, Santafé de Bogotá, Colombia. McGraw-Hill.
20. Smith, P. y Zappe R. (2004). *"Valve Selection Handbook"*. USA. (5ta Edition) Elsevier.
21. Streeter, V. y Wylie E. (1994). *"Mecánica de los fluidos"*. México (Tercera Edición). McGraw-Hill.
22. UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA EXPERIMENTAL LIBERTADOR, Vicerrectorado de Investigación y Postgrado. (2006). *"Manual de trabajos de grado de especialización y maestría y tesis doctorales"*. Caracas, Venezuela. Fedupel.

Manuales, planos y recursos bibliográficos propiedad de la EDC:

- Manual de operación del sistema de combustible: Tanque número 10 de fueloil. Planta Ampliación Tacoa.
- Diagramas de proceso e instrumentación (P&ID).
- Planos de la planta ampliación Tacoa.
- Sistemas de combustible líquido y gaseoso. Ing. Javier Urbina e Ing. Alberto Fuentes. Arrecifes, 1998.
- Fuel oil system description and operation. Inelectra S.A. Tacoa, Octubre, 1980.
- Instructivos de Operación. Planta Ampliación Tacoa. Arrecifes, Junio - 2000.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

Páginas web consultadas:

Oficina de Operación del Sistema Interconectado. (2009). [Página web en línea].

Disponible en: <http://www.opsis.org.ve> (Actualmente no disponible)

Bombas ALLWEILER. (2009). [Página web en línea]. Disponible en:

<http://www.allweiler.com>

Bombas BORNEMANN. (2009). [Página web en línea]. Disponible en:

<http://www.bornemann.com>

Bombas KLF. (2008). [Página web en línea]. Disponible en:

<http://www.klfpump.com>

Buscador de artículos científicos y técnicos ScienceDirect. (2009). [Página web en línea]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com>

CORPOELEC. (2012). [Página web en línea]. Disponible en:

<http://www.corpoelec.gob.ve/>

Mapas de Google. (2009). [Página web en línea]. Disponible en: maps.google.es/

The Engineering ToolBox. (2009). [Página web en línea]. Disponible en:

<http://www.engineeringtoolbox.com>

Fundamentals Pump's. (2009). [Página web en línea]. Disponible en:

<http://www.pumpfundamentals.com/>

GLOSARIO DE TERMINOS

Altura o carga de presión: es una expresión de energía, específicamente de energía por unida de peso de un fluido desplazado. Este parámetro está directamente relacionado a la presión, indica cual sería la altura que alcanzaría una columna de líquido alojada dentro de un tubo vertical conectado a un conducto o recipiente presurizado. Al estar bajo presión, parte del líquido contenido en el sube por el tubo hasta ocupar una posición fija en tanto no varía la presión.

Altura o carga de velocidad: es la pérdida de energía dinámica del fluido debido a la fricción de las partículas del fluido entre si y contra las paredes de la tubería que las contiene.

Caldera: recipiente cerrado en el que se calienta agua, se genera vapor, se sobrecalienta el vapor, o bien una combinación de todo ello, bajo presión o vacío por la aplicación del calor de los combustibles, electricidad o energía nuclear.

Calentador de fueloil: deposito con un serpentín calentador en su interior que usa vapor como medio del calentamiento para reducir la viscosidad del fueloil, a la viscosidad adecuada para su buena pulverización y combustión

Carga: es la altura que una bomba puede desplazar a un líquido, la carga es también una forma de energía. En sistema de bombeo hay cuatro distintos tipos de carga: la carga de elevación estática (o altura de carga estática), la carga de presión (o altura de presión), la carga de velocidad (o altura de velocidad) y la carga por pérdidas de fricción.

Carga total: es la diferencia entre la descarga y la succión de la carga o altura de presión.

Carga estática total: es la diferencia entre la descarga y la carga de succión estática, es también la diferencia entre la presión de los tanques de descarga y succión.

Caudal o flujo: volumen de un fluido en movimiento, medido en función del tiempo.

Corriente eléctrica: es el flujo de carga por unidad de tiempo que recorre un material. Y se debe al movimiento de los electrones en el interior del material. En el Sistema Internacional de Unidades se expresa en C/s (culombios sobre segundo), unidad que se denomina amperio.

Curva característica: es un gráfico de la carga total contra el flujo o caudal para un modelo específico de bomba, diámetro del rodete y velocidad.

Curva del sistema: es una representación gráfica del sistema que incluye todas las tuberías y accesorios, comenzando por el punto de entrada a la tubería (incluso la

superficie del tanque de succión) y termina en el punto de salida de la tubería (inclusive la superficie del fluido en el tanque de descarga). Los cambios al sistema como abrir o cerrar válvulas o alargar o reducir tuberías cambian la carga de fricción, por lo que cambia la curva del sistema, lo que modifica el punto de operación.

Densidad: la densidad de una sustancia es su masa por unidad de volumen. La unidad de densidad en el Sistema Internacional es el kilogramo por metro cubico.

Factor de fricción: el factor de fricción f es requerido para calcular la pérdida de carga por fricción. Es determinado mediante el diagrama de Moody, o la ecuación de Colebrook-White, o la de Hagen-Poiseuille. El valor del factor de fricción depende de si el flujo es laminar o turbulento.

Factor de potencia: o coseno de “fi” ($\cos \phi$) representa el valor del ángulo que se forma al representar gráficamente la potencia activa (**P**) y la potencia aparente (**S**), es decir, la relación existente entre la potencia real de trabajo y la potencia total consumida en un circuito eléctrico, representa el factor de utilización de la potencia eléctrica entre la potencia aparente con la potencia real.

Factor K: este factor nos proporciona la pérdida de carga para los accesorios. Este factor para diversos accesorios se encuentra en diversas publicaciones.

Fluido: es un conjunto de sustancias donde existe entre sus moléculas poca fuerza de atracción, cambiando su forma, lo que ocasiona que la posición que toman sus moléculas varía, ante una fuerza aplicada sobre ellos.

Flujo laminar: es un régimen de flujo que se produce a bajos números de Reynolds ($Re < 2000$). Se caracteriza por las partículas del fluido que se mueven en capas una sobre la otra sin mezclarse.

Flujo o caudal: el caudal o gasto volumétrico es la cantidad de un líquido que pasa por unidad de tiempo a través de una sección de control.

Fricción: es la fuerza producida como reacción al movimiento. Todos los fluidos están sujetos a la fricción cuando están en movimiento. Cuanto mayor sea la viscosidad del fluido, mayor será la fuerza de fricción para el mismo caudal. La fricción se produce internamente, entre capas de fluido, cuando una se mueve respecto a otra y también entre la pared de la tubería y el fluido.

Fueloil número 6: combustible líquido de la familia de los productos derivados del petróleo. Está compuesto principalmente de parafinas, isoparafinas, aromáticos, naftenos, y derivados de los hidrocarburos (hidrogeno, azufre y oxigeno) que no son removidos en los procesos de refinación. El fueloil puede contener trazas de otros contaminantes como compuestos de vanadio y níquel.

Gravedad API: es una medida de la densidad relativa de los derivados del petróleo.

Gravedad específica o densidad relativa: es la relación de la densidad de un líquido a cierta temperatura, con respecto a la densidad del agua a una temperatura normalizada. Si el valor de la gravedad específica es 1 entonces la densidad de ese fluido es igual a la del agua. Si es menor a 1 ese fluido es menos denso que el agua. Y es más pesado que el agua si la gravedad específica es mayor a 1.

Kilovatio-hora: Medida de energía equivalente a la transferida cuando fluye un kilovatio durante una hora.

Línea de energía o gradiente de energía: es también es llamada línea de carga. La energía total del flujo en cualquier sección, con respecto a un plano de referencia determinado, es la suma de la altura geométrica o de elevación Z , la altura piezométrica o de carga, y , y la altura cinética o de presión dinámica $V^2/2g$. La variación de la energía total de una sección de tubería a otra se representa por una línea denominada de carga o de energía y también gradiente de energía. En ausencia de pérdidas de energía, la línea de carga se mantendrá horizontal, aun cuando podría variar la distribución relativa de la energía entre las alturas geométrica, piezométrica y cinética. Sin embargo, en todos los casos reales se producen pérdidas de energía por rozamiento y la línea de carga resultante es inclinada.

Línea piezométrica o gradiente hidráulico: es la línea que une los puntos hasta los que el líquido podría ascender si se insertan tubos piezométricos en distintos lugares a lo largo de la tubería o canal abierto. Es una medida de la altura de presión hidrostática disponible en dichos puntos. Todos los términos de energía del sistema en un punto se convierten a altura o carga y se representan por encima de un dibujo de la instalación. Esto ayuda a visualizar donde se encuentran los términos de energía del sistema y asegurarse que nada fue omitido.

Líquido o fluido newtoniano: es un fluido cuya viscosidad puede considerarse constante en el tiempo.

Longitud equivalente: es un método usado para determinar la pérdida por fricción. El valor de la longitud equivalente de un accesorio se halla en tablas y nomogramas en la bibliografía, este valor se suma a la longitud de tubería recta, y con esta nueva longitud total se calcula la pérdida por fricción total en la tubería.

Manómetro de Bourdon: es un instrumento que sirve para medir la presión de fluidos contenidos en recipientes cerrados. Este se compone de un tubo sellado que se desvía en respuesta a la presión aplicada, es el tipo más común de mecanismo de detección de presión.

NPSH disponible (NPSHa - Net Positive Suction Head Available): es la altura total absoluta referida a un plano horizontal que contiene al eje de apertura de succión

(bombas horizontales) o al plano inferior del primer impelente bombas verticales, menos la presión de vapor (absoluta) del líquido bombeado a la temperatura del flujo. Es la carga o energía específica en la succión de la bomba menos la presión de vapor del fluido.

NPSH requerido (NPSHr - Net Positive Suction Head Required): es la NPSH mínima requerida para evitar la cavitación. Depende de las características de la bomba, por lo que es un dato que proporciona el fabricante de las bombas en sus curvas de operación o características.

Número de Reynolds: es un número adimensional que se define como la relación de las fuerzas dinámicas del flujo másico y el esfuerzo cortante debido a la viscosidad. Es proporcional a la relación de la velocidad y la viscosidad del fluido.

Peso específico: es el peso por unidad de volumen de un fluido.

Pérdidas de carga por fricción: es la pérdida que viene dada por la ecuación de Darcy-Weisbach y en también está reflejada con datos experimentales en tablas de la bibliografía consultada.

Poder calorífico: calor total obtenido por la combustión que está a 15,5 °C de temperatura ambiente antes de medir el calor desprendido.

Potencia: es el trabajo o transferencia de energía realizada en la unidad de tiempo. Se mide en vatios (W).

Potencia hidráulica: mide el trabajo realizado por el líquido por unidad de tiempo. La misma puede expresarse como el producto entre el caudal y presión o bien por producto entre caudal, altura, y peso específico.

Potencia mecánica: viene dada por la potencia hidráulica dividida por el rendimiento de la bomba a utilizar.

Punto de operación: es el punto (caudal y carga total) en que la bomba opera. Está localizado en la intersección de la curva del sistema con la curva característica de la bomba. Esto corresponde al caudal y carga requerida por el proceso.

Presión de vapor: o presión de saturación es la presión de la fase gaseosa o de vapor en la que las fases líquida y vapor se encuentran en equilibrio a una temperatura específica, su valor es independiente de las cantidades de líquido y vapor presentes mientras existen ambas.

Quemador: aparato para la introducción a la zona de combustión del combustible y del aire de combustión adecuadamente mezclados en proporciones correctas.

Rendimiento o eficiencia: de una bomba, es la relación entre la potencia de salida o potencia hidráulica y la potencia de entrada o del eje del motor y siempre es menor a la unidad.

Rugosidad de la tubería: es una medida promedio de altura de los picos que producen rugosidad en la superficie interna de las tuberías. La rugosidad se mide en distintos lugares de la tubería y luego se promedia.

Válvulas: son elementos que se colocan en las tuberías como auxiliares indispensables para la adecuada operación, mantenimiento y seguridad de los sistemas de conducción de fluidos.

Velocidad: magnitud física de carácter vectorial que expresa el desplazamiento de un objeto por unidad de tiempo.

Viscosidad: expresa la facilidad que tiene un fluido para fluir cuando se le aplica una fuerza externa.

Volumen específico: es el volumen de una unidad de masa de un fluido.

APÉNDICES

APÉNDICE A: ECUACIONES.

A continuación se presentan todas las ecuaciones involucradas en la metodología de cálculo. Todas las unidades están en el sistema internacional, de no especificarse lo contrario.

Presión

$$P = H \cdot \rho \cdot g = H \cdot \gamma$$

donde:

P: es la presión de la columna de líquido.

ρ : es la densidad del líquido.

g: es la aceleración de gravedad.

γ : es el peso específico.

Grado o gravedad API

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{ge} - 131,5$$

donde:

ge: es la gravedad especifica del fluido a 60°F

Número de Reynolds

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

donde:

Re : número de Reynolds.

V: velocidad media del flujo en la tubería.

D: diámetro de la tubería.

ν : viscosidad cinemática.

Ecuación de Darcy-Weisbach

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

donde:

h_f : pérdidas de energía por fricción en los contornos, expresada en términos de la altura de columna del fluido.

f: coeficiente de fricción.

L: longitud del tramo de tubería asociado con la pérdida de energía señalada.

D: diámetro de la tubería.

V: velocidad media del flujo.

g: aceleración de la gravedad.

ya que $P = h \cdot \gamma \rightarrow \Delta P = h \cdot \rho \cdot g$ (la pérdida en términos de presión)

$$\Delta P = \frac{\rho \cdot f \cdot L \cdot V^2}{2 \cdot D}$$

donde:

ΔP : pérdidas de energía por fricción, expresada en términos de la presión.

ρ : densidad del fluido.

g : aceleración de la gravedad.

Factor de fricción

- Factor de fricción para flujo turbulento: Ecuación de Colebrook-White.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log_{10} \left(\frac{\varepsilon_0}{3,7 \cdot D} + \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right)$$

donde:

ε_0 : es la rugosidad absoluta de la tubería.

D : es el diámetro interno de la tubería.

Re : es el valor del número de Reynolds.

f : es el factor de fricción.

- Factor de fricción para flujo laminar: de la ley de Hagen-Poiseuille.

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

Carga Neta Positiva a la Succión disponible NPSHa - (Net Positive Suction Head Available)

$$NPSHa = h_a - h_{vap} + h_{st} - h_{fs}$$

donde:

h_a : es la presión absoluta (en metros de columna de líquido) sobre la superficie del líquido en el tanque de suministro.

h_{vap} : la carga en metros correspondiente a la presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo.

h_{st} : altura estática en metros que el nivel de líquido de suministro está por encima o por debajo de la línea central de la bomba.

h_{fs} : todas las pérdidas en la línea de succión (en metros de columna de líquido) incluyendo pérdidas por entradas y pérdidas por fricción a través de la tubería, válvulas y accesorios.

Teorema de Bernoulli

$$C = \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + Z \rightarrow H = \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + Z$$

donde:

P/γ : es la altura o energía de presión.

$V^2/2g$: es la altura o energía cinética.

Z : es la altura o energía potencial.

C : es la constante de la ecuación de Bernoulli, asimismo se denomina altura total, H , a la constante C de la ecuación y representa la energía mecánica del movimiento por unidad de peso del fluido.

Altura piezométrica o de energía hidráulica

$$HGL = \frac{P}{\gamma} + Z$$

donde:

HGL : se denomina altura piezométrica.

P/γ : es la altura o energía de presión.

Z : es la altura o energía potencial.

Potencia hidráulica

$$P_{hid} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_B$$

donde:

ρ : es la densidad del fluido.

g : aceleración de la gravedad.

Q : es el caudal, o volumen de fluido que atraviesa una sección transversal de tubería

H_B : es la carga o altura total de la bomba.

Potencia absorbida

$$P_{elec} = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos(\varphi)$$

donde:

P_{elec} : es la potencia absorbida por el motor de la red eléctrica.

V : es el voltaje, o diferencia de potencial en el motor eléctrico.

I : es la intensidad o corriente eléctrica en el motor eléctrico.

$\cos(\varphi)$: es el factor de potencia del motor.

Velocidad del fluido

$$Q = V \cdot A \rightarrow V = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\pi \cdot r^2} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2}$$

donde:

Q: es el caudal, o volumen de fluido que atraviesa una sección transversal de tubería en un determinado tiempo.

V: velocidad media del flujo.

A: es el área de la sección transversal interna de la tubería.

D: es el diámetro interno de la tubería (diámetro externo menos el espesor de pared).

Eficiencia de la bomba

$$\eta = \frac{P_{hid}}{P_{mec}}$$

donde:

η : es la eficiencia o rendimiento de la bomba.

P_{hid} : Potencia hidráulica de la bomba.

P_{mec} : potencia mecánica o potencia en el eje de la bomba.

Eficiencia del motor eléctrico

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{elec}}$$

donde:

η : es la eficiencia o rendimiento del motor.

P_{mec} : Potencia mecánica o potencia en el eje de la bomba.

P_{elec} : potencia absorbida por el motor de la red eléctrica.

Viscosidad

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

donde:

ν : es la viscosidad cinemática del fluido.

μ : es la viscosidad dinámica o absoluta del fluido.

ρ : es la densidad del fluido.

Simplificaciones y otras formas

Del número de Reynolds, sustituyendo el término de velocidad

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} = \frac{Q \cdot D}{\nu \cdot A} = \frac{Q \cdot D}{\nu \cdot \pi \cdot r^2} = \frac{Q \cdot D}{\nu \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2} = \frac{4 \cdot Q}{\nu \cdot \pi \cdot D}$$

En la ecuación de Poiseuille, sustituyendo Reynolds por el hallado en el paso anterior

$$f = \frac{64}{\frac{4 \cdot Q}{\nu \cdot \pi \cdot D}} = \frac{16 \cdot \nu \cdot \pi \cdot D}{Q}$$

De la ecuación de Darcy-Weisbach, sustituyendo el término de velocidad

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} = \frac{f \cdot L}{D \cdot 2g} \left(\frac{Q}{A}\right)^2 = \frac{f \cdot L}{D \cdot 2g} \left(\frac{Q}{\pi \cdot r^2}\right)^2 = \frac{f \cdot L}{D \cdot 2g} \frac{Q^2}{\pi^2 \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^4} = \frac{8 \cdot f \cdot L \cdot Q^2}{D^5 \cdot \pi^2 \cdot g}$$
$$h_f = K \cdot Q^2 \rightarrow K = \frac{8 \cdot f \cdot L}{D^5 \cdot \pi^2 \cdot g}$$

ahora sustituimos f por el valor hallado anteriormente

$$h_f = \frac{8 \cdot \left(\frac{16 \cdot \nu \cdot \pi \cdot D}{Q}\right) \cdot L \cdot Q^2}{D^5 \cdot \pi^2 \cdot g} = \frac{128 \cdot \nu \cdot L \cdot Q}{D^4 \cdot \pi \cdot g}$$

En resumen

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} = \frac{64}{Re} \frac{L V^2}{D 2g} = \frac{64}{\frac{V \cdot D}{\nu}} \frac{L V^2}{D 2g} = \frac{32 \cdot \nu \cdot L}{g D^2} V = \frac{32 \cdot \nu \cdot L}{g D^2} \frac{4Q}{\pi D^2} = \frac{128 \nu \cdot L \cdot Q}{g \cdot \pi \cdot D^4}$$

$$P = H \cdot \rho \cdot g = H \cdot \gamma \rightarrow h_f \cdot \rho \cdot g = \frac{128 \nu \cdot L \cdot Q}{g \cdot \pi \cdot D^4} \rho \cdot g \rightarrow \Delta P = \frac{128 \cdot \rho \cdot \nu \cdot L \cdot Q}{\pi \cdot D^4}$$

APÉNDICE B: EQUIVALENCIAS Y/O CONVERSIONES.

$$1 \text{ pie (feet)} = 0,3048 \text{ m} = 12 \text{ pulgadas (inch)}$$

$$1 \text{ m} = 3,2808 \text{ pies} = 39,37 \text{ pulgadas}$$

$$1 \text{ pulgada} = 0,0254 \text{ m} = 0,0833 \text{ pies}$$

$$1 \text{ lb (libra o pound)} = 0,45359 \text{ kg}$$

$$1 \text{ kg} = 2,2046 \text{ lb}$$

$$1 \text{ kgf} = 1 \text{ kp} = 9,80665 \text{ N}$$

$$1 \text{ kp} = 1 \text{ kgf} = 1 \text{ kg} \times 9,80665 \text{ m/s}^2 = 9,80665 \text{ kg m/s}^2 = 9,80665 \text{ N}$$

$$1 \text{ N} = 0,10197 \text{ kgf} = 0,2248 \text{ lbf}$$

$$1 \text{ bar} = 100.000 \text{ pascales} = 100 \text{ kPa} = 100 \text{ kN/m}^2 = 1,01972 \text{ kgf/cm}^2 = 14,5037 \text{ psi}$$

$$1 \text{ kgf/cm}^2 = 98,0665 \text{ kPa} = 0,981 \text{ bar} = 0,968 \text{ atm} = 14,2065 \text{ psi}$$

$$1 \text{ m.c.a.} = 9806,65 \text{ Pa} = 0,1 \text{ kgf/cm}^2 = 0,1 \text{ atm}$$

$$1 \text{ atm (atmosfera)} = 10,33 \text{ m.c.a.}$$

$$1 \text{ bar} = 10,2 \text{ m.c.a.}$$

$$1 \text{ psi} = 6894,757 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ MPa} = 10,197 \text{ kgf/cm}^2 = 145 \text{ psi}$$

$$1 \text{ BTU} = 1.055 \text{ J (joules)}$$

$$1 \text{ hp} = 745,7 \text{ W} = 0,746 \text{ kW}$$

$$1 \text{ kW} = 1,341 \text{ hp}$$

$$1 \text{ W-h} = 3.600 \text{ J (joules)}$$

$$1 \text{ barril} = 0,15899 \text{ m}^3 = 158,98 \text{ L (litros)}$$

$$1 \text{ m}^3 = 6,289 \text{ barriles} = 1.000 \text{ L}$$

$$1 \text{ gpm} = 0,2271 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$1 \text{ t (tonelada métrica)} = 1.000 \text{ kg} = 2204,6 \text{ lb}$$

$$1 \text{ Pa s} = 1 \text{ N s/m}^2 = 1 \text{ kg/(m s)} = 10^3 \text{ cP}$$

$$1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^6 \text{ cSt}$$

$$1 \text{ cP (centipoises)} = 10^{-2} \text{ poises} = 10^{-3} \text{ Pa s}$$

$$1 \text{ cSt (centistokes)} = 10^{-2} \text{ stokes} = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$3.600 \text{ m}^3/\text{h} = 1 \text{ m}^3/\text{s}$$

APÉNDICE C: CÁLCULOS.

En esta sección del trabajo se presentan las hojas de cálculo (elaboradas en el programa Mathcad 14) de los casos propuestos:

1. Trasegado de combustible del tanque n.º 10 a los tanques de almacenamiento diario (tanques n.º 4, 6 y 7), mediante la estación de bombeo del tanque 10, con una, dos y tres bombas de la estación en servicio respectivamente y por separado. Página 237.
2. Bombeo de combustible del tanque n.º 10 a las calderas de las unidades 7, 8 y 9, mediante la estación de bombeo y calentadores del tanque 10, las bombas y calentadores del nivel planta, incluyendo el retorno a la succión de las bombas del tanque 10 (retorno largo). Página 270.
3. Bombeo de combustible de los tanques diarios (n.º 4 y 6) a las calderas de las unidades 7, 8 y 9, por medio de las bombas y calentadores del sistema de transferencia, las bombas y calentadores del nivel planta, incluyendo el retorno hacia el anillo en el tanque 4. Página 288.
4. Suministro de combustible desde el tanque n.º 7 a la caldera de la unidad 7, por medio del sistema de gravedad, las bombas y calentadores del nivel planta, incluyendo el retorno hacia el anillo de calentamiento en frente a la planta Tocoa. Página 304.

Hoja de calculo en Mathcad para determinar los caudales de la red por el método de Hardy-Cross con Newton-Raphson

Primer caso: Trasegado de combustible del tanque n.º 10 a los tanques de almacenamiento diario, con una bomba de la estación en servicio.

Gravedad API del Fuel Oil n.º 6 $g_{API} := 10.6$

Densidad del agua $dens_{H_2O} := 999.1 \text{ [kg/m}^3\text{]}$

Gravedad especifica del Fuel Oil $g_{esp} := \frac{141.5}{131.5 + g_{API}} = 0.996$

Constante gravitatoria $grav := 9.80665 \text{ [m/s}^2\text{]}$

Densidad del Fuel Oil $dens := g_{esp} \cdot dens_{H_2O} = 994.881 \text{ [kg/m}^3\text{]}$

Peso especifico del Fuel Oil $p_{esp} := dens \cdot grav = 9756.454 \text{ [N/m}^3\text{]}$

- Filtros a la succión de las bombas tanque n.º 10

Perdida de presión máxima admisible en el filtro (Fsb10) es de: 1 psi

$$F_{sb10} := \frac{1 \text{ psi}}{p_{esp} Pa} = 0.707 \text{ [mcl]}$$

- Filtros a la descarga de las bombas del tanque n.º 10

Caída máxima de presión admisible en el filtro (Fdb10m) es de: 1,5 bar

Caída de presión máxima operacional (Fdb10m) es de: 1,2 bar

Caída de presión operacional, con el filtro limpio (Fdb10o) es de: 0,8 bar

$$F_{db10m} := \frac{1.2 \text{ bar}}{p_{esp} Pa} = 12.3 \text{ [mcl]}$$

Datos y curvas de las bombas Bornemann en la estación bombeo del tanque n.º 10

	v1	Dp	Q1	P1	v2	Q2	P2
	mm ² /s	bar	m ³ /h	kW	mm ² /s	m ³ /h	kW
BT10 :=	370	1.49	185	41.5	3300	185	78
	370	5.04	182	58.9	3300	184	97.3
	370	10	176	89.8	3300	181	124
	370	15	172	117	3300	179	151
	370	20.1	167	144	3300	176	178
	370	25	160	171	3300	173	204
	370	29.6	158	198	3300	172	229

$$\text{Visc1} := \text{BT10}^{(1)}$$

$$\text{Visc2} := \text{BT10}^{(5)}$$

$$\text{Q1_BT10} := \frac{\text{BT10}^{(3)}}{3600}$$

$$\text{Q2_BT10} := \frac{\text{BT10}^{(6)}}{3600}$$

$$\text{P1_BT10} := \text{BT10}^{(4)}$$

$$\text{P2_BT10} := \text{BT10}^{(7)}$$

$$\text{DP_BT10} := \frac{\text{BT10}^{(2)} \cdot 100000}{\text{pesp}}$$

Regresion lineal de los puntos de Caudal contra Diferencia de Presion en la Bomba a una viscosidad de 370 cSt

$$\text{BT10A} := \text{regress}(\text{Q1_BT10}, \text{DP_BT10}, 1) \quad \text{a1} := \text{BT10A}_{4,1} \quad \text{a2} := \text{BT10A}_{5,1} \quad \text{DPBT10A}(x) := \text{a1} + \text{a2}(x)$$

Regresion lineal de los puntos de Diferencia de Presion contra Potencia en la Bomba a una viscosidad de 370 cSt

$$\text{BT10C} := \text{regress}(\text{DP_BT10}, \text{P1_BT10}, 1) \quad \text{a5} := \text{BT10C}_{4,1} \quad \text{a6} := \text{BT10C}_{5,1} \quad \text{PBT10A}(x) := \text{a5} + \text{a6}(x)$$

Regresion lineal de los puntos de Caudal contra Diferencia de Presion en la Bomba a una viscosidad de 3300 cSt

$$\text{BT10B} := \text{regress}(\text{Q2_BT10}, \text{DP_BT10}, 1) \quad \text{a3} := \text{BT10B}_{4,1} \quad \text{a4} := \text{BT10B}_{5,1} \quad \text{DPBT10B}(x) := \text{a3} + \text{a4}(x)$$

Regresion lineal de los puntos de Diferencia de Presion contra Potencia en la Bomba a una viscosidad de 3300 cSt

$$\text{BT10D} := \text{regress}(\text{DP_BT10}, \text{P2_BT10}, 1) \quad \text{a7} := \text{BT10D}_{4,1} \quad \text{a8} := \text{BT10D}_{5,1} \quad \text{PBT10B}(x) := \text{a7} + \text{a8}(x)$$

Viscosidad $\text{visc} := 2000 \text{ [cSt]}$

Aproximacion a la curva de la bomba segun la viscosidad del fluido

$$\text{porc} := \frac{(\log(\text{visc}) - \log(370))}{(\log(3300) - \log(370))} = 0.771 \text{ [%]}$$

$$\text{QQQ} := (\text{Q2_BT10} - \text{Q1_BT10})\text{porc} + \text{Q1_BT10} \quad \text{Puntos de Caudal}$$

$$\text{PPP} := (\text{P2_BT10} - \text{P1_BT10})\text{porc} + \text{P1_BT10} \quad \text{Puntos de Potencia}$$

Regresion lineal de los puntos de Caudal contra Diferencia de Presion en la Bomba a una viscosidad X

$$\text{BT10E} := \text{regress}(\text{QQQ}, \text{DP_BT10}, 1) \quad \text{a9} := \text{BT10E}_{4,1} \quad \text{a10} := \text{BT10E}_{5,1} \quad \text{DPBT10C}(x) := \text{a9} + \text{a10}(x)$$

Regresion lineal de los puntos de Diferencia de Presion contra Potencia en la Bomba a una viscosidad X

$$\text{BT10F} := \text{regress}(\text{DP_BT10}, \text{PPP}, 1) \quad \text{a11} := \text{BT10F}_{4,1} \quad \text{a12} := \text{BT10F}_{5,1} \quad \text{PBT10C}(x) := \text{a11} + \text{a12}(x)$$

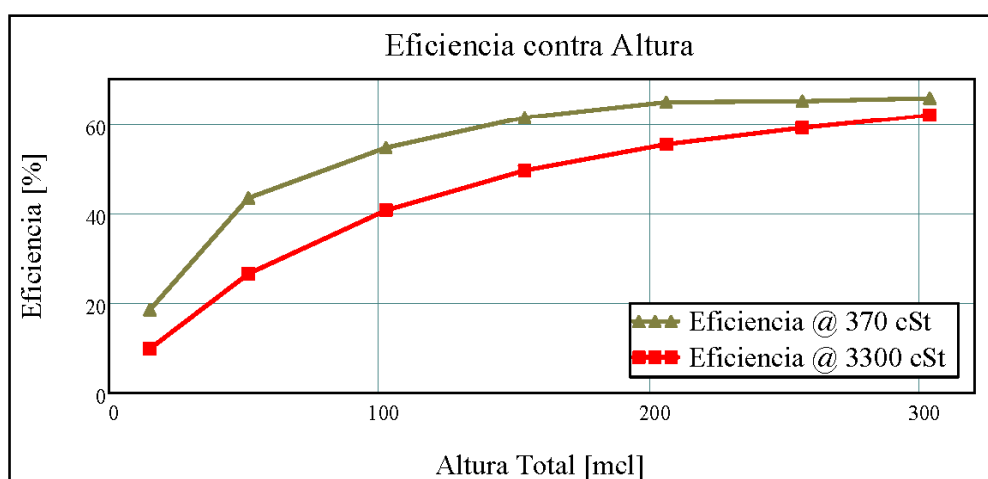
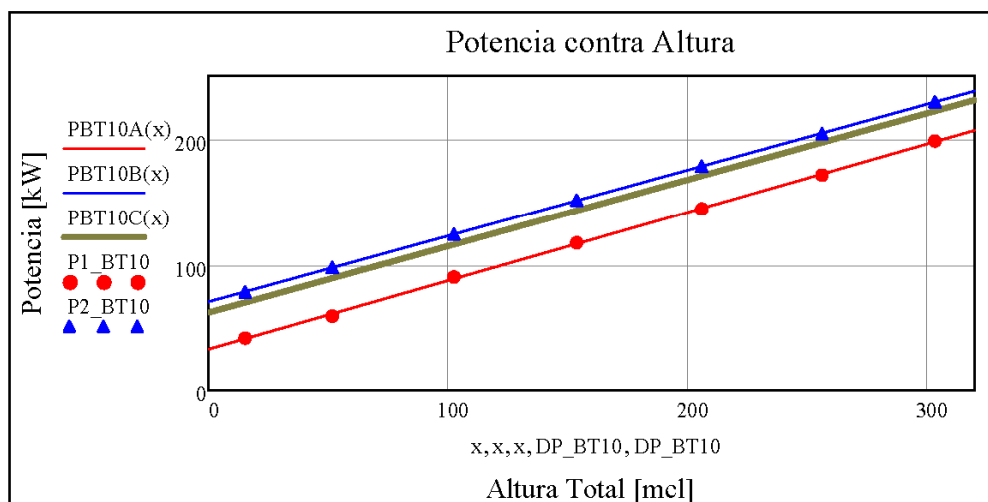
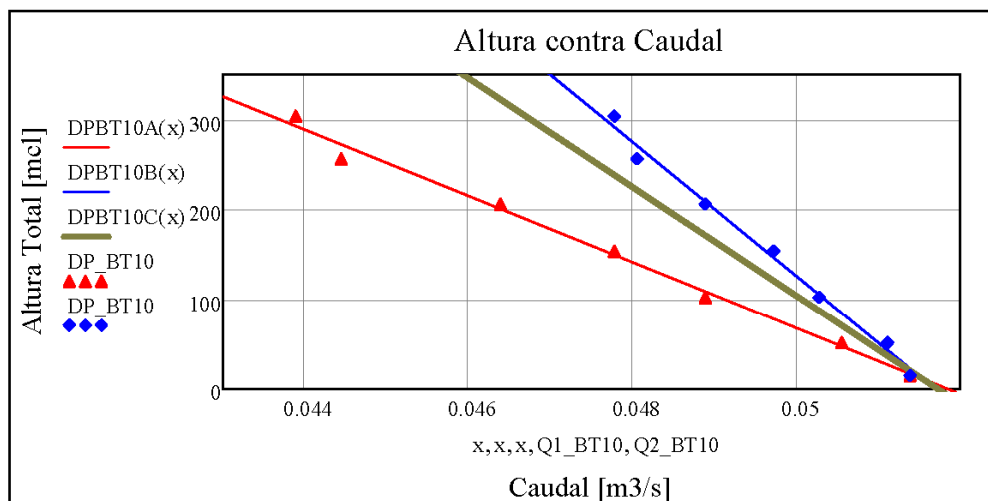
i := 1 .. 7

$$\text{Eficiencia370}_i := \frac{\text{dens} \cdot \text{grav} \cdot \text{Q1_BT10}_i \cdot \text{DP_BT10}_i}{\text{P1_BT10}_i \cdot 10}$$

Calculo de eficiencia de la bomba a 370 cSt

$$\text{Eficiencia3300}_i := \frac{\text{dens} \cdot \text{grav} \cdot \text{Q2_BT10}_i \cdot \text{DP_BT10}_i}{\text{P2_BT10}_i \cdot 10}$$

Calculo de eficiencia de la bomba a 3300 cSt



Método Hardy-Cross con NEWTON-RAPHSON
Primer Caso: Tanque n.º 10 a tanques diarios (UNA BOMBA)

1	151.9	19.25	6.26	50	Valor de ajuste de la válvula de control
2	143.5	19.25	5.1	50	
3	130.7	19.25	4.2	60	$ZVCT10 := 10 \text{ [kgf/cm}^2 \text{ man]}$
4	120.8	29.25	4.164	170	$zvsp := \frac{(ZVCT10 \cdot 98066.5)}{pesp} = 100.52 \text{ [mcl]}$
5	93.6	15.25	4.164	180	
6	62.5	10.02	5.2	180	
7	$L_{ww} := 72.2$	12	4.2	180	Nivel mínimo de vaciado del tanque n.º 10
8	67.3	19.25	4.2	170	$zmint := 6.26 \text{ [msnm]}$
9	1420.9	15.25	24.6	90	
10	1502.7	15.25	37.26	80	Nivel máximo de llenado del tanque n.º 4
11	380.8	10.02	52.97	170	$zmaxt := 52.91 \text{ [msnm]}$
12	101.1	7.98	52.91	10	
	[m]	[pulgadas]	[m]	[m³/h]	

$$D := d \cdot 0.0254 \text{ [m]}$$

$$Q := \frac{Q_h}{3600} \text{ [m}^3\text{/s]}$$

Viscosidad del fluido

$$visc = 2000 \text{ [cSt] ó [mm}^2\text{/s]}$$

$$\nu_1 := \frac{visc}{1000000} \text{ [m}^2\text{/s]}$$

$$i := 1 \dots 12$$

$$j := 0$$

$$n := 0$$

L = longitud equivalente de tubería en metros.

d = diametro interno de la tubería en pulgadas.

Z = altura de la entrada o salida de la tubería en metros sobre el nivel del mar

Qh = valor de caudal semilla para comenzar las iteraciones en m³/h.

D = diametro en metros.

Q = valor de caudal en m³/s.

ν_1 = viscosidad en m²/s

RQ:= Q ← Q

for n ∈ 1..25

for j ∈ 1..12

$$Re_j \leftarrow \frac{4Q_j}{(\pi v1 D_j)}$$

$$f_j \leftarrow \frac{64}{Re_j}$$

$$k_j \leftarrow f_j \cdot \frac{L_j \cdot 8}{(D_j)^5 \cdot \pi^2 \cdot \text{grav}}$$

$$M \leftarrow \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2k_1 \cdot Q_1 & 0 & 0 & -2k_4 \cdot Q_4 & -2k_5 \cdot Q_5 + a10 & -2k_6 \cdot Q_6 & -2k_7 \cdot Q_7 & -2k_8 \cdot Q_8 & -2k_9 \cdot Q_9 & 0 & -2k_{11} \cdot Q_{11} & 0 \\ 0 & -2k_2 \cdot Q_2 & 0 & -2k_4 \cdot Q_4 & -2k_5 \cdot Q_5 + a10 & -2k_6 \cdot Q_6 & -2k_7 \cdot Q_7 & -2k_8 \cdot Q_8 & -2k_9 \cdot Q_9 & 0 & -2k_{11} \cdot Q_{11} & 0 \\ 0 & 0 & -2k_3 \cdot Q_3 & -2k_4 \cdot Q_4 & -2k_5 \cdot Q_5 + a10 & -2k_6 \cdot Q_6 & -2k_7 \cdot Q_7 & -2k_8 \cdot Q_8 & -2k_9 \cdot Q_9 & 0 & -2k_{11} \cdot Q_{11} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2k_8 \cdot Q_8 & 0 & -2k_{10} \cdot Q_{10} & -2k_{11} \cdot Q_{11} & 2k_{12} \cdot Q_{12} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2k_9 \cdot Q_9 & 2k_{10} \cdot Q_{10} & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$F \leftarrow \begin{bmatrix} Q_1 + Q_2 + Q_3 - Q_4 \\ Q_4 + Q_{12} - Q_5 \\ Q_8 + Q_{12} - Q_7 \\ Q_8 - Q_9 - Q_{10} \\ Q_{11} - Q_9 - Q_{10} \\ Q_5 - Q_6 \\ Q_6 - Q_7 \\ Z_1 - k_1 \cdot (Q_1)^2 - k_4 \cdot (Q_4)^2 - k_5 \cdot (Q_5)^2 + (a9 + a10 Q_5) - Fsb10 - k_6 \cdot (Q_6)^2 - k_7 \cdot (Q_7)^2 - Fdb10m - k_8 \cdot (Q_8)^2 - k_9 \cdot (Q_9)^2 - k_{11} \cdot (Q_{11})^2 - zmaxt \\ Z_1 - k_2 \cdot (Q_2)^2 - k_4 \cdot (Q_4)^2 - k_5 \cdot (Q_5)^2 + (a9 + a10 Q_5) - Fsb10 - k_6 \cdot (Q_6)^2 - k_7 \cdot (Q_7)^2 - Fdb10m - k_8 \cdot (Q_8)^2 - k_9 \cdot (Q_9)^2 - k_{11} \cdot (Q_{11})^2 - zmaxt \\ Z_1 - k_3 \cdot (Q_3)^2 - k_4 \cdot (Q_4)^2 - k_5 \cdot (Q_5)^2 + (a9 + a10 Q_5) - Fsb10 - k_6 \cdot (Q_6)^2 - k_7 \cdot (Q_7)^2 - Fdb10m - k_8 \cdot (Q_8)^2 - k_9 \cdot (Q_9)^2 - k_{11} \cdot (Q_{11})^2 - zmaxt \\ zvsp + k_{12} \cdot (Q_{12})^2 - k_8 \cdot (Q_8)^2 - k_{10} \cdot (Q_{10})^2 - k_{11} \cdot (Q_{11})^2 - zmaxt \\ -k_9 \cdot (Q_9)^2 + k_{10} \cdot (Q_{10})^2 \end{bmatrix}$$

$$QQ \leftarrow (-M^{-1} \cdot F) + Q$$

$$Q \leftarrow QQ$$

$$RQ \leftarrow \text{augment}(Re, f, k, Q)$$

Resultados:

	Reynolds	f	k	Q [m³/s]		Q [m³/h]	
	1	2	3	4		1	
	1	19.106	3.35	1504.936		1	52.83
	2	20.224	3.165	1343.094		2	55.92
	3	22.205	2.882	1114.176		3	61.4
	4	40.497	1.58	69.709		4	170.14
	5	81.739	0.783	694.668		5	179.04
RQ =	6	124.403	0.514	2488.8	RQ ⁽⁴⁾ · 3600 =	6	179.04
	7	103.877	0.616	1397.633		7	179.04
	8	61.535	1.04	207.024		8	170.14
	9	39.924	1.603	21590.235		9	87.45
	10	37.751	1.695	24147.653		10	82.69
	11	118.219	0.541	15957.087		11	170.14
	12	7.766	8.241	201289.813		12	8.9

Caudal Bomba

Entrada al Tanque

Caudal Retorno

Punto de operación de la bomba en servicio de la estación de bombeo del tanque n.º 10

Altura total de la bomba

$$DH_{bomba} := DPBT10C \left[\left(RQ^{(4)} \right)_5 \right] = 120.31 \text{ [mcl]}$$

$$DH_{bomba} \cdot \frac{p_{esp}}{1000} = 1173.71 \text{ [kPa]}$$

Potencia mecánica en la bomba según la gráfica del fabricante

$$P_{mecf} := PBT10C \left[DPBT10C \left[\left(RQ^{(4)} \right)_5 \right] \right] = 125.13 \text{ [kW]}$$

Esta sería la altura en metros de llenado del tanque 4 en una hora de funcionamiento con el caudal 11.

$$\frac{\left(RQ^{(4)} \right)_{11} \cdot 3600}{\pi \cdot 12.1^2} = 0.37 \text{ [m/h]}$$

Potencia hidráulica de la bomba

$$Phid := \text{dens} \cdot \text{grav} \cdot \left(RQ^{(4)} \right)_5 \cdot DH_{bomba} \cdot 0.001 = 58.37 \text{ [kW]}$$

Eficiencia calculada de la bomba

$$\text{Eficiencia} := \frac{Phid}{P_{mecf}} \cdot 100 = 46.65 \text{ [%]}$$

Potencia mecánica de la bomba

$$P_{mec} := \frac{\text{dens} \cdot \text{grav} \cdot \left(RQ^{(4)} \right)_5 \cdot DH_{bomba}}{\text{Eficiencia} \cdot 10} = 125.13 \text{ [kW]}$$

Eficiencia del motor $Em := 0.95$

$$P_{elec} := \frac{P_{mec}}{Em} = 131.72 \text{ [kW]}$$

Corriente eléctrica en el motor de la bomba

$$\text{Corrientemotor} := \frac{P_{elec} \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 460 \cdot 0.86} = 192.23 \text{ [A]}$$

Velocidad del flujo en la tubería [m/s]

	1
1	0.078
2	0.083
3	0.091
4	0.109
5	0.422
6	0.978
7	0.682
8	0.252
9	0.206
10	0.195
11	0.929
12	0.077

$$v := \frac{4RQ^{(4)}}{\pi \cdot D^2} =$$

$$k := RQ^{(3)}$$

$$q := RQ^{(4)}$$

$$n := 1 \dots 12$$

$$hf_n := k_n \cdot (q_n)^2$$

Perdidas de carga en la tubería [mcl]

	1
1	0.324
2	0.324
3	0.324
4	0.156
5	1.718
6	6.156
7	3.457
8	0.462
9	12.74
10	12.74
11	35.642
12	1.231

$$hf_n =$$

Perdidas de presión por cada tramo de tubería equivalente

$$\Delta P_n := \frac{128 \cdot \nu l \cdot \text{dens} \cdot L_n \cdot RQ_{n,4}}{\pi \cdot (D_n)^4}$$

$$\Delta P_n =$$

	1
1	3161.325
2	3161.325
3	3161.325
4	1518.985
5	16762.286
6	60054.548
7	33724.769
8	4511.097
9	124287.808
10	124287.808
11	347709.142
12	12005.355

Perdidas de Presión [Pa]

$$\frac{(hf_n \cdot \text{pesp})}{1000} =$$

	1
1	3.161
2	3.161
3	3.161
4	1.519
5	16.762
6	60.055
7	33.725
8	4.511
9	124.288
10	124.288
11	347.709
12	12.005

Perdidas de presión [kPa]

NPSH disponible > NPSH requerido

$$NPSH = h_a - h_{vap} + h_{st} - h_{fs}$$

Presión atmosférica

$$P_{atm} := 101325 \text{ [Pa]}$$

Presión de vapor del Fuel Oil #6 a 37,8 °C

$$P_{vap} := \frac{0.6 \text{ psi}}{\text{Pa}} = 4136.85 \text{ [Pa]}$$

Diferencia de altura entre nivel de líquido y succión de la bomba

$$h_{st} := Z_1 - 4.164 = 2.1 \text{ [m]}$$

NPSH disponible

$$NPSH := P_{atm} - \Delta P_1 - \Delta P_4 - \Delta P_5 - F_{sb10} \cdot p_{esp} + h_{st} \cdot p_{esp} - P_{vap} = 89298.96 \text{ [Pa]}$$

$$\frac{NPSH}{p_{esp}} = 9.15 \text{ [mcl]}$$

Cabezal mínimo de succión

$$P_{succ} := P_{atm} - \Delta P_1 - \Delta P_4 - \Delta P_5 + h_{st} \cdot p_{esp} - F_{sb10} \cdot p_{esp} - 93435.82 \text{ [Pa]}$$

$$\frac{P_{succ}}{p_{esp}} = 9.58 \text{ [mcl]}$$

Diferencia de altura entre la descarga de la bomba y el nivel de líquido en el tanque de llegada

$$h_{tanque} := z_{max} - z_{min} = 46.65 \text{ [m]}$$

Perdidas de presión en la tubería de descarga de la bomba

$$P_{desc} := \Delta P_6 + \Delta P_7 + F_{db10m} \cdot p_{esp} + \Delta P_8 + \Delta P_9 + \Delta P_{11} + h_{tanque} \cdot p_{esp} = 1145368.37 \text{ [Pa man]}$$

Diferencial de presión de la bomba o Carga total de la bomba (Descarga - Succión)

$$P_{resTotal} := P_{desc} + P_{atm} - P_{succ} = 1153257.56 \text{ [Pa]}$$

$$\frac{P_{resTotal}}{p_{esp}} = 118.22 \text{ [mcl]}$$

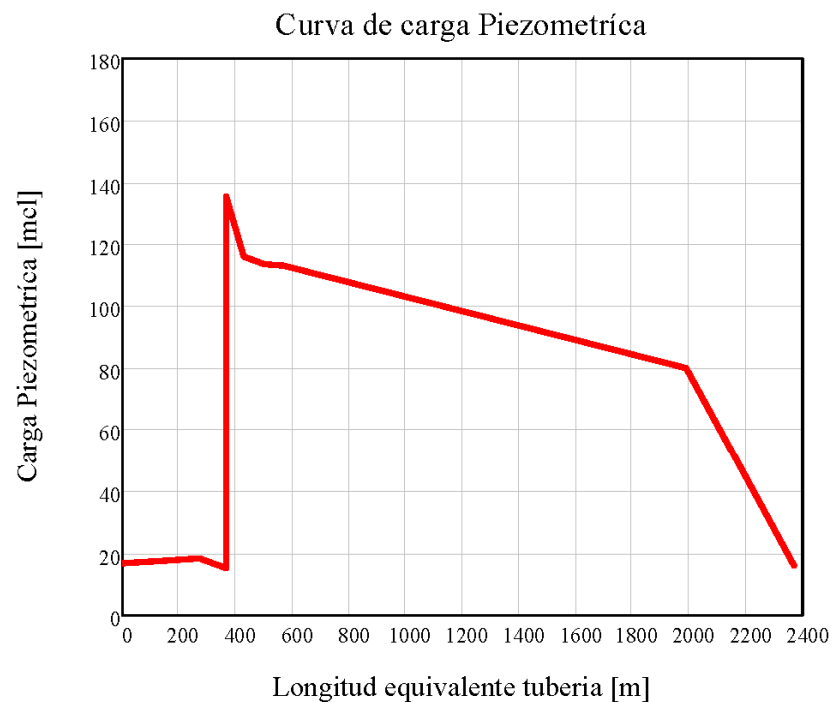
$$\frac{P_{resTotal}}{100000} = 11.53 \text{ [bar]}$$

Carga Piezométrica

$$\begin{aligned}
 CP_1 &:= \frac{Patm}{\rho \cdot g} + Z_1 & LH_1 &:= 0 \\
 CP_2 &:= CP_1 - hf_1 + (Z_1 - Z_2) = 17.482 & LH_2 &:= LH_1 + L_1 \\
 CP_3 &:= CP_2 - hf_4 + (Z_2 - Z_3) = 18.227 & LH_3 &:= LH_2 + L_4 \\
 CP_4 &:= CP_2 - hf_5 - Fsb10 + (Z_3 - Z_4) = 15.093 & LH_4 &:= LH_3 + L_5 \\
 CP_5 &:= CP_4 + DPBT10C \left[\left(RQ^{(4)} \right)_5 \right] = 135.406 & LH_5 &:= LH_4 \\
 CP_6 &:= CP_5 - hf_6 - Fdb10m - (Z_6 - Z_5) = 115.914 & LH_6 &:= LH_5 + L_6 \\
 CP_7 &:= CP_6 - hf_7 + (Z_6 - Z_7) = 113.457 & LH_7 &:= LH_6 + L_7 \\
 CP_8 &:= CP_7 - hf_8 = 112.995 & LH_8 &:= LH_7 + L_8 \\
 CP_9 &:= CP_8 - hf_9 + (Z_9 - Z_8) = 79.855 & LH_9 &:= LH_8 + L_9 \\
 CP_{10} &:= CP_9 - hf_{11} - (Z_{12} - Z_9) = 15.902 & LH_{10} &:= LH_9 + L_{11}
 \end{aligned}$$

	1
1	16.65
2	17.48
3	18.23
4	15.09
CP =	5 135.41
	6 115.91
	7 113.46
	8 112.99
	9 79.85
	10 15.9

	1
LH =	1 0
	2 151.9
	3 272.7
	4 366.3
	5 366.3
	6 428.8
	7 501
	8 568.3
	9 1989.2
	10 2370



Viscosidad cSt
 Set de la Valvula de Control
 Caudal de Retorno m3/h
 Presion total de la bomba bar
 Rata de llenado del tanque m/h
 Eficiencia de la bomba
 Corriente en el motor A

$$RQt := \begin{pmatrix} 3300 & 12 & 24.1 & 14.9 & 0.34 & 49.2 & 230.3 \\ 3300 & 11 & 38.7 & 14.2 & 0.31 & 48.2 & 224.8 \\ 3300 & 10 & 53.2 & 13.5 & 0.27 & 47.2 & 219.4 \\ 3300 & 9 & 67.8 & 12.9 & 0.24 & 46.1 & 214.0 \\ 2000 & 12 & -39.0 & 13.1 & 0.47 & 48.9 & 203.2 \\ 2000 & 11 & -15.0 & 12.4 & 0.42 & 47.8 & 197.7 \\ 2000 & 10 & 8.9 & 11.7 & 0.37 & 46.7 & 192.2 \\ 2000 & 9 & 32.8 & 11.1 & 0.32 & 45.4 & 186.7 \\ 1600 & 12 & -78.9 & 12.5 & 0.56 & 49.2 & 193.2 \\ 1600 & 11 & -49.1 & 11.9 & 0.50 & 48.1 & 187.7 \\ 1600 & 10 & -19.2 & 11.2 & 0.43 & 46.9 & 182.1 \\ 1600 & 9 & 10.6 & 10.5 & 0.37 & 45.6 & 176.6 \\ 780 & 12 & -288 & 11.4 & 1.01 & 51.8 & 166.0 \\ 780 & 11 & -227.8 & 10.7 & 0.88 & 50.6 & 160.4 \\ 780 & 10 & -166.8 & 10.1 & 0.75 & 49.4 & 154.8 \\ 780 & 9 & -105.8 & 9.4 & 0.62 & 48.0 & 149.2 \\ 650 & 12 & -370.6 & 11.2 & 1.19 & 52.8 & 160.0 \\ 650 & 11 & -297.5 & 10.5 & 1.03 & 51.7 & 154.4 \\ 650 & 10 & -224.4 & 9.9 & 0.88 & 50.4 & 148.7 \\ 650 & 9 & -151.3 & 9.2 & 0.72 & 49.0 & 143.1 \end{pmatrix}$$

$$RF := \begin{bmatrix} \text{visc} \\ ZVCT10 \\ (RQ^{(4)})_{12,3600} \\ DHbomba \cdot \frac{p_{\text{esp}}}{100000} \\ \left[\frac{(RQ^{(4)})_{11,3600}}{\pi \cdot 12.1^2} \right] \\ \text{Eficiencia} \\ \text{Corrientemotor} \end{bmatrix}$$

$$RF = \begin{pmatrix} 2000 & \text{cSt} & \text{Viscosidad cSt} \\ 10 & \text{n} & \text{Set de la Valvula de Control} \\ 8.901 & \text{m}^3/\text{h} & \text{Caudal de Retorno m3/h} \\ 11.737 & \text{[bar]} & \text{Presion total de la bomba bar} \\ 0.37 & \text{[m/h]} & \text{Rata de llenado del tanque m/h} \\ 46.649 & \text{[%]} & \text{Eficiencia de la bomba} \\ 192.235 & \text{[A]} & \text{Corriente en el motor A} \end{pmatrix}$$

$RF = \begin{pmatrix} 3300 \\ 12 \\ 24.143 \\ 14.854 \\ 0.336 \\ 49.201 \\ 230.269 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 3300 \\ 11 \\ 38.688 \\ 14.194 \\ 0.305 \\ 48.24 \\ 224.832 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 3300 \\ 10 \\ 53.233 \\ 13.534 \\ 0.274 \\ 47.222 \\ 219.395 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 3300 \\ 9 \\ 67.778 \\ 12.874 \\ 0.243 \\ 46.145 \\ 213.958 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$
$RF = \begin{pmatrix} 2000 \\ 12 \\ 38.914 \\ 13.061 \\ 0.472 \\ 48.879 \\ 203.239 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 2000 \\ 11 \\ 15.006 \\ 12.399 \\ 0.421 \\ 47.801 \\ 197.737 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 2000 \\ 10 \\ 8.901 \\ 11.737 \\ 0.37 \\ 46.649 \\ 192.235 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 2000 \\ 9 \\ 32.809 \\ 11.075 \\ 0.319 \\ 45.417 \\ 186.733 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$
$RF = \begin{pmatrix} 1600 \\ 12 \\ -78.888 \\ 12.511 \\ 0.558 \\ 49.186 \\ 193.18 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 1600 \\ 11 \\ -49.048 \\ 11.848 \\ 0.495 \\ 48.07 \\ 187.65 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 1600 \\ 10 \\ -19.209 \\ 11.185 \\ 0.431 \\ 46.874 \\ 182.119 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 1600 \\ 9 \\ 10.631 \\ 10.522 \\ 0.367 \\ 45.588 \\ 176.589 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$
$RF = \begin{pmatrix} 780 \\ 12 \\ -288.76 \\ 11.383 \\ 1.013 \\ 51.797 \\ 166.011 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 780 \\ 11 \\ -227.787 \\ 10.718 \\ 0.881 \\ 50.636 \\ 160.394 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 780 \\ 10 \\ -166.814 \\ 10.053 \\ 0.75 \\ 49.371 \\ 154.778 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 780 \\ 9 \\ -105.841 \\ 9.388 \\ 0.619 \\ 47.989 \\ 149.161 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$
$RF = \begin{pmatrix} 650 \\ 12 \\ -370.596 \\ 11.205 \\ 1.19 \\ 52.821 \\ 159.993 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 650 \\ 11 \\ -297.484 \\ 10.54 \\ 1.032 \\ 51.668 \\ 154.355 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 650 \\ 10 \\ -224.371 \\ 9.874 \\ 0.875 \\ 50.405 \\ 148.717 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 650 \\ 9 \\ -151.258 \\ 9.209 \\ 0.717 \\ 49.02 \\ 143.079 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$

Hoja de calculo en Mathcad para determinar los caudales de la red por el método de Hardy-Cross con Newton-Raphson

Primer caso: Trasegado de combustible del tanque n.º 10 a los tanques de almacenamiento diario, con dos bombas de la estacion en servicio.

Gravedad API del Fuel Oil n.º 6 $g_{API} := 10.6$

Densidad del agua $dens_{H2O} := 999.1 \text{ [kg/m}^3\text{]}$

Gravedad especifica del Fuel Oil $g_{esp} := \frac{141.5}{131.5 + g_{API}} = 0.996$

Constante gravitatoria $grav := 9.80665 \text{ [m/s}^2\text{]}$

Densidad del Fuel Oil $dens := g_{esp} \cdot dens_{H2O} = 994.881 \text{ [kg/m}^3\text{]}$

Peso especifico del Fuel Oil $p_{esp} := dens \cdot grav = 9756.454 \text{ [N/m}^3\text{]}$

- *Filtros a la succión de las bombas tanque #10*

Perdida de presión máxima admisible en el filtro (Fsb10) es de: 1 psi

$$F_{sb10} := \frac{1 \text{ psi}}{p_{esp} Pa} = 0.707 \text{ [mcl]}$$

- *Filtros a la descarga de las bombas del tanque #10*

Caída máxima de presión admisible en el filtro (Fdb10m) es de: 1,5 bar

Caída de presión máxima operacional (Fdb10m) es de: 1,2 bar

Caída de presión operacional, con el filtro limpio (Fdb10o) es de: 0,8 bar

$$F_{db10m} := \frac{1.2 \text{ bar}}{p_{esp} Pa} = 12.3 \text{ [mcl]}$$

Datos y curvas de las bombas Bornemann en la estación bombeo del tanque n.º 10

	v1	Dp	Q1	P1	v2	Q2	P2
	mm ² /s	bar	m ³ /h	kW	mm ² /s	m ³ /h	kW
BT10 :=	370	1.49	185	41.5	3300	185	78
	370	5.04	182	58.9	3300	184	97.3
	370	10	176	89.8	3300	181	124
	370	15	172	117	3300	179	151
	370	20.1	167	144	3300	176	178
	370	25	160	171	3300	173	204
	370	29.6	158	198	3300	172	229

$$\text{Visc1} := \text{BT10}^{(1)}$$

$$\text{Visc2} := \text{BT10}^{(5)}$$

$$\text{Q1_BT10} := \frac{\text{BT10}^{(3)}}{3600}$$

$$\text{Q2_BT10} := \frac{\text{BT10}^{(6)}}{3600}$$

$$\text{P1_BT10} := \text{BT10}^{(4)}$$

$$\text{P2_BT10} := \text{BT10}^{(7)}$$

$$\text{DP_BT10} := \frac{\text{BT10}^{(2)} \cdot 100000}{\text{pesp}}$$

Regresion lineal de los puntos de Caudal contra Diferencia de Presion en la Bomba a una viscosidad de 370 cSt

$$\text{BT10A} := \text{regress}(\text{Q1_BT10}, \text{DP_BT10}, 1) \quad \text{a1} := \text{BT10A}_{4,1} \quad \text{a2} := \text{BT10A}_{5,1} \quad \text{DPBT10A}(x) := \text{a1} + \text{a2}(x)$$

Regresion lineal de los puntos de Diferencia de Presion contra Potencia en la Bomba a una viscosidad de 370 cSt

$$\text{BT10C} := \text{regress}(\text{DP_BT10}, \text{P1_BT10}, 1) \quad \text{a5} := \text{BT10C}_{4,1} \quad \text{a6} := \text{BT10C}_{5,1} \quad \text{PBT10A}(x) := \text{a5} + \text{a6}(x)$$

Regresion lineal de los puntos de Caudal contra Diferencia de Presion en la Bomba a una viscosidad de 3300 cSt

$$\text{BT10B} := \text{regress}(\text{Q2_BT10}, \text{DP_BT10}, 1) \quad \text{a3} := \text{BT10B}_{4,1} \quad \text{a4} := \text{BT10B}_{5,1} \quad \text{DPBT10B}(x) := \text{a3} + \text{a4}(x)$$

Regresion lineal de los puntos de Diferencia de Presion contra Potencia en la Bomba a una viscosidad de 3300 cSt

$$\text{BT10D} := \text{regress}(\text{DP_BT10}, \text{P2_BT10}, 1) \quad \text{a7} := \text{BT10D}_{4,1} \quad \text{a8} := \text{BT10D}_{5,1} \quad \text{PBT10B}(x) := \text{a7} + \text{a8}(x)$$

Viscosidad $\text{visc} := 2000 \text{ [cSt]}$

Aproximacion a la curva de la bomba segun la viscosidad del fluido

$$\text{porc} := \frac{(\log(\text{visc}) - \log(370))}{(\log(3300) - \log(370))} = 0.771 \text{ [%]}$$

$$\text{QQQ} := (\text{Q2_BT10} - \text{Q1_BT10})\text{porc} + \text{Q1_BT10} \quad \text{Puntos de Caudal}$$

$$\text{PPP} := (\text{P2_BT10} - \text{P1_BT10})\text{porc} + \text{P1_BT10} \quad \text{Puntos de Potencia}$$

Regresion lineal de los puntos de Caudal contra Diferencia de Presion en la Bomba a una viscosidad X

$$\text{BT10E} := \text{regress}(\text{QQQ}, \text{DP_BT10}, 1) \quad \text{a9} := \text{BT10E}_{4,1} \quad \text{a10} := \text{BT10E}_{5,1} \quad \text{DPBT10C}(x) := \text{a9} + \text{a10}(x)$$

Regresion lineal de los puntos de Diferencia de Presion contra Potencia en la Bomba a una viscosidad X

$$\text{BT10F} := \text{regress}(\text{DP_BT10}, \text{PPP}, 1) \quad \text{a11} := \text{BT10F}_{4,1} \quad \text{a12} := \text{BT10F}_{5,1} \quad \text{PBT10C}(x) := \text{a11} + \text{a12}(x)$$

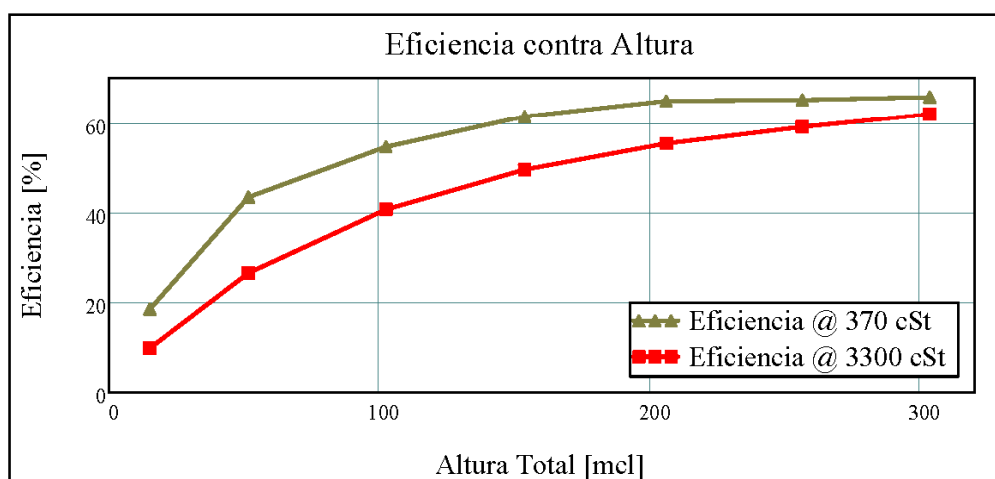
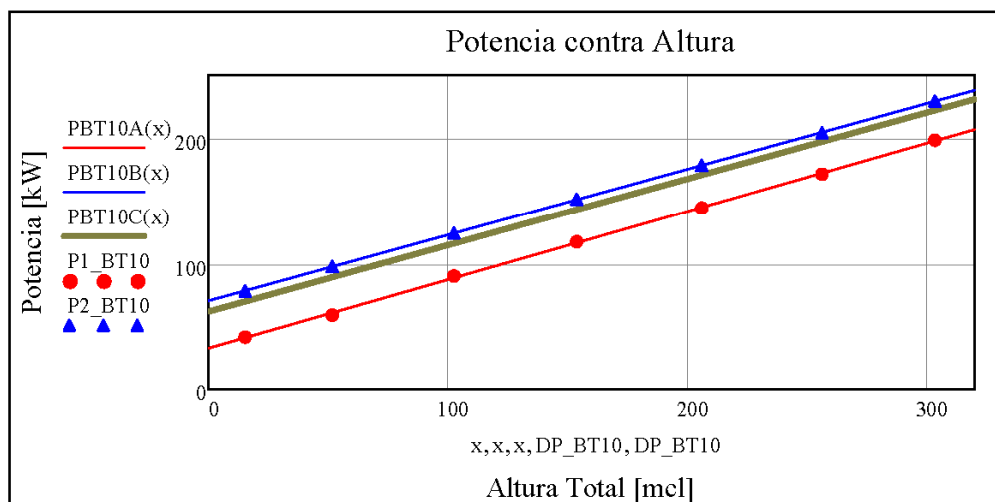
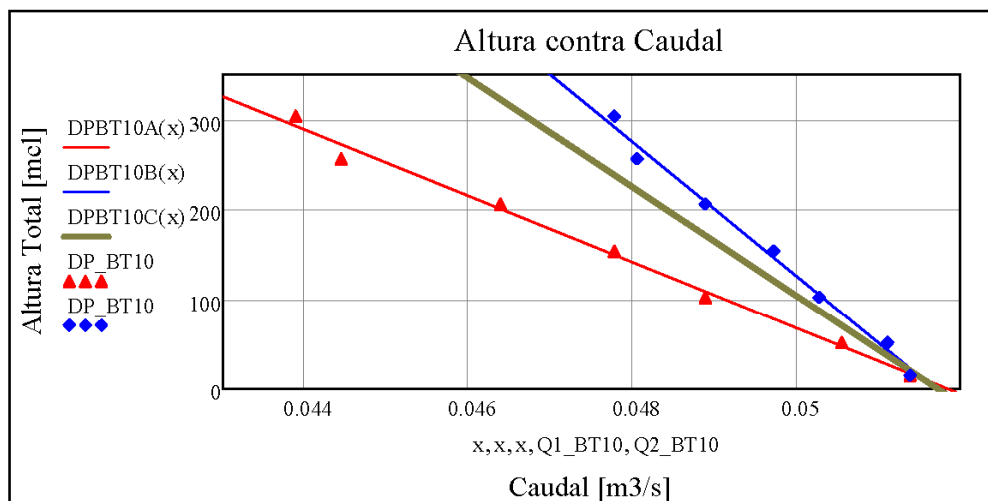
i := 1 .. 7

$$\text{Eficiencia370}_i := \frac{\text{dens} \cdot \text{grav} \cdot \text{Q1_BT10}_i \cdot \text{DP_BT10}_i}{\text{P1_BT10}_i \cdot 10}$$

Calculo de eficiencia de la bomba a 370 cSt

$$\text{Eficiencia3300}_i := \frac{\text{dens} \cdot \text{grav} \cdot \text{Q2_BT10}_i \cdot \text{DP_BT10}_i}{\text{P2_BT10}_i \cdot 10}$$

Calculo de eficiencia de la bomba a 3300 cSt



RQ:= Q ← Q

for n ∈ 1..25

for j ∈ 1..15

$$Re_j \leftarrow \frac{4Q_j}{(\pi v1 D_j)}$$

$$f_j \leftarrow \frac{64}{Re_j}$$

$$k_j \leftarrow f_j \cdot \frac{L_j \cdot 8}{(D_j)^5 \cdot \pi^2 \cdot grav}$$

$$M \leftarrow \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ -2k_1 \cdot Q_1 & 0 & 0 & -2k_4 \cdot Q_4 & -2k_5 \cdot Q_5 + a10 & -2k_6 \cdot Q_6 & -2k_7 \cdot Q_7 & -2k_8 \cdot Q_8 & -2k_9 \cdot Q_9 & 0 & -2k_{11} \cdot Q_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2k_2 \cdot Q_2 & 0 & -2k_4 \cdot Q_4 & -2k_5 \cdot Q_5 + a10 & -2k_6 \cdot Q_6 & -2k_7 \cdot Q_7 & -2k_8 \cdot Q_8 & -2k_9 \cdot Q_9 & 0 & -2k_{11} \cdot Q_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2k_3 \cdot Q_3 & -2k_4 \cdot Q_4 & -2k_5 \cdot Q_5 + a10 & -2k_6 \cdot Q_6 & -2k_7 \cdot Q_7 & -2k_8 \cdot Q_8 & -2k_9 \cdot Q_9 & 0 & -2k_{11} \cdot Q_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2k_1 \cdot Q_1 & 0 & 0 & -2k_4 \cdot Q_4 & 0 & 0 & 0 & -2k_8 \cdot Q_8 & 0 & -2k_{10} \cdot Q_{10} & -2k_{11} \cdot Q_{11} & 0 & -2k_{13} \cdot Q_{13} + a10 & -2k_{14} \cdot Q_{14} & -2k_{15} \cdot Q_{15} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2k_5 \cdot Q_5 + a10 & -2k_6 \cdot Q_6 & -2k_7 \cdot Q_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2k_{13} \cdot Q_{13} - a10 & 2k_{14} \cdot Q_{14} & 2k_{15} \cdot Q_{15} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2k_8 \cdot Q_8 & -2k_9 \cdot Q_9 & 0 & -2k_{11} \cdot Q_{11} & 2k_{12} \cdot Q_{12} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$F \leftarrow \begin{pmatrix} Q_1 + Q_2 + Q_3 - Q_4 \\ Q_4 + Q_{12} - Q_5 - Q_{13} \\ Q_8 + Q_{12} - Q_7 - Q_{15} \\ Q_8 - Q_9 - Q_{10} \\ Q_{11} - Q_9 - Q_{10} \\ Q_5 - Q_6 \\ Q_6 - Q_7 \\ Q_{13} - Q_{14} \\ Q_{14} - Q_{15} \\ Z_1 - k_1 \cdot (Q_1)^2 - k_4 \cdot (Q_4)^2 - k_5 \cdot (Q_5)^2 + (a9 + a10Q_5) - Fsb10 - k_6 \cdot (Q_6)^2 - k_7 \cdot (Q_7)^2 - Fdb10m - k_8 \cdot (Q_8)^2 - k_9 \cdot (Q_9)^2 - k_{11} \cdot (Q_{11})^2 - zmaxt \\ Z_1 - k_2 \cdot (Q_2)^2 - k_4 \cdot (Q_4)^2 - k_5 \cdot (Q_5)^2 + (a9 + a10Q_5) - Fsb10 - k_6 \cdot (Q_6)^2 - k_7 \cdot (Q_7)^2 - Fdb10m - k_8 \cdot (Q_8)^2 - k_9 \cdot (Q_9)^2 - k_{11} \cdot (Q_{11})^2 - zmaxt \\ Z_1 - k_3 \cdot (Q_3)^2 - k_4 \cdot (Q_4)^2 - k_5 \cdot (Q_5)^2 + (a9 + a10Q_5) - Fsb10 - k_6 \cdot (Q_6)^2 - k_7 \cdot (Q_7)^2 - Fdb10m - k_8 \cdot (Q_8)^2 - k_9 \cdot (Q_9)^2 - k_{11} \cdot (Q_{11})^2 - zmaxt \\ Z_1 - k_1 \cdot (Q_1)^2 - k_4 \cdot (Q_4)^2 - k_{13} \cdot (Q_{13})^2 + (a9 + a10Q_{13}) - Fsb10 - k_{14} \cdot (Q_{14})^2 - k_{15} \cdot (Q_{15})^2 - Fdb10m - k_8 \cdot (Q_8)^2 - k_{10} \cdot (Q_{10})^2 - k_{11} \cdot (Q_{11})^2 - zmaxt \\ -k_5 \cdot (Q_5)^2 - k_6 \cdot (Q_6)^2 - k_7 \cdot (Q_7)^2 + (a9 + a10Q_5) + k_{13} \cdot (Q_{13})^2 + k_{14} \cdot (Q_{14})^2 + k_{15} \cdot (Q_{15})^2 - (a9 + a10Q_{15}) \\ zvsp + k_{12} \cdot (Q_{12})^2 - k_8 \cdot (Q_8)^2 - k_9 \cdot (Q_9)^2 - k_{11} \cdot (Q_{11})^2 - zmaxt \end{pmatrix}$$

$$QQ \leftarrow (-M^{-1} \cdot F) + Q$$

$$Q \leftarrow QQ$$

RQ ← augment(Re, f, k, Q)

Metodo Hardy-Cross con NEWTON-RAPHSON
Primer Caso: Tanque n.º 10 a tanques diarios (DOS BOMBAS)

1	151.9	19.25		80
2	143.5	19.25		80
3	130.7	19.25		90
4	120.8	29.25		250
5	93.6	15.25		180
6	62.5	10.02		180
7	72.2	12		180
8	$L_w :=$ 67.3	$d :=$ 19.25	$Z :=$ 6.26	$Q_h :=$ 250
9	1420.9	15.25	5.2	130
10	1502.7	15.25	4.2	120
11	380.8	10.02	4.2	150
12	101.1	7.98	24.6	100
13	43.6	15.25	37.26	180
14	62.5	10.02	52.97	180
15	72.2	12	52.91	180
	[m]	[pulgadas]	[m]	[m³/h]

Valor de ajuste de la valvula de control

ZVCT10 := 10 [kgf/cm² man]

$$zv_{sp} := \frac{(ZVCT10 - 98066.5)}{pesp} = 100.52 \text{ [mcl]}$$

Nivel mínimo de vaciado del tanque n.º 10

zmint := 6.26 [msnm]

Nivel máximo de llenado del tanque n.º 4

zmaxt := 52.91 [msnm]

$D := d \cdot 0.0254 \text{ [m]}$

$$Q := \frac{Q_h}{3600} \text{ [m³/s]}$$

Viscosidad del fluido

$$visc = 2 \times 10^3 [\text{cSt}] \text{ ó } [\text{mm}^2/\text{s}]$$

$$\nu_1 := \frac{visc}{1000000} \text{ [m}^2/\text{s]}$$

i := 1 .. 12

j := 0

n := 0

L = longitud equivalente de tubería en metros.

d = diametro interno de la tubería en pulgadas.

Z = altura de la entrada o salida de la tubería en metros sobre el nivel del mar

Qh = valor de caudal semilla para comenzar las iteraciones en m³/h.

D = diametro en metros.

Q = valor de caudal en m³/s.

ν_1 = viscosidad en m²/s

Resultados:

	Reynolds	f	k	Q [m³/s]		Q [m³/h]	
	1	2	3	4		1	
	1	25.5704	2.5029	1124.4678		1	70.7
	2	27.0672	2.3645	1003.5414		2	74.84
	3	29.718	2.1536	832.4969		3	82.17
	4	54.1999	1.1808	52.0859		4	227.71
	5	81.2857	0.7873	698.5434		5	178.05
	6	123.7133	0.5173	2502.6841		6	178.05
RQ =	7	103.3006	0.6196	1405.4297	$RQ^{(4)} \cdot 3600 =$	7	178.05
	8	82.3557	0.7771	154.6852		8	227.71
	9	53.4329	1.1978	$1.6132 \cdot 10^4$		9	117.04
	10	50.5243	1.2667	$1.8043 \cdot 10^4$		10	110.67
	11	158.2183	0.4045	$1.1923 \cdot 10^4$		11	227.71
	12	112.0608	0.5711	$1.395 \cdot 10^4$		12	128.44
	13	81.3105	0.7871	325.2906		13	178.1
	14	123.751	0.5172	2501.9205		14	178.1
	15	103.3321	0.6194	1405.0009		15	178.1

Caudal Bomba

Entrada al Tanque

Caudal Retorno

Caudal Bomba

Punto de operación de las bombas en servicio de la estación de bombeo del tanque n.º 10

Altura total de la bomba

$$DH_{bomba} := DPBT10C \left[\left(RQ^{(4)} \right)_5 \right] = 136.94 \text{ [mcl]}$$

$$DH_{bomba} \cdot \frac{pesp}{1000} = 1335.9 \text{ [kPa]}$$

Potencia mecánica en la bomba según la gráfica del fabricante

$$P_{mecf} := PBT10C \left[DPBT10C \left[\left(RQ^{(4)} \right)_5 \right] \right] = 133.91 \text{ [kW]}$$

Esta sería la altura en metros de llenado del tanque 4 en una hora de funcionamiento con el caudal 11.

$$\frac{\left(RQ^{(4)} \right)_{11} \cdot 3600}{\pi \cdot 12.1^2} = 0.5 \text{ [m/h]}$$

Potencia hidráulica de la bomba

$$Phid := dens \cdot grav \cdot \left(RQ^{(4)} \right)_5 \cdot DH_{bomba} \cdot 0.001 = 66.07 \text{ [kW]}$$

Eficiencia calculada de la bomba

$$Eficiencia := \frac{Phid}{P_{mecf}} \cdot 100 = 49.34 \text{ [%]}$$

Potencia mecánica de la bomba

$$P_{mec} := \frac{dens \cdot grav \cdot \left(RQ^{(4)} \right)_5 \cdot DH_{bomba}}{Eficiencia \cdot 10} = 133.91 \text{ [kW]}$$

Eficiencia del motor

$$Em := 0.95$$

$$P_{elec} := \frac{P_{mec}}{Em} = 140.95 \text{ [kW]}$$

Corriente eléctrica en el motor de la bomba

$$Corrientemotor := \frac{P_{elec} \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 460 \cdot 0.86} = 205.71 \text{ [A]}$$

Velocidad del flujo en la tubería [m/s]

	1
1	0.105
2	0.111
3	0.122
4	0.146
5	0.42
6	0.972
7	0.678
8	0.337
9	0.276
10	0.261
11	1.243
12	1.106
13	0.42
14	0.972
15	0.678

$$v := \frac{4 RQ^{(4)}}{\pi \cdot D^2} =$$

$$k := RQ^{(3)}$$

$$q := RQ^{(4)}$$

$$n := 1 \dots 15$$

$$hf_n := k_n \cdot (q_n)^2$$

Perdidas de carga en la tubería [mcl]

	1
1	0.434
2	0.434
3	0.434
4	0.208
5	1.709
6	6.122
7	3.438
8	0.619
9	17.051
10	17.051
11	47.702
12	17.758
13	0.796
14	6.124
15	3.439

$$hf_n =$$

Perdidas de presión por cada tramo de tubería equivalente

$$\Delta P_n := \frac{128 \cdot \nu l \cdot \text{dens} \cdot L_n \cdot RQ_{n,4}}{\pi \cdot (D_n)^4}$$

$$\Delta P_n =$$

	1
1	4230.973
2	4230.973
3	4230.973
4	2032.94
5	16669.293
6	59721.382
7	33537.673
8	6037.446
9	1.663·10 ⁵
10	1.663·10 ⁵
11	4.654·10 ⁵
12	1.732·10 ⁵
13	7767.126
14	59739.609
15	33547.909

Perdidas de Presion [Pa]

$$\frac{(hf_n \cdot \text{pesp})}{1000} =$$

	1
1	4.231
2	4.231
3	4.231
4	2.033
5	16.669
6	59.721
7	33.538
8	6.037
9	166.341
10	166.341
11	465.358
12	173.234
13	7.767
14	59.74
15	33.548

Perdidas de presion [kPa]

NPSH disponible > NPSH requerido

$$NPSH = h_s - h_{vap} + h_s - h_{fs}$$

Presion atmosferica

$$Patm := 101325 \text{ [Pa]}$$

Presión de vapor del Fuel Oil #6 a 37.8 °C

$$P_{vap} := \frac{0.6 \text{ psi}}{\text{Pa}} = 4136.85 \text{ [Pa]}$$

Diferencia de altura entre nivel de liquido y succión de la bomba

$$hst := Z_1 - 4.164 = 2.1 \text{ [m]}$$

NPSH disponible

$$NPSH := Patm - \Delta P_1 - \Delta P_4 - \Delta P_5 - Fsb10 \cdot p_{esp} + hst \cdot p_{esp} - P_{vap} = 87808.35 \text{ [Pa]} \quad \frac{NPSH}{p_{esp}} = 9.001 \text{ [mcl]}$$

Cabezal minimo de succion

$$P_{succ} := Patm - \Delta P_1 - \Delta P_4 - \Delta P_5 + hst \cdot p_{esp} - Fsb10 \cdot p_{esp} = 91945.21 \text{ [Pa]} \quad \frac{P_{succ}}{p_{esp}} = 9.425 \text{ [mcl]}$$

Diferencia de altura entre la descarga de la bomba y el nivel de liquido en el tanque de llegada

$$htanque := z_{maxt} - z_{mint} = 46.65 \text{ [m]}$$

Perdidas de presión en la tubería de descarga de la bomba

$$P_{desc} := \Delta P_6 + \Delta P_7 + Fdb10m \cdot p_{esp} + \Delta P_8 + \Delta P_9 + \Delta P_{11} + htanque \cdot p_{esp} = 1306076.62 \text{ [Pa man]}$$

Diferencial de presión de la bomba o Carga total de la bomba (Descarga - Succión)

$$PresTotalB := P_{desc} + Patm - P_{succ} = 1315456.41 \text{ [Pa]}$$

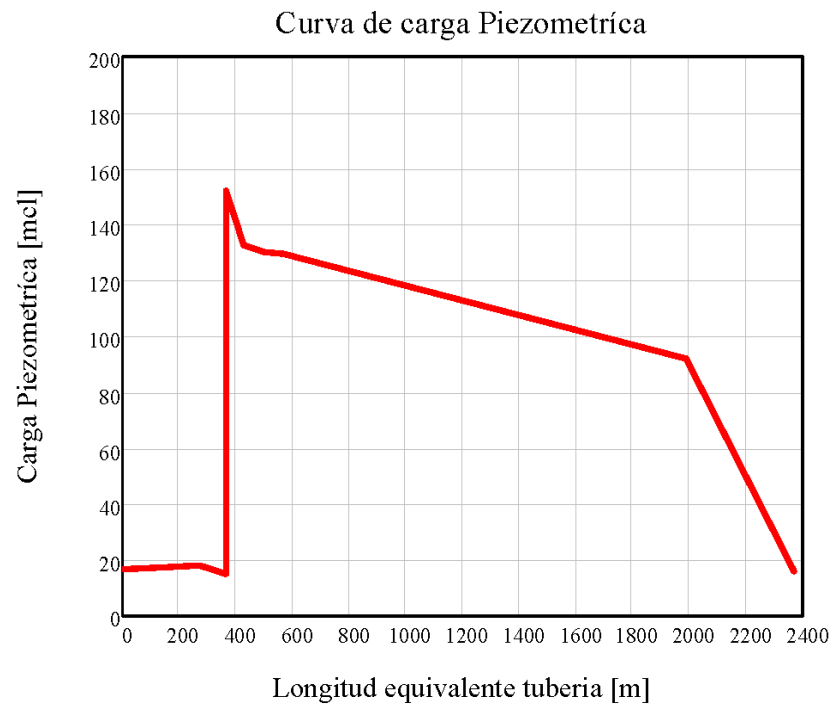
$$\frac{PresTotalB}{p_{esp}} = 134.84 \text{ [mcl]} \quad \frac{PresTotalB}{100000} = 13.15 \text{ [bar]}$$

Carga Piezométrica

$$\begin{aligned}
 CP_1 &:= \frac{Patm}{\rho \cdot g} + Z_1 & LH_1 &:= 0 \\
 CP_2 &:= CP_1 - hf_1 + (Z_1 - Z_2) = 17.373 & LH_2 &:= LH_1 + L_1 \\
 CP_3 &:= CP_2 - hf_4 + (Z_2 - Z_3) = 18.064 & LH_3 &:= LH_2 + L_4 \\
 CP_4 &:= CP_2 - hf_5 - Fsb10 + (Z_3 - Z_4) = 14.993 & LH_4 &:= LH_3 + L_5 \\
 CP_5 &:= CP_4 + DPBT10C \left[\left(RQ^{(4)} \right)_5 \right] = 151.932 & LH_5 &:= LH_4 \\
 CP_6 &:= CP_5 - hf_6 - Fdb10m - (Z_6 - Z_5) = 132.475 & LH_6 &:= LH_5 + L_6 \\
 CP_7 &:= CP_6 - hf_7 + (Z_6 - Z_7) = 130.037 & LH_7 &:= LH_6 + L_7 \\
 CP_8 &:= CP_7 - hf_8 = 129.418 & LH_8 &:= LH_7 + L_8 \\
 CP_9 &:= CP_8 - hf_9 - (Z_9 - Z_8) = 91.967 & LH_9 &:= LH_8 + L_9 \\
 CP_{10} &:= CP_9 - hf_{11} - (Z_{12} - Z_9) = 15.955 & LH_{10} &:= LH_9 + L_{11}
 \end{aligned}$$

	1
1	16.65
2	17.37
3	18.06
4	14.99
CP = 5	151.93
6	132.47
7	130.04
8	129.42
9	91.97
10	15.95

	1
1	0
2	151.9
3	272.7
4	366.3
LH = 5	366.3
6	428.8
7	501
8	568.3
9	1989.2
10	2370



Viscosidad cSt
 Set de la Valvula de Control
 Caudal de Retorno m3/h
 Presion total de la bomba bar
 Rata de llenado del tanque m/h
 Eficiencia de la bomba
 Corriente en el motor A

$$RQ_t := \begin{pmatrix} 3300 & 12 & 143.1 & 17.5 & 0.46 & 52.6 & 252.2 \\ 3300 & 11 & 157.8 & 16.9 & 0.43 & 51.8 & 246.8 \\ 3300 & 10 & 172.6 & 16.2 & 0.40 & 51.0 & 241.4 \\ 3300 & 9 & 187.4 & 15.6 & 0.37 & 50.2 & 236.0 \\ 2000 & 12 & 80.1 & 14.7 & 0.60 & 51.2 & 216.7 \\ 2000 & 11 & 104.3 & 14.0 & 0.55 & 50.3 & 211.2 \\ 2000 & 10 & 128.4 & 13.4 & 0.50 & 49.3 & 205.7 \\ 2000 & 9 & 152.6 & 12.7 & 0.44 & 48.3 & 200.2 \\ 1600 & 12 & 40.1 & 13.8 & 0.68 & 51.2 & 204.0 \\ 1600 & 11 & 70.30 & 13.1 & 0.62 & 50.2 & 198.5 \\ 1600 & 10 & 100.4 & 12.5 & 0.56 & 49.1 & 193.0 \\ 1600 & 9 & 130.5 & 11.8 & 0.50 & 48.0 & 187.5 \\ 780 & 12 & -170.0 & 12.0 & 1.14 & 52.8 & 171.3 \\ 780 & 11 & -108.6 & 11.4 & 1.0 & 51.7 & 165.7 \\ 780 & 10 & -47.3 & 10.7 & 0.88 & 50.6 & 160.1 \\ 780 & 9 & 14.1 & 10.0 & 0.74 & 49.3 & 154.5 \\ 650 & 12 & -251.9 & 11.7 & 1.31 & 53.6 & 164.4 \\ 650 & 11 & -178.4 & 11.1 & 1.16 & 52.6 & 158.8 \\ 650 & 10 & -104.9 & 10.4 & 1 & 51.4 & 153.2 \\ 650 & 9 & -31.4 & 9.7 & 0.84 & 50.1 & 147.6 \end{pmatrix}$$

$$RF := \begin{bmatrix} \text{visc} \\ ZVCT10 \\ \left(RQ^{(4)} \right)_{12} \cdot 3600 \\ DHbomba \cdot \frac{pesp}{100000} \\ \left[\frac{\left(RQ^{(4)} \right)_{11} \cdot 3600}{\pi \cdot 12.1^2} \right] \\ \text{Eficiencia} \\ \text{Corrientemotor} \end{bmatrix}$$

$$RF = \begin{pmatrix} 2000 \\ 10 \\ 128.444 \\ 13.359 \\ 0.495 \\ 49.342 \\ 205.712 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{n}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix} \begin{matrix} \text{Viscosidad cSt} \\ \text{Set de la Valvula de Control} \\ \text{Caudal de Retorno m3/h} \\ \text{Presion total de la bomba bar} \\ \text{Rata de llenado del tanque m/h} \\ \text{Eficiencia de la bomba} \\ \text{Corriente en el motor A} \end{matrix}$$

$RF = \begin{pmatrix} 3300 \\ 12 \\ 143.047 \\ 17.513 \\ 0.461 \\ 52.579 \\ 252.167 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 3300 \\ 11 \\ 157.81 \\ 16.858 \\ 0.43 \\ 51.813 \\ 246.77 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 3300 \\ 10 \\ 172.573 \\ 16.202 \\ 0.399 \\ 51.006 \\ 241.373 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 3300 \\ 9 \\ 187.335 \\ 15.547 \\ 0.369 \\ 50.154 \\ 235.976 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$
$RF = \begin{pmatrix} 2000 \\ 12 \\ 80.087 \\ 14.676 \\ 0.597 \\ 51.235 \\ 216.655 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 2000 \\ 11 \\ 104.265 \\ 14.018 \\ 0.546 \\ 50.318 \\ 211.184 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 2000 \\ 10 \\ 128.444 \\ 13.359 \\ 0.495 \\ 49.342 \\ 205.712 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 2000 \\ 9 \\ 152.622 \\ 12.701 \\ 0.444 \\ 48.3 \\ 200.24 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$
$RF = \begin{pmatrix} 1600 \\ 12 \\ 40.113 \\ 13.803 \\ 0.683 \\ 51.151 \\ 203.96 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 1600 \\ 11 \\ 70.247 \\ 13.143 \\ 0.619 \\ 50.18 \\ 198.456 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 1600 \\ 10 \\ 100.382 \\ 12.483 \\ 0.556 \\ 49.141 \\ 192.953 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 1600 \\ 9 \\ 130.516 \\ 11.823 \\ 0.492 \\ 48.029 \\ 187.449 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$
$RF = \begin{pmatrix} 780 \\ 12 \\ -169.969 \\ 12.013 \\ 1.137 \\ 52.809 \\ 171.329 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 780 \\ 11 \\ -108.625 \\ 11.35 \\ 1.006 \\ 51.741 \\ 165.729 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 780 \\ 10 \\ -47.281 \\ 10.687 \\ 0.875 \\ 50.579 \\ 160.129 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 780 \\ 9 \\ 14.064 \\ 10.024 \\ 0.744 \\ 49.312 \\ 154.529 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$
$RF = \begin{pmatrix} 650 \\ 12 \\ -251.907 \\ 11.73 \\ 1.314 \\ 53.66 \\ 164.436 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 650 \\ 11 \\ -178.404 \\ 11.066 \\ 1.157 \\ 52.588 \\ 158.813 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 650 \\ 10 \\ -104.901 \\ 10.402 \\ 1 \\ 51.416 \\ 153.189 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 650 \\ 9 \\ -31.398 \\ 9.738 \\ 0.842 \\ 50.133 \\ 147.566 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$

Hoja de calculo en Mathcad para determinar los caudales de la red por el método de Hardy-Cross con Newton-Raphson

Primer caso: Trasegado de combustible del tanque n.º 10 a los tanques de almacenamiento diario, con tres bombas de la estacion en servicio.

Gravedad API del Fuel Oil n.º 6 $g_{API} := 10.6$

Densidad del agua $dens_{H2O} := 999 \text{ [kg/m}^3\text{]}$

Gravedad especifica del Fuel Oil $g_{esp} := \frac{141.5}{131.5 + g_{API}} = 0.996$

Constante gravitatoria $grav := 9.80665 \text{ [m/s}^2\text{]}$

Densidad del Fuel Oil $dens := g_{esp} \cdot dens_{H2O} = 994.782 \text{ [kg/m}^3\text{]}$

Peso especifico del Fuel Oil $pesp := dens \cdot grav = 9755.477 \text{ [N/m}^3\text{]}$

- *Filtros a la succión de las bombas tanque #10*

Perdida de presión máxima admisible en el filtro (Fsb10) es de: 1 psi

$$F_{sb10} := \frac{1 \text{ psi}}{pesp \text{ Pa}} = 0.707 \text{ [mcl]}$$

- *Filtros a la descarga de las bombas del tanque #10*

Caída máxima de presión admisible en el filtro (Fdb10m) es de: 1,5 bar

Caída de presión máxima operacional (Fdb10m) es de: 1,2 bar

Caída de presión operacional, con el filtro limpio (Fdb10o) es de: 0,8 bar

$$F_{db10m} := \frac{1.2 \text{ bar}}{pesp \text{ Pa}} = 12.301 \text{ [mcl]}$$

Datos y curvas de las bombas Bornemann en la estación bombeo del tanque n.º 10

	v1	Dp	Q1	P1	v2	Q2	P2
	mm ² /s	bar	m ³ /h	kW	mm ² /s	m ³ /h	kW
BT10 :=	370	1.49	185	41.5	3300	185	78
	370	5.04	182	58.9	3300	184	97.3
	370	10	176	89.8	3300	181	124
	370	15	172	117	3300	179	151
	370	20.1	167	144	3300	176	178
	370	25	160	171	3300	173	204
	370	29.6	158	198	3300	172	229

$$\text{Visc1} := \text{BT10}^{(1)}$$

$$\text{Visc2} := \text{BT10}^{(5)}$$

$$\text{Q1_BT10} := \frac{\text{BT10}^{(3)}}{3600}$$

$$\text{Q2_BT10} := \frac{\text{BT10}^{(6)}}{3600}$$

$$\text{P1_BT10} := \text{BT10}^{(4)}$$

$$\text{P2_BT10} := \text{BT10}^{(7)}$$

$$\text{DP_BT10} := \frac{\text{BT10}^{(2)} \cdot 100000}{\text{pesp}}$$

Regresion lineal de los puntos de Caudal contra Diferencia de Presion en la Bomba a una viscosidad de 370 cSt

$$\text{BT10A} := \text{regress}(\text{Q1_BT10}, \text{DP_BT10}, 1) \quad \text{a1} := \text{BT10A}_{4,1} \quad \text{a2} := \text{BT10A}_{5,1} \quad \text{DPBT10A}(x) := \text{a1} + \text{a2}(x)$$

Regresion lineal de los puntos de Diferencia de Presion contra Potencia en la Bomba a una viscosidad de 370 cSt

$$\text{BT10C} := \text{regress}(\text{DP_BT10}, \text{P1_BT10}, 1) \quad \text{a5} := \text{BT10C}_{4,1} \quad \text{a6} := \text{BT10C}_{5,1} \quad \text{PBT10A}(x) := \text{a5} + \text{a6}(x)$$

Regresion lineal de los puntos de Caudal contra Diferencia de Presion en la Bomba a una viscosidad de 3300 cSt

$$\text{BT10B} := \text{regress}(\text{Q2_BT10}, \text{DP_BT10}, 1) \quad \text{a3} := \text{BT10B}_{4,1} \quad \text{a4} := \text{BT10B}_{5,1} \quad \text{DPBT10B}(x) := \text{a3} + \text{a4}(x)$$

Regresion lineal de los puntos de Diferencia de Presion contra Potencia en la Bomba a una viscosidad de 3300 cSt

$$\text{BT10D} := \text{regress}(\text{DP_BT10}, \text{P2_BT10}, 1) \quad \text{a7} := \text{BT10D}_{4,1} \quad \text{a8} := \text{BT10D}_{5,1} \quad \text{PBT10B}(x) := \text{a7} + \text{a8}(x)$$

Viscosidad $\text{visc} := 2000 \text{ [cSt]}$

Aproximacion a la curva de la bomba segun la viscosidad del fluido

$$\text{porc} := \frac{(\log(\text{visc}) - \log(370))}{(\log(3300) - \log(370))} = 0.771 \text{ [%]}$$

$$\text{QQQ} := (\text{Q2_BT10} - \text{Q1_BT10})\text{porc} + \text{Q1_BT10} \quad \text{Puntos de Caudal}$$

$$\text{PPP} := (\text{P2_BT10} - \text{P1_BT10})\text{porc} + \text{P1_BT10} \quad \text{Puntos de Potencia}$$

Regresion lineal de los puntos de Caudal contra Diferencia de Presion en la Bomba a una viscosidad X

$$\text{BT10E} := \text{regress}(\text{QQQ}, \text{DP_BT10}, 1) \quad \text{a9} := \text{BT10E}_{4,1} \quad \text{a10} := \text{BT10E}_{5,1} \quad \text{DPBT10C}(x) := \text{a9} + \text{a10}(x)$$

Regresion lineal de los puntos de Diferencia de Presion contra Potencia en la Bomba a una viscosidad X

$$\text{BT10F} := \text{regress}(\text{DP_BT10}, \text{PPP}, 1) \quad \text{a11} := \text{BT10F}_{4,1} \quad \text{a12} := \text{BT10F}_{5,1} \quad \text{PBT10C}(x) := \text{a11} + \text{a12}(x)$$

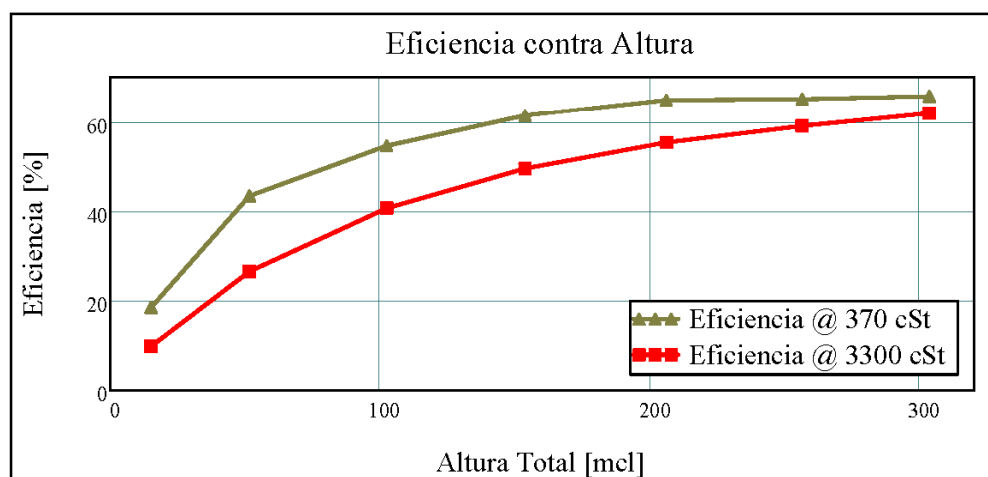
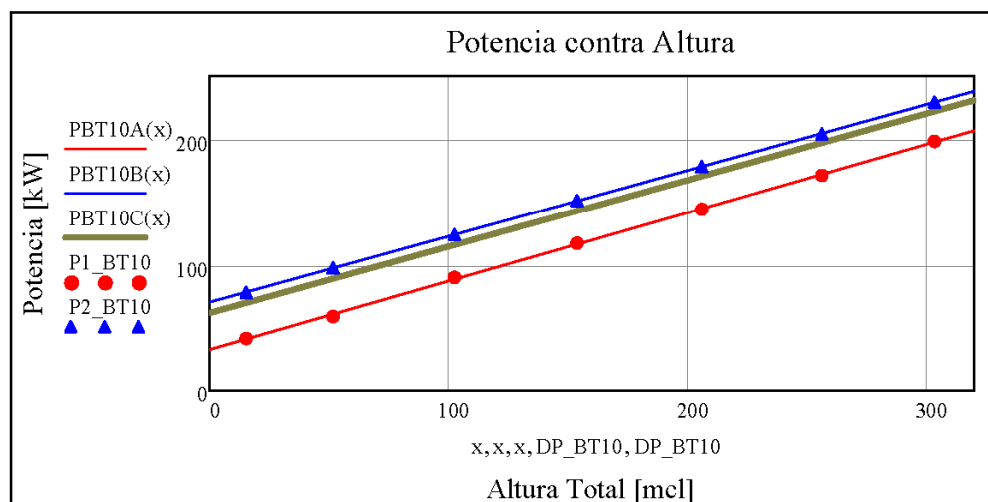
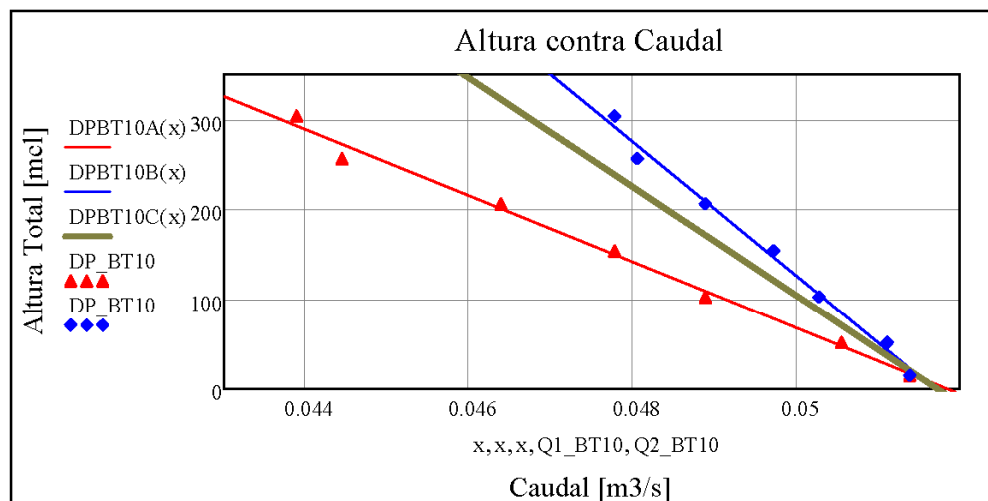
i := 1 .. 7

$$\text{Eficiencia370}_i := \frac{\text{dens} \cdot \text{grav} \cdot \text{Q1_BT10}_i \cdot \text{DP_BT10}_i}{\text{P1_BT10}_i \cdot 10}$$

Calculo de eficiencia de la bomba a 370 cSt

$$\text{Eficiencia3300}_i := \frac{\text{dens} \cdot \text{grav} \cdot \text{Q2_BT10}_i \cdot \text{DP_BT10}_i}{\text{P2_BT10}_i \cdot 10}$$

Calculo de eficiencia de la bomba a 3300 cSt



Metodo Hardy-Cross con NEWTON-RAPHSON
Primer Caso: Tanque n.º 10 a tanques diarios (TRES BOMBAS)

1	151.9	19.25		100
2	143.5	19.25		100
3	130.7	19.25		110
4	120.8	29.25		310
5	93.6	15.25	6.26	180
6	62.5	10.02	5.1	180
7	72.2	12	4.2	180
8	67.3	19.25	4.164	310
9	1420.9	15.25	4.164	160
10	1502.7	15.25	5.2	150
11	380.8	10.02	4.2	310
12	101.1	7.98	24.6	220
13	43.6	15.25	37.26	180
14	62.5	10.02	52.97	180
15	72.2	12	52.91	180
16	93.6	15.25		180
17	62.5	10.02		180
18	72.2	12		180
	[m]	[pulgadas]	[m]	[m³/h]

Valor de ajuste de la valvula de control

$$ZVCT10 := 10 \text{ [kgf/cm}^2 \text{ man]}$$

$$zvsp := \frac{(ZVCT10 \cdot 98066.5)}{pesp} = 100.52 \text{ [mcl]}$$

Nivel mínimo de vaciado del tanque n.º 10

$$zmint := 6.26 \text{ [msnm]}$$

Nivel máximo de llenado del tanque n.º 4

$$zmaxt := 52.91 \text{ [msnm]}$$

$$D := d \cdot 0.0254 \text{ [m]}$$

$$Q := \frac{Qh}{3600} \text{ [m}^3\text{/s]}$$

Viscosidad del fluido

$$visc = 2000 \text{ [cSt] ó [mm}^2\text{/s]}$$

$$\nu 1 := \frac{visc}{1000000} \text{ [m}^2\text{/s]}$$

$$i := 1 \dots 12$$

$$j := 0$$

$$n := 0$$

L = longitud equivalente de tubería en metros.

d = diametro interno de la tubería en pulgadas.

Z = altura de la entrada o salida de la tubería en metros sobre el nivel del mar

Qh = valor de caudal semilla para comenzar las iteraciones en m³/h.

D = diametro en metros.

Q = valor de caudal en m³/s.

ν1 = viscosidad en m²/s

RQ= Q←Q

for n ∈ 1..50

for j ∈ 1..18

$$Re_j \leftarrow \frac{4Q_j}{(\pi v1D_j)}$$

$$f_j \leftarrow \frac{64}{Re_j}$$

$$k_j \leftarrow f_j \cdot \frac{L_j \cdot 8}{(D_j)^5 \cdot \pi \cdot \text{grav}}$$

$$M \leftarrow \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ -2k_1Q_1 & 0 & 0 & -2k_4Q_4 & -2k_5Q_5 + a10 & -2k_6Q_6 & -2k_7Q_7 & -2k_8Q_8 & -2k_9Q_9 & 0 & -2k_{11}Q_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2k_2Q_2 & 0 & -2k_4Q_4 & -2k_5Q_5 + a10 & -2k_6Q_6 & -2k_7Q_7 & -2k_8Q_8 & -2k_9Q_9 & 0 & -2k_{11}Q_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2k_3Q_3 & -2k_4Q_4 & -2k_5Q_5 + a10 & -2k_6Q_6 & -2k_7Q_7 & -2k_8Q_8 & -2k_9Q_9 & 0 & -2k_{11}Q_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2k_1Q_1 & 0 & 0 & -2k_4Q_4 & 0 & 0 & 0 & -2k_8Q_8 & 0 & -2k_{10}Q_{10} & -2k_{11}Q_{11} & 0 & -2k_{13}Q_{13} + a10 & -2k_{14}Q_{14} & -2k_{15}Q_{15} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2k_5Q_5 + a10 & -2k_6Q_6 & -2k_7Q_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2k_{13}Q_{13} - a10 & 2k_{14}Q_{14} & 2k_{15}Q_{15} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2k_8Q_8 & -2k_9Q_9 & 0 & -2k_{11}Q_{11} & 2k_{12}Q_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2k_1Q_1 & 0 & 0 & -2k_4Q_4 & 0 & 0 & 0 & -2k_8Q_8 & 0 & -2k_{10}Q_{10} & -2k_{11}Q_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & -2k_{16}Q_{16} + a10 & -2k_{17}Q_{17} & -2k_{18}Q_{18} & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$F \leftarrow \begin{pmatrix} Q_1 + Q_2 + Q_3 - Q_4 \\ Q_4 + Q_{12} - Q_5 - Q_{13} - Q_{16} \\ Q_8 + Q_{12} - Q_7 - Q_{15} - Q_{18} \\ Q_8 - Q_9 - Q_{10} \\ Q_{11} - Q_9 - Q_{10} \\ Q_5 - Q_6 \\ Q_6 - Q_7 \\ Q_{13} - Q_{14} \\ Q_{14} - Q_{15} \\ Q_{16} - Q_{17} \\ Q_{17} - Q_{18} \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} & Z_1 - k_1(Q_1)^2 - k_4(Q_4)^2 - k_5(Q_5)^2 + (a9 + a10Q_5) - Fsb10 - k_6(Q_6)^2 - k_7(Q_7)^2 - Fdb10m \cdot k_8(Q_8)^2 - k_9(Q_9)^2 - k_{11}(Q_{11})^2 - zmaxt \\ & Z_1 - k_2(Q_2)^2 - k_4(Q_4)^2 - k_5(Q_5)^2 + (a9 + a10Q_5) - Fsb10 - k_6(Q_6)^2 - k_7(Q_7)^2 - Fdb10m \cdot k_8(Q_8)^2 - k_9(Q_9)^2 - k_{11}(Q_{11})^2 - zmaxt \\ & Z_1 - k_3(Q_3)^2 - k_4(Q_4)^2 - k_5(Q_5)^2 + (a9 + a10Q_5) - Fsb10 - k_6(Q_6)^2 - k_7(Q_7)^2 - Fdb10m \cdot k_8(Q_8)^2 - k_9(Q_9)^2 - k_{11}(Q_{11})^2 - zmaxt \\ & Z_1 - k_1(Q_1)^2 - k_4(Q_4)^2 - k_{13}(Q_{13})^2 + (a9 + a10Q_{13}) - Fsb10 - k_{14}(Q_{14})^2 - k_{15}(Q_{15})^2 - Fdb10m \cdot k_8(Q_8)^2 - k_{10}(Q_{10})^2 - k_{11}(Q_{11})^2 - zmaxt \\ & \quad - k_5(Q_5)^2 - k_6(Q_6)^2 - k_7(Q_7)^2 + (a9 + a10Q_5) + k_{13}(Q_{13})^2 + k_{14}(Q_{14})^2 + k_{15}(Q_{15})^2 - (a9 + a10Q_{13}) \\ & \quad zvsp + k_{12}(Q_{12})^2 - k_8(Q_8)^2 - k_9(Q_9)^2 - k_{11}(Q_{11})^2 - zmaxt \\ & Z_1 - k_1(Q_1)^2 - k_4(Q_4)^2 - k_{16}(Q_{16})^2 + (a9 + a10Q_{16}) - Fsb10 - k_{17}(Q_{17})^2 - k_{18}(Q_{18})^2 - Fdb10m \cdot k_8(Q_8)^2 - k_{10}(Q_{10})^2 - k_{11}(Q_{11})^2 - zmaxt \end{aligned}$$

$$QQ \leftarrow (-M^{-1} \cdot F) + Q$$

$$Q \leftarrow QQ$$

RQ←augment(Ref,k,Q)

Resultados:

	Reynolds	f	k	Q [m³/s]		Q [m³/h]	
	1	2	3	4		1	
	1	31.962	2.002	899.612		1	88.37
	2	33.833	1.892	802.867		2	93.55
	3	37.146	1.723	666.025		3	102.71
	4	67.747	0.945	41.67		4	284.62
	5	80.837	0.792	702.418		5	177.07
	6	123.031	0.52	2516.565		6	177.07
	7	102.731	0.623	1413.225		7	177.07
	8	102.94	0.622	123.753		8	284.62
RQ =	9	66.788	0.958	12906.082	RQ ⁽⁴⁾ ·3600 =	9	146.29
	10	63.153	1.013	14434.839		10	138.33
	11	197.765	0.324	9538.732		11	284.62
	12	215.173	0.297	7264.892		12	246.63
	13	80.862	0.791	327.095		13	177.12
	14	123.068	0.52	2515.797		14	177.12
	15	102.762	0.623	1412.794		15	177.12
	16	80.837	0.792	702.418		16	177.07
	17	123.031	0.52	2516.565		17	177.07
	18	102.731	0.623	1413.225		18	177.07

Punto de operación de las bombas en servicio de la estación de bombeo del tanque n.º 10

Altura total de la bomba

$$DH_{bomba} := DPBT10C \left[\left(RQ^{(4)} \right)_5 \right] = 153.38 \text{ [mcl]}$$

$$DH_{bomba} \cdot \frac{p_{esp}}{1000} = 1496.28 \text{ [kPa]}$$

Potencia mecánica en la bomba según la gráfica del fabricante

$$P_{mecf} := PBT10C \left[DPBT10C \left[\left(RQ^{(4)} \right)_5 \right] \right] = 142.58 \text{ [kW]}$$

Esta sería la altura en metros de llenado del tanque 4 en una hora de funcionamiento con el caudal 11.

$$\frac{\left(RQ^{(4)} \right)_{11} \cdot 3600}{\pi \cdot 12.1^2} = 0.619 \text{ [m/h]}$$

Potencia hidráulica de la bomba

$$Phid := \text{dens} \cdot \text{grav} \cdot \left(RQ^{(4)} \right)_5 \cdot DH_{bomba} \cdot 0.001 = 73.59 \text{ [kW]}$$

Eficiencia calculada de la bomba

$$\text{Eficiencia} := \frac{Phid}{P_{mecf}} \cdot 100 = 51.62 \text{ [%]}$$

Potencia mecánica de la bomba

$$P_{mec} := \frac{\text{dens} \cdot \text{grav} \cdot \left(RQ^{(4)} \right)_5 \cdot DH_{bomba}}{\text{Eficiencia} \cdot 10} = 142.58 \text{ [kW]}$$

Eficiencia del motor $Em := 0.95$

$$P_{elec} := \frac{P_{mec}}{Em} = 150.084 \text{ [kW]}$$

Corriente eléctrica en el motor de la bomba

$$\text{Corrientemotor} := \frac{P_{elec} \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 460 \cdot 0.86} = 219.04 \text{ [A]}$$

Velocidad del flujo en la tubería [m/s]

Perdidas de carga en la tubería [mcl]

$$v := \frac{4RQ^{(4)}}{\pi \cdot D^2}$$

v =

	1
1	0.131
2	0.138
3	0.152
4	0.182
5	0.417
6	0.967
7	0.674
8	0.421
9	0.345
10	0.326
11	1.554
12	2.123
13	0.418
14	0.967
15	0.674
16	0.417
17	0.967
18	0.674

$$k := RQ^{(3)}$$

$$q := RQ^{(4)}$$

$$n := 1 \dots 18$$

$$hf_n := k_n \cdot (q_n)^2$$

hf_n =

	1
1	0.542
2	0.542
3	0.542
4	0.26
5	1.699
6	6.088
7	3.419
8	0.774
9	21.313
10	21.313
11	59.625
12	34.097
13	0.792
14	6.09
15	3.42
16	1.699
17	6.088
18	3.419

Perdidas de presión por cada tramo de tubería equivalente

$$\Delta P_n := \frac{128 \cdot \nu l \cdot \text{dens} \cdot L_n \cdot RQ_{n,4}}{\pi \cdot (D_n)^4}$$

ΔP_n =

	1
1	5288.496
2	5288.496
3	5288.496
4	2541.069
5	16577.348
6	59391.967
7	33352.684
8	7546.493
9	2.079·10 ⁵
10	2.079·10 ⁵
11	5.817·10 ⁵
12	3.326·10 ⁵
13	7724.284
14	59410.094
15	33362.864
16	16577.348
17	59391.967
18	33352.684

Perdidas de Presion [Pa]

$$\frac{(hf_n \cdot \text{pesp})}{1000} =$$

	1
1	5.288
2	5.288
3	5.288
4	2.541
5	16.577
6	59.392
7	33.353
8	7.546
9	207.918
10	207.918
11	581.673
12	332.635
13	7.724
14	59.41
15	33.363
16	16.577
17	59.392
18	33.353

Perdidas de presion [kPa]

NPSH disponible > NPSH requerido

$$NPSH = h_a - h_{vap} + h_{st} - h_{fs}$$

Presion atmosferica

$$Patm := 101325 \text{ [Pa]}$$

Presión de vapor del Fuel Oil #6 a 37.8 °C

$$Pvap := \frac{0.6 \text{ psi}}{\text{Pa}} = 4136.85 \text{ [Pa]}$$

Diferencia de altura entre nivel de liquido y succión de la bomba

$$hst := Z_1 - 4.164 = 2.1 \text{ [m]}$$

NPSH disponible

$$NPSH := Patm - \Delta P_1 - \Delta P_4 - \Delta P_5 - Fsb10 \cdot p_{esp} + hst \cdot p_{esp} - P_{vap} = 86333.96 \text{ [Pa]}$$

$$\frac{NPSH}{p_{esp}} = 8.85 \text{ [mcl]}$$

Cabezal minimo de succion

$$P_{succ} := Patm - \Delta P_1 - \Delta P_4 - \Delta P_5 + hst \cdot p_{esp} - Fsb10 \cdot p_{esp} = 90470.81 \text{ [Pa]}$$

$$\frac{P_{succ}}{p_{esp}} = 9.27 \text{ [mcl]}$$

Diferencia de altura entre la descarga de la bomba y el nivel de liquido en el tanque de llegada

$$htanque := z_{max} - z_{min} = 46.65 \text{ [m]}$$

Perdidas de presión en la tubería de descarga de la bomba

$$P_{desc} := \Delta P_6 + \Delta P_7 + Fdb10m \cdot p_{esp} + \Delta P_8 + \Delta P_9 + \Delta P_{11} + htanque \cdot p_{esp} = 1464975.12 \text{ [Pa man]}$$

Diferencial de presión de la bomba o Carga total de la bomba (Descarga - Succión)

$$PresTotalB := P_{desc} + Patm - P_{succ} = 1475829.31 \text{ [Pa]}$$

$$\frac{PresTotalB}{p_{esp}} = 151.28 \text{ [mcl]}$$

$$\frac{PresTotalB}{100000} = 14.76 \text{ [bar]}$$

Carga Piezometrica

$$CP_1 := \frac{Patm}{\rho \cdot g} + Z_1$$

$$LH_1 := 0$$

$$CP_2 := CP_1 - hf_1 + (Z_1 - Z_2) = 17.264$$

$$LH_2 := LH_1 + L_1$$

$$CP_3 := CP_2 - hf_4 + (Z_2 - Z_3) = 17.904$$

$$LH_3 := LH_2 + L_4$$

$$CP_4 := CP_2 - hf_5 - Fsb10 + (Z_3 - Z_4) = 14.894$$

$$LH_4 := LH_3 + L_5$$

$$CP_5 := CP_4 + DPBT10C \left[\left(RQ^{(4)} \right)_5 \right] = 168.272$$

$$LH_5 := LH_4$$

$$CP_6 := CP_5 - hf_6 - Fdb10m - (Z_6 - Z_5) = 148.848$$

$$LH_6 := LH_5 + L_6$$

$$CP_7 := CP_6 - hf_7 + (Z_6 - Z_7) = 146.429$$

$$LH_7 := LH_6 + L_7$$

$$CP_8 := CP_7 - hf_8 = 145.655$$

$$LH_8 := LH_7 + L_8$$

$$CP_9 := CP_8 - hf_9 - (Z_9 - Z_8) = 103.942$$

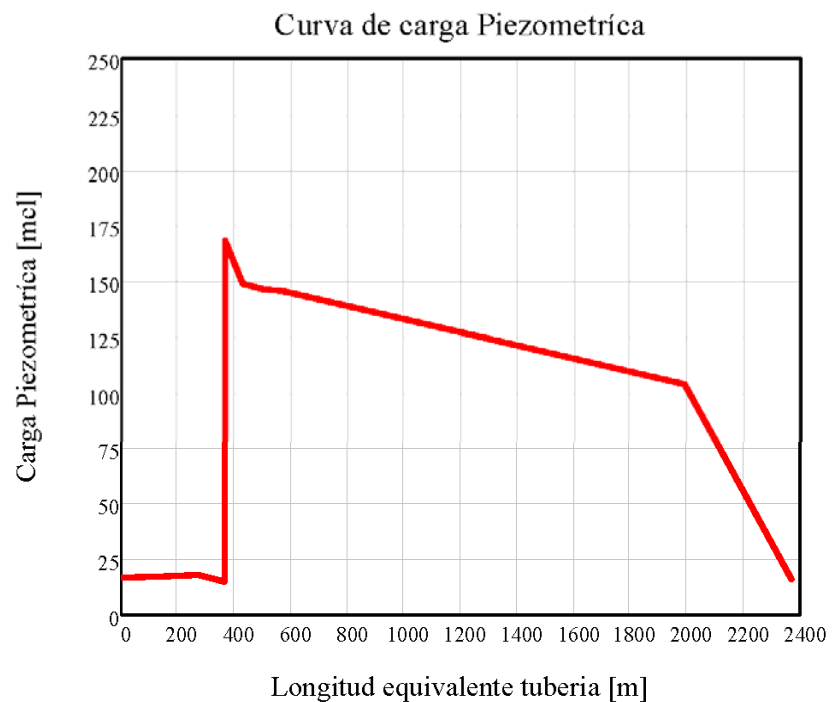
$$LH_9 := LH_8 + L_9$$

$$CP_{10} := CP_9 - hf_{11} - (Z_{12} - Z_9) = 16.007$$

$$LH_{10} := LH_9 + L_{11}$$

	1
1	16.65
2	17.26
3	17.9
4	14.89
CP =	5 168.27
	6 148.85
	7 146.43
	8 145.66
	9 103.94
	10 16.01

	1
1	0
2	151.9
3	272.7
4	366.3
LH =	5 366.3
	6 428.8
	7 501
	8 568.3
	9 1989.2
	10 2370



Viscosidad cSt
 Set de la Valvula de Control
 Caudal de Retorno m3/h
 Presion total de la bomba bar
 Rata de llenado del tanque m/h
 Eficiencia de la bomba
 Corriente en el motor A

$$RQt := \begin{pmatrix} 3300 & 12 & 260.2 & 20.1 & 0.58 & 55.3 & 273.7 \\ 3300 & 11 & 275.1 & 19.5 & 0.55 & 54.7 & 268.4 \\ 3300 & 10 & 290.1 & 18.8 & 0.52 & 54.0 & 263.0 \\ 3300 & 9 & 305.1 & 18.2 & 0.49 & 53.3 & 257.7 \\ 2000 & 12 & 197.7 & 16.3 & 0.72 & 53.2 & 230.0 \\ 2000 & 11 & 222.2 & 15.6 & 0.67 & 52.5 & 224.5 \\ 2000 & 10 & 246.6 & 15.0 & 0.62 & 51.6 & 219.0 \\ 2000 & 9 & 271.1 & 14.3 & 0.57 & 50.7 & 213.6 \\ 1600 & 12 & 158.0 & 15.1 & 0.81 & 52.9 & 214.6 \\ 1600 & 11 & 188.4 & 14.4 & 0.74 & 52.0 & 209.2 \\ 1600 & 10 & 218.8 & 13.8 & 0.68 & 51.0 & 203.7 \\ 1600 & 9 & 249.2 & 13.1 & 0.62 & 50.1 & 198.2 \\ 780 & 12 & -51.9 & 12.6 & 1.26 & 53.7 & 176.6 \\ 780 & 11 & 9.8 & 12.0 & 1.13 & 52.8 & 171.0 \\ 780 & 10 & 71.5 & 11.3 & 1.0 & 51.7 & 165.5 \\ 780 & 9 & 133.2 & 10.7 & 0.87 & 50.5 & 159.9 \\ 650 & 12 & -133.9 & 12.3 & 1.44 & 54.4 & 168.9 \\ 650 & 11 & -60.0 & 11.6 & 1.28 & 53.4 & 163.3 \\ 650 & 10 & 13.9 & 10.9 & 1.12 & 52.4 & 157.6 \\ 650 & 9 & 87.8 & 10.3 & 0.97 & 51.2 & 152.0 \end{pmatrix}$$

$$RF := \begin{bmatrix} \text{visc} \\ ZVCT10 \\ (RQ^{(4)})_{12} \cdot 3600 \\ DHbomba \cdot \frac{pesp}{100000} \\ \frac{(RQ^{(4)})_{11} \cdot 3600}{\pi \cdot 12.1^2} \\ \text{Eficiencia} \\ \text{Corrientemotor} \end{bmatrix}$$

$$RF = \begin{pmatrix} 2000 \\ 10 \\ 246.631 \\ 14.963 \\ 0.619 \\ 51.616 \\ 219.037 \end{pmatrix} \begin{matrix} \text{cSt} \\ \eta \\ \text{m}^3/\text{h} \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix} \begin{matrix} \text{Viscosidad cSt} \\ \text{Set de la Valvula de Control} \\ \text{Caudal de Retorno m}^3/\text{h} \\ \text{Presion total de la bomba bar} \\ \text{Rata de llenado del tanque m/h} \\ \text{Eficiencia de la bomba} \\ \text{Corriente en el motor A} \end{matrix}$$

$RF = \begin{pmatrix} 3300 \\ 12 \\ 260.162 \\ 20.132 \\ 0.583 \\ 55.27 \\ 273.736 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 3300 \\ 11 \\ 275.139 \\ 19.481 \\ 0.553 \\ 54.652 \\ 268.379 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 3300 \\ 10 \\ 290.116 \\ 18.831 \\ 0.522 \\ 54.002 \\ 263.022 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 3300 \\ 9 \\ 305.093 \\ 18.18 \\ 0.492 \\ 53.318 \\ 257.664 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$
$RF = \begin{pmatrix} 2000 \\ 12 \\ 197.739 \\ 16.273 \\ 0.72 \\ 53.235 \\ 229.92 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 2000 \\ 11 \\ 222.185 \\ 15.618 \\ 0.669 \\ 52.451 \\ 224.479 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 2000 \\ 10 \\ 246.631 \\ 14.963 \\ 0.619 \\ 51.616 \\ 219.037 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 2000 \\ 9 \\ 271.077 \\ 14.308 \\ 0.568 \\ 50.729 \\ 213.596 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$
$RF = \begin{pmatrix} 1600 \\ 12 \\ 157.941 \\ 15.083 \\ 0.806 \\ 52.858 \\ 214.635 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 1600 \\ 11 \\ 188.367 \\ 14.426 \\ 0.743 \\ 52.009 \\ 209.157 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 1600 \\ 10 \\ 218.792 \\ 13.769 \\ 0.68 \\ 51.103 \\ 203.68 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 1600 \\ 9 \\ 249.218 \\ 13.113 \\ 0.616 \\ 50.134 \\ 198.203 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$
$RF = \begin{pmatrix} 780 \\ 12 \\ -51.898 \\ 12.639 \\ 1.261 \\ 53.739 \\ 176.616 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 780 \\ 11 \\ 9.815 \\ 11.978 \\ 1.13 \\ 52.755 \\ 171.033 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 780 \\ 10 \\ 71.528 \\ 11.317 \\ 0.999 \\ 51.685 \\ 165.449 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 780 \\ 9 \\ 133.242 \\ 10.656 \\ 0.869 \\ 50.522 \\ 159.865 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$
$RF = \begin{pmatrix} 650 \\ 12 \\ -133.849 \\ 12.251 \\ 1.438 \\ 54.438 \\ 168.856 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 650 \\ 11 \\ -59.958 \\ 11.589 \\ 1.281 \\ 53.441 \\ 163.247 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 650 \\ 10 \\ 13.934 \\ 10.927 \\ 1.124 \\ 52.352 \\ 157.639 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$	$RF = \begin{pmatrix} 650 \\ 9 \\ 87.826 \\ 10.265 \\ 0.967 \\ 51.161 \\ 152.03 \end{pmatrix} \begin{matrix} [\text{cSt}] \\ [\text{m}] \\ [\text{m}^3/\text{h}] \\ [\text{bar}] \\ [\text{m}/\text{h}] \\ [\%] \\ [\text{A}] \end{matrix}$

Hoja de calculo en Mathcad para determinar los caudales de la red por el método de Hardy-Cross

Segundo caso: Bombeo de combustible del Tanque n.º 10 a las calderas de la unidades 7, 8 y 9, con dos bombas de la estación en servicio.

Gravedad API Fuel Oil #6

$$\begin{aligned} g_{API} &:= 10.6 & dens_{H_2O} &:= 999 \text{ [kg/m}^3\text{]} & g_{esp} &:= \frac{141.5}{131.5 + g_{API}} = 0.9958 \\ dens &:= g_{esp} \cdot dens_{H_2O} = 994.78 \text{ [kg/m}^3\text{]} & grav &:= 9.80665 \text{ [m/s}^2\text{]} & p_{esp} &:= dens \cdot grav = 9755.48 \text{ [N/m}^3\text{]} \end{aligned}$$

- *Filtros a la succión de las bombas tanque #10*

Perdida de presión máxima admisible en el filtro (Fsb10) es de: 1 psi

$$F_{sb10} := \frac{1 \text{ psi}}{p_{esp} \text{ Pa}} = 0.71 \text{ [mcl]}$$

- *Filtros a la descarga de las bombas del tanque #10*

Caída máxima de presión admisible en el filtro (Fdb10m) es de: 1,5 bar

Caída de presión máxima operacional (Fdb10m) es de: 1,2 bar

Caída de presión con el filtro limpio (Fdb10o) es de: 0,8 bar

$$F_{db10m} := \frac{1.2 \text{ bar}}{p_{esp} \text{ Pa}} = 12.3 \text{ [mcl]}$$

- *Filtros a la succión de las bombas de alta presión de la caldera*

Perdida de presión en el filtro con la malla tapada en un 70% (Fsbc) es de: 0,2 kg/cm²

$$F_{sbc} := \frac{\left(0.2 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}\right)}{p_{esp} \text{ Pa}} = 2.01 \text{ [mcl]}$$

- *Filtros a la descarga de las bombas de alta presión de la caldera (Fdbc)*

$$F_{dbc} := \frac{\left(0.2 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}\right)}{p_{esp} \text{ Pa}} = 2.01 \text{ [mcl]}$$

- *Calentadores de combustible del sistema de transferencia, ubicados en el nivel +26*

Pérdida de presión del lado del combustible es de 0,51 kg/cm²

$$C_{st} := \frac{\left(0.51 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}\right)}{p_{esp} \text{ Pa}} = 5.13 \text{ [mcl]}$$

- *Calentadores de combustible de alta presión ubicados en el nivel planta cerca de las bombas*

Pérdida de presión del lado del combustible es de 0,5 kg/cm²

$$C_{ap} := \frac{\left(0.5 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}\right)}{p_{esp} \text{ Pa}} = 5.03 \text{ [mcl]}$$

Datos y curvas de las bombas Bornemann en la estación bombeo del tanque n.º 10

	v1	Dp	Q1	P1	v2	Q2	P2
	mm ² /s	bar	m ³ /h	kW	mm ² /s	m ³ /h	kW
BT10 :=	370	1.49	185	41.5	3300	185	78
	370	5.04	182	58.9	3300	184	97.3
	370	10	176	89.8	3300	181	124
	370	15	172	117	3300	179	151
	370	20.1	167	144	3300	176	178
	370	25	160	171	3300	173	204
	370	29.6	158	198	3300	172	229

$$\text{Visc1} := \text{BT10}^{(1)}$$

$$\text{Visc2} := \text{BT10}^{(5)}$$

$$\text{Q1_BT10} := \frac{\text{BT10}^{(3)}}{3600}$$

$$\text{Q2_BT10} := \frac{\text{BT10}^{(6)}}{3600}$$

$$\text{P1_BT10} := \text{BT10}^{(4)}$$

$$\text{P2_BT10} := \text{BT10}^{(7)}$$

$$\text{DP_BT10} := \frac{\text{BT10}^{(2)} \cdot 100000}{\text{pesp}}$$

Regresion lineal de los puntos de Caudal contra Diferencia de Presion en la Bomba a una viscosidad de 370 cSt

$$\text{BT10A} := \text{regress}(\text{Q1_BT10}, \text{DP_BT10}, 1) \quad \text{a1} := \text{BT10A}_{4,1} \quad \text{a2} := \text{BT10A}_{5,1} \quad \text{DPBT10A}(x) := \text{a1} + \text{a2}(x)$$

Regresion lineal de los puntos de Diferencia de Presion contra Potencia en la Bomba a una viscosidad de 370 cSt

$$\text{BT10C} := \text{regress}(\text{DP_BT10}, \text{P1_BT10}, 1) \quad \text{a5} := \text{BT10C}_{4,1} \quad \text{a6} := \text{BT10C}_{5,1} \quad \text{PBT10A}(x) := \text{a5} + \text{a6}(x)$$

Regresion lineal de los puntos de Caudal contra Diferencia de Presion en la Bomba a una viscosidad de 3300 cSt

$$\text{BT10B} := \text{regress}(\text{Q2_BT10}, \text{DP_BT10}, 1) \quad \text{a3} := \text{BT10B}_{4,1} \quad \text{a4} := \text{BT10B}_{5,1} \quad \text{DPBT10B}(x) := \text{a3} + \text{a4}(x)$$

Regresion lineal de los puntos de Diferencia de Presion contra Potencia en la Bomba a una viscosidad de 3300 cSt

$$\text{BT10D} := \text{regress}(\text{DP_BT10}, \text{P2_BT10}, 1) \quad \text{a7} := \text{BT10D}_{4,1} \quad \text{a8} := \text{BT10D}_{5,1} \quad \text{PBT10B}(x) := \text{a7} + \text{a8}(x)$$

Viscosidad $\text{visc} := 2000 \text{ [cSt]}$

Aproximacion a la curva de la bomba segun la viscosidad del fluido

$$\text{porc} := \frac{(\log(\text{visc}) - \log(370))}{(\log(3300) - \log(370))} = 0.7711 [\%]$$

$$\text{QQQ} := (\text{Q2_BT10} - \text{Q1_BT10})\text{porc} + \text{Q1_BT10} \quad \text{Puntos de Caudal}$$

$$\text{PPP} := (\text{P2_BT10} - \text{P1_BT10})\text{porc} + \text{P1_BT10} \quad \text{Puntos de Potencia}$$

Regresion lineal de los puntos de Caudal contra Diferencia de Presion en la Bomba a una viscosidad X

$$\text{BT10E} := \text{regress}(\text{QQQ}, \text{DP_BT10}, 1) \quad \text{a9} := \text{BT10E}_{4,1} \quad \text{a10} := \text{BT10E}_{5,1} \quad \text{DPBT10C}(x) := \text{a9} + \text{a10}(x)$$

Regresion lineal de los puntos de Diferencia de Presion contra Potencia en la Bomba a una viscosidad X

$$\text{BT10F} := \text{regress}(\text{DP_BT10}, \text{PPP}, 1) \quad \text{a11} := \text{BT10F}_{4,1} \quad \text{a12} := \text{BT10F}_{5,1} \quad \text{PBT10C}(x) := \text{a11} + \text{a12}(x)$$

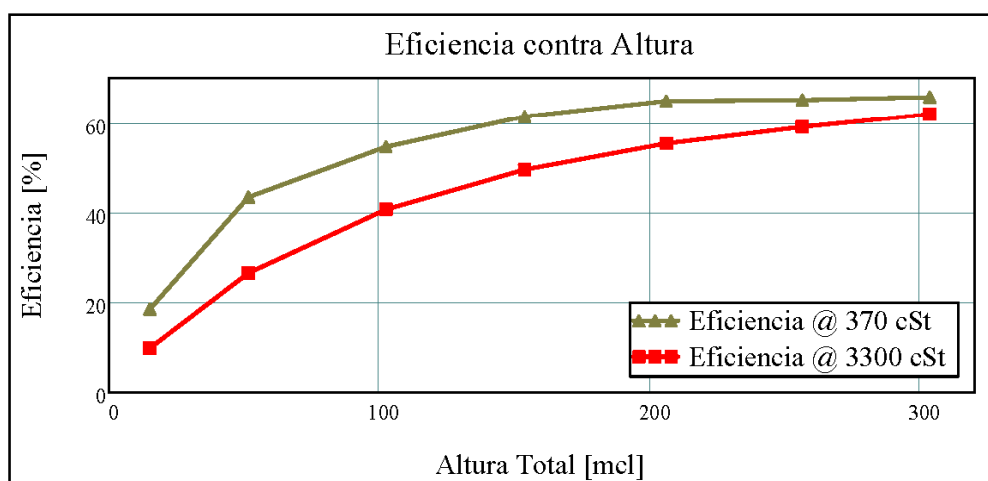
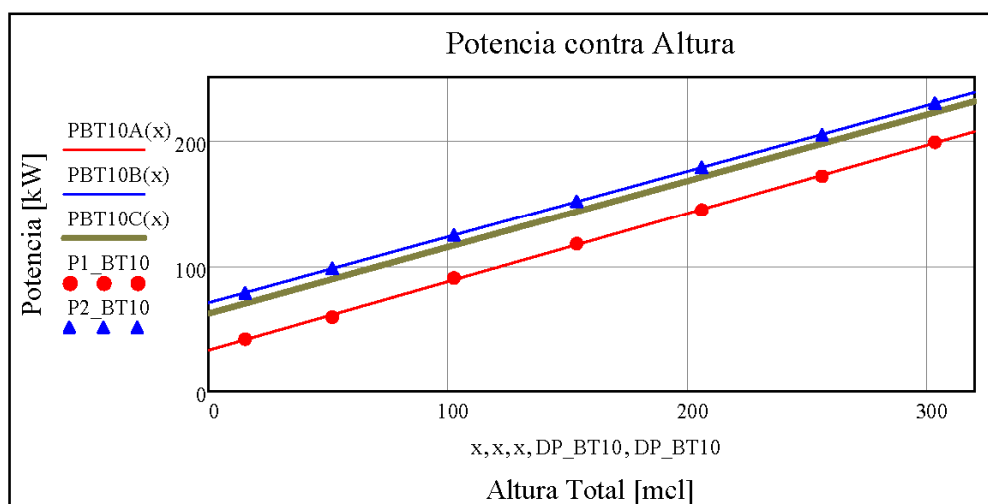
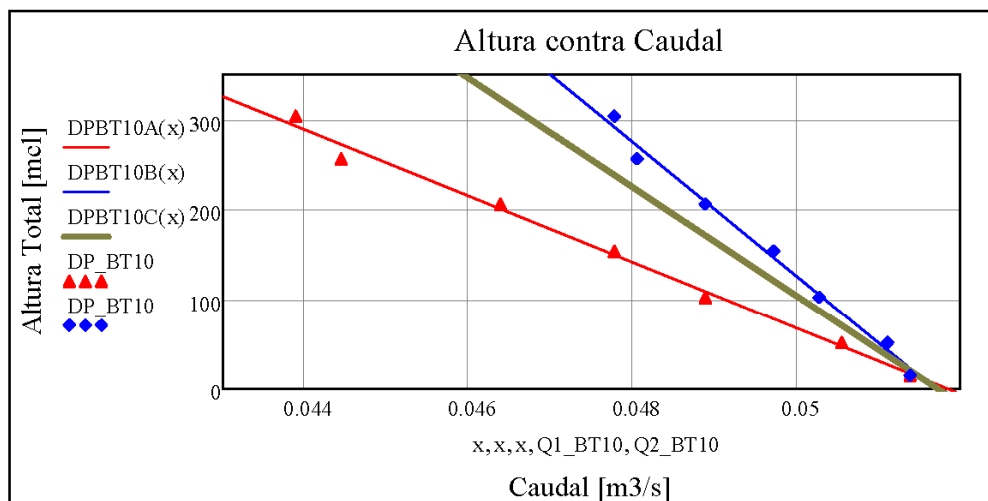
i := 1 .. 7

$$\text{Eficiencia}_{370} := \frac{\text{dens} \cdot \text{grav} \cdot \text{Q1_BT10}_i \cdot \text{DP_BT10}_i}{\text{P1_BT10}_i \cdot 10}$$

Calculo de eficiencia de la bomba a 370 cSt

$$\text{Eficiencia}_{3300} := \frac{\text{dens} \cdot \text{grav} \cdot \text{Q2_BT10}_i \cdot \text{DP_BT10}_i}{\text{P2_BT10}_i \cdot 10}$$

Calculo de eficiencia de la bomba a 3300 cSt



Datos y curvas de las bombas de la estacion de bombeo alta presion de la caldera

Viscosidad del Fuel Oil n°. 6 [cSt]	300									
Presión total [kgf/cm ²]	0	10	20	30	40	50	60	70	80	
Caudal [m³/h]	62	61	60	59	57	56	55	53	52	
Eficiencia de la bomba [%]			58	65	69	71	72	73	72	
Potencia eje de la bomba [kW]	26	43	60	77	94	111	128	145	162	

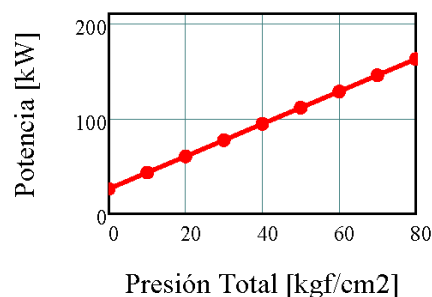
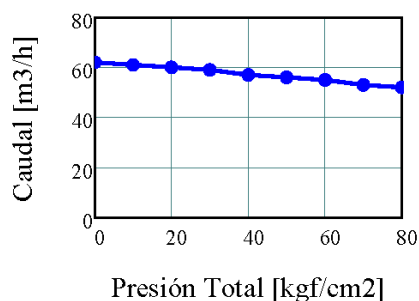
BHP :=

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	10	20	30	40	50	60	70	80
2	62	61	60	59	57	56	55	53	52
3	26	43	60	77	94	111	128	145	162

$$\text{AlturaPresion} := \frac{(\text{BHP}^T)^{(1)} \cdot \text{grav} \cdot 100^2}{\text{pesp}}$$

$$\text{Caudal} := \frac{(\text{BHP}^T)^{(2)}}{3600}$$

$$\text{Potencia} := (\text{BHP}^T)^{(3)}$$



MHIa := regress(Caudal, AlturaPresion, 1)

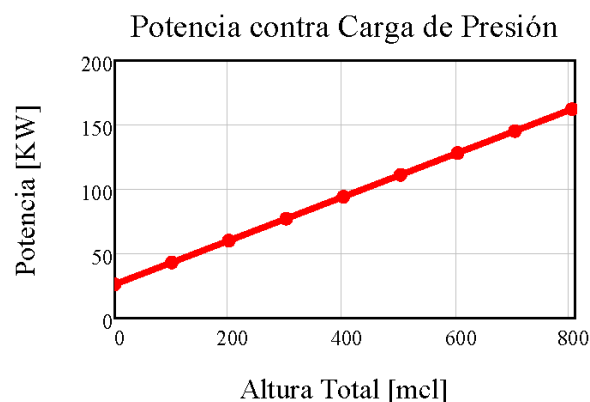
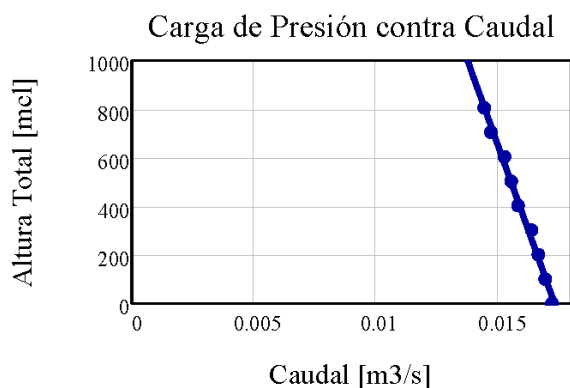
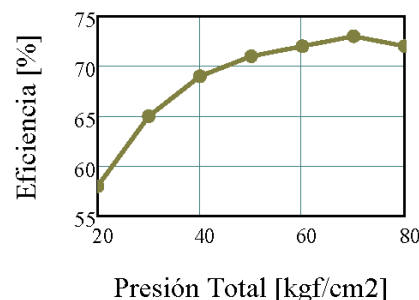
MHIb := regress(AlturaPresion, Potencia, 1)

c1 := MHIa_{4,1} c2 := MHIa_{5,1}

c3 := MHIb_{4,1} c4 := MHIb_{5,1}

DPBAP(x) := c1 + c2·(x) Carga de Presión en mcl

PBAP(x) := c3 + c4·(x) Potencia en kW



Método Hardy-Cross con NEWTON-RAPHSON
Segundo Caso: Tanque n.º 10 a Planta (DOS BOMBAS T10 Y DOS BOMBAS CALDERA)

Temperatura
[°C]

1						
2	130.7	19.25	104.3206	visc	45	6.26
3	143.5	19.25	95.0154	visc	45	5.1
4	151.9	19.25	89.7611	visc	45	4.2
5	120.8	29.25	289.0971	visc	45	4.16
6	1	15.25	178.821	visc	45	4.164
7	67.3	19.25	354.2801	visc	45	5.2
8	1	15.25	174.3401	visc	45	4.2
9	1	15.25	179.9399	visc	45	4.2
10	1	15.25	354.2801	visc	45	30.6
11	1	15.25	354.2801	280	60	26.7
12	1	10.02	118.0934	280	60	13.4
13	1	7.981	59.0467	280	60	3.6
14	1	7.981	59.0467	280	60	3.6
15	52.5	7.981	118.0934	280	60	8.4
16	1	7.981	96.3657	280	60	4.0
17	1	7.981	96.3657	20	120	8.4
18	40.7	7.981	21.7277	280	60	3.6
19	1	15.25	236.1867	280	60	3.6
20	1	10.02	43.4553	360	57	4.2
21	2314	10.02	65.183	650	50	3.6
22	101.1	7.98	3.4164	visc	45	12.6
23	1	15.25	178.8755	visc	45	15
	[m]	[pulgadas]	[m³/h]	[cSt]		[msnm]

$$D := d \cdot 0.0254 \text{ [m]} \quad Q := \frac{Q_h}{3600} \text{ [m³/s]}$$

$$\nu_1 := \frac{\nu_2}{1000000} \text{ [m²/s]} \quad i := 1 \dots 22 \quad \varepsilon_o := 0.04572 \text{ [mm]}$$

Valor de ajuste de la válvula de control de las bombas del tanque n.º 10

$$ZVCT10 := 10 \text{ [kgf/cm² man]}$$

$$zv_{sp} := \frac{ZVCT10 \cdot 98066.5}{p_{sp}} = 100.57 \text{ [mcl]}$$

Nivel mínimo de vaciado del tanque n.º 10

$$z_{mint} := 6.26 \text{ [msnm]}$$

Valor mínimo requerido de presión en los quemadores de la caldera

$$ZVC19k := 19 \text{ [kgf/cm² man]}$$

$$zv_{pq} := \frac{ZVC19k \cdot 98066.5}{p_{sp}} = 191 \text{ [mcl]}$$

Valor de ajuste de la válvula de control reguladora de flujo de la caldera

$$ZVC20k := 20 \text{ [kgf/cm² man]}$$

$$zv_{fc} := \frac{ZVC20k \cdot 98066.5}{p_{sp}} = 201.07 \text{ [mcl]}$$

Valor de ajuste de la válvula de control reguladora de presión de combustible

$$ZVC30k := 30 \text{ [kgf/cm² man]}$$

$$zv_{rp} := \frac{ZVC30k \cdot 98066.5}{p_{sp}} = 301.57 \text{ [mcl]}$$

$$L_5 := 89 + 4.6 + 62.5 \cdot \left(\frac{15.25}{10.02} \right)^5 + 72.2 \cdot \left(\frac{15.25}{12} \right)^5 = 843.3$$

$$L_7 := 108.8 + 417.2 + 1045.3 = 1571.3$$

$$L_8 := 84.3 + 393.8 + 1044.3 = 1522.4$$

$$L_9 := 231.8 + 72.9 = 304.7$$

$$L_{10} := 95.3 + 913.0 = 1008.3$$

$$L_{11} := 64.2 \cdot \left(\frac{10.02}{7.981} \right)^5 + 33.8 + 75.1 = 309.16$$

$$L_{12} := 35.1 + 61.1 \cdot \left(\frac{7.981}{6.065} \right)^5 = 276.19$$

$$L_{13} := 35.1 + 61.1 \cdot \left(\frac{7.981}{6.065} \right)^5 = 276.19$$

$$L_{15} := 45.9 + 67.2 + 40.3 = 153.4$$

$$L_{16} := 168.2 + 32.0 + 1.2 \cdot \left(\frac{7.981}{4.09} \right)^5 + 40.7 + 141.2 \cdot \left(\frac{7.981}{6.065} \right)^5 = 831.99$$

$$L_{22} := 39.6 + 4 + 62.5 \cdot \left(\frac{15.25}{10.02} \right)^5 + 72.2 \cdot \left(\frac{15.25}{12} \right)^5 = 793.3$$

	1
1	130.7
2	143.5
3	151.9
4	120.8
5	843.3
6	67.3
7	1571.3
8	1522.4
9	304.7
10	1008.3
11	309.16
12	276.19
13	276.19
14	52.5
15	153.4
16	831.99
17	40.7
18	1
19	1
20	2314
21	101.1
22	793.3

L =

[m]

	1
1	2000
2	2000
3	2000
4	2000
5	2000
6	2000
7	2000
8	2000
9	2000
10	280
11	280
12	280
13	280
14	280
15	280
16	20
17	280
18	280
19	360
20	650
21	2000
22	2000

$\nu_2 =$

[cSt] ó [mm²/s]

	1
1	0.002
2	0.002
3	0.002
4	0.002
5	0.002
6	0.002
7	0.002
8	0.002
9	0.002
10	0.00028
11	0.00028
12	0.00028
13	0.00028
14	0.00028
15	0.00028
16	0.00002
17	0.00028
18	0.00028
19	0.00036
20	0.00065
21	0.002
22	0.002

$\nu_1 =$

[m²/s]

$$Re_1 := \frac{4 \cdot Q_1}{\left(\pi \nu l_1 D_1 \right)} \quad \text{Numero de Reynolds}$$

$$f := \frac{64}{Re} \quad \text{Factor de fricción para flujo laminar}$$

Dado

$$ff := 0.01 \quad \text{PARA TUBERIA 16}$$

$$\frac{1}{\sqrt{ff}} = -2 \log \left(\frac{\epsilon_0}{1000 \cdot 3.7 D_{16}} + \frac{2.51}{Re_{16} \sqrt{ff}} \right)^{10} \quad \text{Ecuación de Coolebrok}$$

$$f_{16} := \text{Find}(ff) = 0.0327$$

Ecuación de Darcy Weisbach

$$k_1 := f_1 \cdot \frac{L_1 \cdot 8}{(D_1)^5 \cdot \pi^2 \cdot \text{grav}}$$

Re =		1	$\frac{\varepsilon_0}{1000D} =$		1	f =		1	k =		1
	1	37.73		1	0.0001		1	1.6963		1	655.72
	2	34.36		2	0.0001		2	1.8624		2	790.45
	3	32.46		3	0.0001		3	1.9714		3	885.69
	4	68.81		4	0.0001		4	0.9301		4	41.03
	5	81.64		5	0.0001		5	0.7839		5	6266.42
	6	128.13		6	0.0001		6	0.4995		6	99.42
	7	79.59		7	0.0001		7	0.8041		7	11976.21
	8	82.15		8	0.0001		8	0.7791		8	11242.4
	9	161.74		9	0.0001		9	0.3957		9	1142.83
	10	1155.29		10	0.0001		10	0.0554		10	529.45
	11	586.1		11	0.0002		11	0.1092		11	2613.05
	12	367.92		12	0.0002		12	0.174		12	11599.61
	13	367.92		13	0.0002		13	0.174		13	11599.61
	14	735.84		14	0.0002		14	0.087		14	1102.48
	15	600.46		15	0.0002		15	0.1066		15	3947.65
	16	8406.38		16	0.0002		16	0.0327		16	6562.73
	17	135.39		17	0.0002		17	0.4727		17	4645.33
	18	770.2		18	0.0001		18	0.0831		18	0.79
	19	167.74		19	0.0002		19	0.3815		19	29.53
	20	139.36		20	0.0002		20	0.4593		20	82258.07
	21	2.98		21	0.0002		21	21.4719		21	5.24·10 ⁵
22	81.66	22	0.0001	22	0.7837	22	5893.08				

rugosidad relativa mm/mm

```

RQ := Q ← Q
for n ∈ 1..25
  for j ∈ 1..22
    1
    1
    1
    M ←
      (
        1      1      1      -1      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
        0      0      0      1      -1      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
        0      0      0      0      1      -1      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
        0      0      0      0      0      1      -1      -1      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
        0      0      0      0      0      0      1      1      -1      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
        0      0      0      0      0      0      0      0      1      -1      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
        0      0      0      0      0      0      0      0      0      1      -1      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
        0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      1      0      -1      -1      0      0      0      0      0      0      0
        0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      1      0      1      -1      0      0      0      0      0      0
        0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      1      -1      0      -1      0      0      0
        0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      1      -1      0      0      0      0
        0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      1      0      1      -1
        0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      1      0      0      0
        0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      1       $\frac{-2}{3}$       0
        0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
        0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
        -2 k1 · Q1      0      0      -2 k4 · Q4      -2 k5 · Q5 + a10      -2 k6 · Q6      -2 k7 · Q7      0      -2 k9 · Q9      -2 k10 · Q10      -2 k11 · Q11      -2 k12 · Q12 + c2      0      -2 k14 · Q14      0      0      -2 k17 · Q17      0      0      0      0      0
        0      -2 k2 · Q2      0      -2 k4 · Q4      -2 k5 · Q5 + a10      -2 k6 · Q6      -2 k7 · Q7      0      -2 k9 · Q9      -2 k10 · Q10      -2 k11 · Q11      -2 k12 · Q12 + c2      0      -2 k14 · Q14      0      0      -2 k17 · Q17      0      0      0      0      0
        0      0      -2 k3 · Q3      -2 k4 · Q4      -2 k5 · Q5 + a10      -2 k6 · Q6      -2 k7 · Q7      0      -2 k9 · Q9      -2 k10 · Q10      -2 k11 · Q11      -2 k12 · Q12 + c2      0      -2 k14 · Q14      0      0      -2 k17 · Q17      0      0      0      0      0
        -2 k1 · Q1      0      0      -2 k4 · Q4      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      -2 k21 · Q21      -2 k22 · Q22 + a10
        0      0      0      0      2 k5 · Q5 - a10      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      -2 k22 · Q22 + a10
        0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      -2 k12 · Q12 + c2      2 k13 · Q13 - c2      0      0      0      0      0      0      0      0
        0      0      0      0      0      -2 k6 · Q6      0      -2 k8 · Q8      -2 k9 · Q9      -2 k10 · Q10      -2 k11 · Q11      -2 k12 · Q12 + c2      0      -2 k14 · Q14      0      0      -2 k17 · Q17      0      0      0      2 k21 · Q21      0
      )
    F ←
      (
        Q1 + Q2 + Q3 - Q4
        Q4 + Q20 + Q21 - Q5 - Q22
        Q5 + Q22 - Q6 - Q21
        Q6 - Q7 - Q8
        Q7 + Q8 - Q9
        Q9 - Q10
        Q10 - Q11 - Q18
        Q11 - Q12 - Q13
        Q12 + Q13 - Q14
        Q14 - Q15 - Q17
        Q15 - Q16
        Q17 + Q19 - Q20
        Q18 -  $\frac{2}{3}$  Q10
        Q19 -  $\frac{2}{3}$  Q20
        12.55 + zvf c - k16 (Q16)2 - zvpq - 17.9
        zmint - k1 (Q1)2 - k4 (Q4)2 - k5 (Q5)2 + (a9 + a10 · Q5) - Fsb10 - Fdb10m - k6 (Q6)2 - k7 (Q7)2 - k9 (Q9)2 - Cst - k10 (Q10)2 - k11 (Q11)2 - Fsb c - k12 (Q12)2 + (c1 + c2 · Q12) - k14 (Q14)2 - k17 (Q17)2 - zvrp
        zmint - k2 (Q2)2 - k4 (Q4)2 - k5 (Q5)2 + (a9 + a10 · Q5) - Fsb10 - Fdb10m - k6 (Q6)2 - k7 (Q7)2 - k9 (Q9)2 - Cst - k10 (Q10)2 - k11 (Q11)2 - Fsb c - k12 (Q12)2 + (c1 + c2 · Q12) - k14 (Q14)2 - k17 (Q17)2 - zvrp
        zmint - k3 (Q3)2 - k4 (Q4)2 - k5 (Q5)2 + (a9 + a10 · Q5) - Fsb10 - Fdb10m - k6 (Q6)2 - k7 (Q7)2 - k9 (Q9)2 - Cst - k10 (Q10)2 - k11 (Q11)2 - Fsb c - k12 (Q12)2 + (c1 + c2 · Q12) - k14 (Q14)2 - k17 (Q17)2 - zvrp
        zmint - k1 (Q1)2 - k4 (Q4)2 - k22 (Q22)2 + (a9 + a10 · Q22) - Fsb10 - Fdb10m - k21 (Q21)2 - zvsp
        -k22 (Q22)2 + (a9 + a10 · Q22) + k5 (Q5)2 - (a9 + a10 · Q5)
        -k12 (Q12)2 + (c1 + c2 · Q12) + k13 (Q13)2 - (c1 + c2 · Q13)
        zvsp + k21 (Q21)2 - k6 (Q6)2 - k8 (Q8)2 - k9 (Q9)2 - Cst - k10 (Q10)2 - k11 (Q11)2 - Fsb c - k12 (Q12)2 + (c1 + c2 · Q12) - k14 (Q14)2 - k17 (Q17)2 - zvrp
      )
    QQ ← (-M-1 · F) + Q
    Q ← QQ
  RQ ← augment (Re, f, k, Q)

```

Resultados:

	Reynolds	f	k	Q [m³/s]	Q [m³/h]	
	1	2	3	4		
	1	37.73	1.696	655.722	0.029	104.32
	2	34.364	1.862	790.446	0.026	95.02
	3	32.464	1.971	885.694	0.025	89.76
	4	68.812	0.93	41.026	0.08	289.1
	5	81.638	0.784	6266.424	0.05	178.82
	6	128.133	0.499	99.422	0.098	354.28
	7	79.592	0.804	11976.213	0.048	174.34
	8	82.149	0.779	11242.399	0.05	179.94
	9	161.741	0.396	1142.835	0.098	354.28
	10	1155.295	0.055	529.455	0.098	354.28
RQ =	11	586.103	0.109	2613.047	0.033	118.09
	12	367.921	0.174	11599.61	0.016	59.05
	13	367.921	0.174	11599.61	0.016	59.05
	14	735.841	0.087	1102.477	0.033	118.09
	15	600.456	0.107	3947.651	0.027	96.37
	16	8406.381	0.033	6562.733	0.027	96.37
	17	135.386	0.473	4645.329	0.006	21.73
	18	770.196	0.083	0.788	0.066	236.19
	19	167.744	0.382	29.532	0.012	43.46
	20	139.356	0.459	82258.074	0.018	65.18
	21	2.981	21.472	524454.635	0.001	3.42
	22	81.663	0.784	5893.085	0.05	178.88

Bomba en servicio del tanque n.º 10
Hacia las tres calderas
Hacia las tres calderas
Hacia las tres calderas
Bombas de la caldera
Bombas de la caldera
Colector descarga de las bombas de caldera
Suministro de combustible del quemador
Retorno de cada caldera
Retorno largo succión bombas tanque n.º 10
Válvula de desvío en tanque n.º 10
Segunda bomba en servicio en tanque n.º 10

Punto de operación de las bombas en servicio de la estación de bombeo de combustible del tanque n.º 10

Altura total de las bombas

$$DH_{bomba} := DPBT10C \left[\left(RQ^{(4)} \right)_5 \right] = 124.02 \text{ [mcl]}$$

$$DH_{bomba} \cdot \frac{p_{esp}}{1000} = 1209.89 \text{ [kPa]}$$

Potencia mecánica en la bomba según la gráfica del fabricante

$$P_{mecf} := PBT10C \left[DPBT10C \left[\left(RQ^{(4)} \right)_5 \right] \right] = 127.09 \text{ [kW]}$$

Eficiencia calculada de la bomba

Potencia hidráulica de la bomba

$$Phid := dens \cdot grav \cdot \left(RQ^{(4)} \right)_5 \cdot DH_{bomba} \cdot 0.001 = 60.1 \text{ [kW]}$$

$$Eficiencia := \frac{Phid}{P_{mecf}} \cdot 100 = 47.29 \text{ [%]}$$

Potencia mecánica de la bomba

$$P_{mec} := \frac{dens \cdot grav \cdot \left(RQ^{(4)} \right)_5 \cdot DH_{bomba}}{Eficiencia \cdot 10} = 127.09 \text{ [kW]}$$

Eficiencia del motor $Em := .95$

$$P_{elec} := \frac{P_{mec}}{Em} = 133.78 \text{ [kW]}$$

Corriente eléctrica en el motor de la bomba

$$Corriente_{motor} := \frac{P_{elec} \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 460 \cdot 0.86} = 195.24 \text{ [A]}$$

**Punto de operación de las bombas en servicio de la estación de bombeo de combustible
de alta presión de la caldera**

Altura total de las bombas

$$DH_{bomba1} := DPBAP \left[\left(RQ^{(4)} \right)_{12} \right] = 260.25 \text{ [mcl]}$$

$$DH_{bomba1} \cdot \frac{pesp}{1000} = 2538.84 \text{ [kPa]}$$

$$DPBAP \left[\left(RQ^{(4)} \right)_{13} \right] = 260.25 \text{ [mcl]}$$

Potencia mecánica en la bomba según la gráfica del fabricante

$$P_{mecf1} := PBAP \left[DPBAP \left[\left(RQ^{(4)} \right)_{12} \right] \right] = 70.01 \text{ [kW]}$$

$$PBAP \left[DPBAP \left[\left(RQ^{(4)} \right)_{13} \right] \right] = 70.01 \text{ [kW]}$$

Potencia hidráulica de la bomba

$$Phid1 := dens \cdot grav \cdot \left(RQ^{(4)} \right)_{12} \cdot DH_{bomba1} \cdot 0.001 = 41.64 \text{ [kW]}$$

Eficiencia calculada de la bomba

$$Eficiencia1 := \frac{Phid1}{P_{mecf1}} \cdot 100 = 59.48\%$$

Potencia mecánica de la bomba

$$P_{mec1} := \frac{dens \cdot grav \cdot \left(RQ^{(4)} \right)_{12} \cdot DH_{bomba1}}{Eficiencia1 \cdot 10} = 70.01 \text{ [kW]}$$

Eficiencia del motor $Em1 := 0.95$

$$P_{elec1} := \frac{P_{mec1}}{Em1} = 73.7 \text{ [kW]}$$

Corriente eléctrica en el motor de la bomba

$$Corrientemotor1 := \frac{P_{elec1} \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 4160 \cdot 0.80} = 12.78 \text{ [A]}$$

Velocidad del flujo [m/s]

	1
1	0.1543
2	0.1406
3	0.1328
4	0.1852
5	0.4215
6	0.5241
7	0.411
8	0.4242
9	0.8351
10	0.8351
11	0.6448
12	0.5082
13	0.5082
14	1.0164
15	0.8294
16	0.8294
17	0.187
18	0.5567
19	0.2373
20	0.3559
21	0.0294
22	0.4216

$$v := \frac{4RQ^{(4)}}{\pi \cdot D^2} =$$

Perdidas de carga [mcl]

	1
1	0.5506
2	0.5506
3	0.5506
4	0.2646
5	15.4615
6	0.9629
7	28.0872
8	28.0872
9	11.0681
10	5.1276
11	2.8119
12	3.1205
13	3.1205
14	1.1864
15	2.8286
16	4.7025
17	0.1692
18	0.0034
19	0.0043
20	26.9676
21	0.4723
22	14.5492

$$hf_n =$$

$$k := RQ^{(3)}$$

$$q := RQ^{(4)}$$

$$n := 1 \dots 22$$

$$hf_n := k_n \cdot (q_n)^2$$

Perdidas de presión por cada tramo de tubería equivalente en Pa

$$\Delta P_n := \frac{128 \cdot \nu 1_n \cdot \text{dens} \cdot L_n \cdot (RQ^{(4)})_n}{\pi \cdot (D_n)^4}$$

$$\Delta P_n =$$

	1
1	5371.5965
2	5371.598
3	5371.5982
4	2580.9985
5	150834.3462
6	9393.3265
7	274004.4658
8	274004.4181
9	107974.2929
10	50022.5373
11	27431.0141
12	30442.3389
13	30442.3389
14	11573.4844
15	27594.7971
16	10690.4089
17	1650.7703
18	33.0738
19	41.9783
20	263081.6276
21	4607.7056
22	141934.46

Perdidas de Presión [Pa]

$$\frac{(hf_n \cdot \text{pesp})}{1000} =$$

	1
1	5.3716
2	5.3716
3	5.3716
4	2.581
5	150.8343
6	9.3933
7	274.0045
8	274.0045
9	107.9743
10	50.0225
11	27.431
12	30.4423
13	30.4423
14	11.5735
15	27.5948
16	45.8747
17	1.6508
18	0.0331
19	0.042
20	263.0815
21	4.6077
22	141.9344

Perdidas de presión [kPa]

Tramo de dos segmentos a la succión de las bombas del n.º 10

$$\Delta P1_5 := \frac{128 \cdot \nu 1_5 \cdot \text{dens} \cdot (89 + 4.6) \cdot (RQ^{(4)})_5}{\pi \cdot (D_5)^4} = 16741.54 \text{ [Pa]}$$

Primer tramo a la descarga de las bombas del n.º 10

$$\Delta P2_5 := \frac{128 \cdot \nu 1_5 \cdot \text{dens} \cdot (62.5) \cdot (RQ^{(4)})_5}{\pi \cdot (10.02 \cdot 0.0254)^4} = 59980.23 \text{ [Pa]}$$

Segundo tramo a la descarga de las bombas del n.º 10

$$\Delta P3_5 := \frac{128 \cdot \nu 1_5 \cdot \text{dens} \cdot (72.2) \cdot (RQ^{(4)})_5}{\pi \cdot (12 \cdot 0.0254)^4} = 33683.04 \text{ [Pa]}$$

Tramo a la succión de las bombas de alta presión

$$\Delta P4_{12} := \frac{128 \cdot \nu 1_{12} \cdot \text{dens} \cdot (35.1) \cdot (RQ^{(4)})_{12}}{\pi \cdot (7.981 \cdot 0.0254)^4} = 3868.85 \text{ [Pa]}$$

NPSH disponible > NPSH requerido

$$NPSH = h_a - h_{vap} + h_{st} - h_{fs}$$

ha = presión absoluta sobre la superficie de liquido en el tanque

h_{vap} = presión de vapor

h_{st} = nivel del liquido con respecto a la línea central de la bomba

h_{fs} = pérdidas en la línea de succión de la bomba

Presión atmosférica

$$P_{atm} := 101325 [\text{Pa}]$$

Presión de vapor del Fuel Oil #6 a 37,8 °C

$$P_{vap} := \frac{0.6 \text{ psi}}{Pa} = 4136.85 [\text{Pa}]$$

Diferencia de altura entre el nivel de liquido en el tanque n.º 10 y la succión de la bomba del tanque n.º 10

$$h_{st1} := z_{mint} - 4.164 = 2.1 [\text{m}]$$

NPSH disponible del las bombas del tanque n.º 10

$$NPSH1 := P_{atm} - P_{vap} + h_{st1} \cdot \text{pesp} - (\Delta P_1 + \Delta P_4 + \Delta P_{15} + F_{sb10} \cdot \text{pesp}) = 86046.73 [\text{Pa}] \quad \frac{NPSH1}{\text{pesp}} = 8.82 [\text{m}]$$

Cabezal mínimo de succión las bombas del tanque n.º 10

$$P_{suc10} := P_{atm} + h_{st1} \cdot \text{pesp} - (\Delta P_1 + \Delta P_4 + \Delta P_{15} + F_{sb10} \cdot \text{pesp}) = 90183.59 [\text{Pa}] \quad \frac{P_{suc10}}{\text{pesp}} = 9.24 [\text{m}]$$

Diferencia de altura entre la descarga de la bombas del tanque n.º 10 y la succión de las bombas de la caldera

$$h_{st2} := 4.164 - 4.020 = 0.14 [\text{m}]$$

Perdidas de presión en la tubería de descarga de la bomba del tanque n.º 10

$$h_{fs} := \Delta P_{25} + \Delta P_{35} + F_{db10m} \cdot \text{pesp} + \Delta P_6 + \Delta P_6 + \Delta P_7 + \Delta P_9 + C_{st} \cdot \text{pesp} - \Delta P_{10} + \Delta P_{11} + F_{sb} \cdot \text{pesp} + \Delta P_{412}$$

$$h_{fs} = 765378.2959 [\text{Pa man}] \quad \frac{h_{fs}}{\text{pesp}} = 78.46 [\text{m}]$$

NPSH disponible del las bombas de la caldera

$$NPSH2 := (P_{atm} + D_{Hbomba} \cdot \text{pesp}) - P_{vap} + h_{st2} - h_{fs} = 541695.04 [\text{Pa}] \quad \frac{NPSH2}{\text{pesp}} = 55.53 [\text{m}]$$

Cabezal mínimo de succión de las bombas de la caldera

$$P_{sucB} := (P_{atm} + D_{Hbomba} \cdot \text{pesp}) + h_{st2} - h_{fs} = 545831.8909 [\text{Pa man}] \quad \frac{P_{sucB}}{\text{pesp}} = 55.95 [\text{m}]$$

Tramo a la descarga de las bombas de alta presión

$$\Delta P_{13}^4 := \frac{128 \cdot \nu_{12} \cdot \text{dens} \cdot (61.1) \cdot (RQ^{(4)})_{12}}{\pi \cdot (6.065 \cdot 0.0254)^4} = 20193.99 [\text{Pa}]$$

Tramo de tres segmentos a la salida del calentador de alta presión

$$\Delta P_{13}^5 := \frac{128 \cdot \nu_{16} \cdot \text{dens} \cdot (42.2 + 13.3 + 206.0) \cdot (RQ^{(4)})_{16}}{\pi \cdot (7.981 \cdot 0.0254)^4} = 3360.05 [\text{Pa}]$$

Carga Piezometrica

$$CP_1 := \frac{Patm}{pesp} + zmint$$

$$LH_1 := 0$$

$$CP_2 := CP_1 - hf_1 + (Z_1 - Z_2) = 17.26$$

$$LH_2 := LH_1 + L_1$$

$$CP_3 := CP_2 - hf_4 + (Z_2 - Z_3) = 17.89$$

$$LH_3 := LH_2 + L_4$$

$$CP_4 := CP_2 - \frac{\Delta P1_5}{pesp} - Fsb10 + (Z_3 - Z_4) - 14.87$$

$$LH_4 := LH_3 + (89 + 4.6)$$

$$CP_5 := CP_4 + DPBT10C \left[\left(RQ^{(4)} \right)_5 \right] = 138.89$$

$$LH_5 := LH_4$$

$$CP_6 := CP_5 - \frac{\Delta P2_5}{pesp} - Fdb10m - (Z_6 - Z_5) = 119.41$$

$$LH_6 := LH_5 + 62.5$$

$$CP_7 := CP_6 - \frac{\Delta P3_5}{pesp} + (Z_6 - Z_7) = 116.96$$

$$LH_7 := LH_6 + 72.2$$

$$CP_8 := CP_7 - hf_6 = 115.99$$

$$LH_8 := LH_7 + L_6$$

$$CP_9 := CP_8 - hf_7 - (Z_9 - Z_8) = 61.51$$

$$LH_9 := LH_8 + L_7$$

$$CP_{10} := CP_9 - hf_9 - Cst + (Z_9 - Z_{10}) = 49.21$$

$$LH_{10} := LH_9 + L_9$$

$$CP_{11} := CP_{10} - hf_{10} + (Z_{10} - Z_{11}) = 57.38$$

$$LH_{11} := LH_{10} + L_{10}$$

$$CP_{12} := CP_{11} - hf_{11} - Fsb + (Z_{11} - Z_{14}) = 57.56$$

$$LH_{12} := LH_{11} + L_{11}$$

$$CP_{13} := CP_{12} - \frac{\Delta P4_{12}}{pesp} + (Z_{14} - Z_{15}) = 61.56$$

$$LH_{13} := LH_{12} + 35.1$$

$$CP_{14} := CP_{13} + DPBAP \left[\left(RQ^{(4)} \right)_{12} \right] - 321.81$$

$$LH_{14} := LH_{13}$$

$$CP_{15} := CP_{14} - \frac{\Delta P4_{13}}{pesp} - (Z_{16} - Z_{15}) = 315.34$$

$$LH_{15} := LH_{14} + 61.1$$

$$CP_{16} := CP_{15} - hf_{14} + (Z_{16} - Z_{17}) = 318.96$$

$$LH_{16} := LH_{15} + L_{14}$$

$$CP_{17} := CP_{16} - hf_{15} - Fdbc = 314.12$$

$$LH_{17} := LH_{16} + L_{15}$$

$$CP_{18} := CP_{17} - Cst = 308.99$$

$$LH_{18} := LH_{17}$$

$$CP_{19} := CP_{18} - \frac{\Delta P5_{13}}{pesp} - (Z_{21} - Z_{18}) = 299.65$$

$$LH_{19} := LH_{18} + (42.2 + 13.3 + 206.0)$$

$$CP_{20} := 200$$

$$LH_{20} := LH_{19}$$

$$CP_{21} := CP_{20} - hf_{16} - (Z_{22} - Z_{21}) = 192.9$$

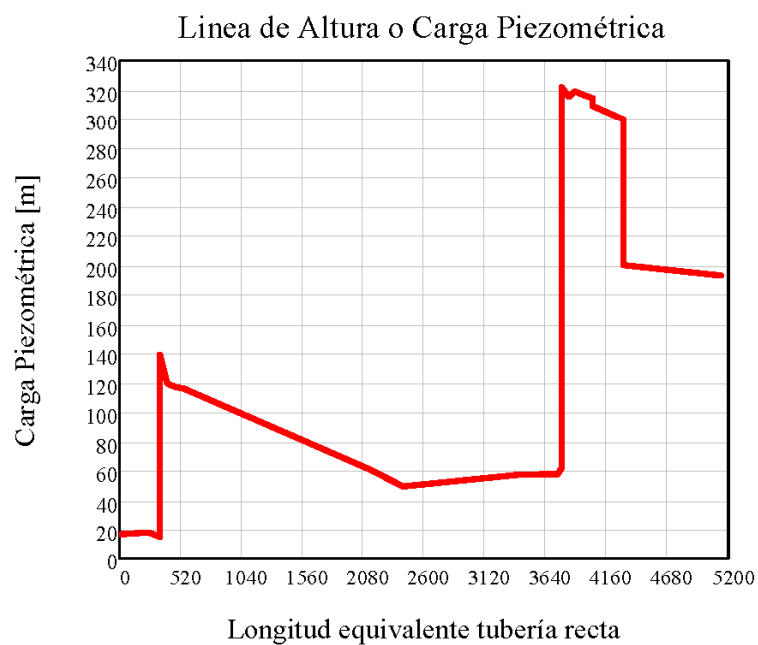
$$LH_{21} := LH_{20} + L_{16}$$

CP =

	1
1	16.6
2	17.3
3	17.9
4	14.9
5	138.9
6	119.4
7	117
8	116
9	61.5
10	49.2
11	57.4
12	57.6
13	61.6
14	321.8
15	315.3
16	319
17	314.1
18	309
19	299.6
20	200
21	192.9

LH =

	1
1	0
2	130.7
3	251.5
4	345.1
5	345.1
6	407.6
7	479.8
8	547.1
9	2118.4
10	2423.1
11	3431.4
12	3740.6
13	3775.7
14	3775.7
15	3836.8
16	3889.3
17	4042.7
18	4042.7
19	4304.2
20	4304.2
21	5136.2



Viscosidad cSt
 Set de la Valvula de Control
 Caudal de Retorno m3/h
 Presion total de la bomba bar
 Caudal de Retorno m3/h
 Eficiencia
 Corriente en el motor
 Presion total de la bomba bar
 Eficiencia
 Corriente en el motor

RQt :=

3300	12	3.42	15.12	64.75	49.57	232.45	25.93	59.87	12.96
3300	11	5.09	14.18	64.02	48.22	224.73	26.86	60.51	13.25
3300	10	6.75	13.24	63.29	46.76	217.01	27.79	61.12	13.54
3300	9	8.41	12.31	62.55	45.17	209.29	28.71	61.69	13.84
2000	12	-0.4	14	66.68	50.29	211.03	23.5	58	12.19
2000	11	1.51	13.05	65.93	48.86	203.13	24.44	58.76	12.49
2000	10	3.42	12.1	65.18	47.29	195.24	25.39	59.48	12.78
2000	9	5.33	11.15	64.44	45.56	187.35	26.33	60.15	13.08
1600	12	-1.91	13.67	67.28	50.95	202.81	22.74	57.35	11.95
1600	11	0.11	12.71	66.53	49.51	194.85	23.69	58.15	12.25
1600	10	2.13	11.76	65.78	47.91	186.89	24.64	58.91	12.55
1600	9	4.15	10.8	65.03	46.14	178.92	25.59	59.62	12.85
780	12	-6.27	13	68.54	54.25	179.68	21.15	55.88	11.44
780	11	-3.9	12.04	67.78	52.85	171.53	22.11	56.78	11.75
780	10	-1.53	11.07	67.02	51.26	163.37	23.07	57.64	12.05
780	9	0.83	10.11	66.26	49.47	155.22	24.03	58.43	12.36
650	12	-7.3	12.9	68.74	55.34	174.35	20.89	55.63	11.36
650	11	-4.85	11.93	67.98	53.97	166.16	21.85	56.55	11.67
650	10	-2.39	10.97	67.22	52.42	157.96	22.82	57.42	11.97
650	9	0.06	10	66.45	50.65	149.76	23.78	58.23	12.28

RF :=	visc	RF =			
	ZVCT10			1	
	$(RQ^{(4)})_{21} \cdot 3600$		1	2000	[cSt] Viscosidad estimada del fuel oil en el tanque n.º 10
	$DH_{bomba} \cdot \frac{pesp}{100000}$		2	10	[m] Valor ajuste válvula tanque n.º 10
	$(RQ^{(4)})_{20} \cdot 3600$		3	3.42	[m³/h] Caudal de retorno tanque n.º 10
	Eficiencia		4	12.1	[bar] Presión total de la bomba tanque n.º 10
	Corrientemotor		5	65.18	[m³/h] Caudal de retorno de las calderas hacia el tanque n.º 10
	$DH_{bomba1} \cdot \frac{pesp}{100000}$		6	47.29	[%] Eficiencia bomba tanque n.º 10
	Eficiencia1		7	195.24	[A] Corriente en el motor de la bomba, tanque n.º 10
	Corrientemotor1		8	25.39	[bar] Presión total de la bomba de alta presión de combustible
			9	59.48	[%] Eficiencia bomba de alta presión de combustible
			10	12.78	A] Corriente en el motor de la bomba de alta presión de combustible

RF =	3300	RF =	3300	RF =	3300	RF =	3300
	12		11		10		9
	3.42		5.09		6.75		8.41
	15.12		14.18		13.24		12.31
	64.75		64.02		63.29		62.55
	49.57		48.22		46.76		45.17
	232.45		224.73		217.01		209.29
	25.93		26.86		27.79		28.71
	59.87		60.51		61.12		61.69
	12.96		13.25		13.54		13.84

RF =	2000	RF =	2000	RF =	2000	RF =	2000
	12		11		10		9
	-0.4		1.51		3.42		5.33
	14		13.05		12.1		11.15
	66.68		65.93		65.18		64.44
	50.29		48.86		47.29		45.56
	211.03		203.13		195.24		187.35
	23.5		24.44		25.39		26.33
	58		58.76		59.48		60.15
	12.19		12.49		12.78		13.08

RF =	1600	RF =	1600	RF =	1600	RF =	1600
	12		11		10		9
	-1.91		0.11		2.13		4.15
	13.67		12.71		11.76		10.8
	67.28		66.53		65.78		65.03
	50.95		49.51		47.91		46.14
	202.81		194.85		186.89		178.92
	22.74		23.69		24.64		25.59
	57.35		58.15		58.91		59.62
	11.95		12.25		12.55		12.85

RF =	780	RF =	780	RF =	780	RF =	780
	12		11		10		9
	-6.27		-3.9		-1.53		0.83
	13		12.04		11.07		10.11
	68.54		67.78		67.02		66.26
	54.25		52.85		51.26		49.47
	179.68		171.53		163.37		155.22
	21.15		22.11		23.07		24.03
	55.88		56.78		57.64		58.43
	11.44		11.75		12.05		12.36
RF =	650	RF =	650	RF =	650	RF =	650
	12		11		10		9
	-7.3		-4.85		-2.39		0.06
	12.9		11.93		10.97		10
	68.74		67.98		67.22		66.45
	55.34		53.97		52.42		50.65
	174.35		166.16		157.96		149.76
	20.89		21.85		22.82		23.78
	55.63		56.55		57.42		58.23
	11.36		11.67		11.97		12.28

Hoja de calculo en Mathcad para determinar los caudales de la red por el método de Hardy-Cross

**Tercer caso: Suministro de combustible liquido de los tanques diarios n°. 4 y 6
a la caldera de las unidades 7, 8 y 9 por medio del sistema de transferencia, con
dos bombas de la estación en servicio.**

Gravedad API Fuel Oil #6

$$\begin{aligned} \text{gAPI} &:= 10.6 & \text{gesp} &:= \frac{141.5}{131.5 + \text{gAPI}} = 0.996 & \text{densH2O} &:= 999 \text{ [kg/m}^3\text{]} \\ \text{dens} &:= \text{gesp} \cdot \text{densH2O} = 994.782 \text{ [kg/m}^3\text{]} & \text{grav} &:= 9.80665 \text{ [m/s}^2\text{]} & \text{pesp} &:= \text{dens} \cdot \text{grav} = 9755.477 \text{ [N/m}^3\text{]} \end{aligned}$$

- *Filtros a la succión de las bombas del sistema de transferencia o nivel 26 (Fsbst)*

Caída máxima de presión admisible en el filtro (Fsbst) es de: 0,8 [bar] = 0.815 [kgf/cm²]

$$\text{Fsbst} := \frac{\left(0.82 \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}\right)}{\text{pesp Pa}} = 8.243 \text{ [mcl]}$$

- *Filtros a la succión de las bombas de alta presión de la caldera*

Pérdida de presión en el filtro con la malla tapada en un 70% (Fsbcc) es de: 0,2 kg/cm²

$$\text{Fsbcc} := \frac{\left(0.2 \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}\right)}{\text{pesp Pa}} = 2.01 \text{ [mcl]}$$

- *Filtros a la descarga de las bombas de alta presión de la caldera (Fdbc)*

$$\text{Fdbc} := \frac{\left(0.2 \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}\right)}{\text{pesp Pa}} = 2.01 \text{ [mcl]}$$

- *Calentadores de combustible del sistema de transferencia, ubicados en el nivel +26*

Pérdida de presión del lado del combustible es de 0,51 kg/cm²

$$\text{Cst} := \frac{\left(0.51 \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}\right)}{\text{pesp Pa}} = 5.127 \text{ [mcl]}$$

- *Calentadores de combustible de alta presión ubicados en el nivel planta cerca de las bombas*

Pérdida de presión del lado del combustible es de 0,5 kg/cm²

$$\text{Cap} := \frac{\left(0.5 \cdot \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}\right)}{\text{pesp Pa}} = 5.026 \text{ [mcl]}$$

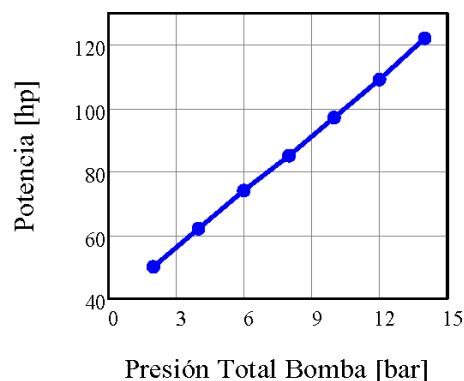
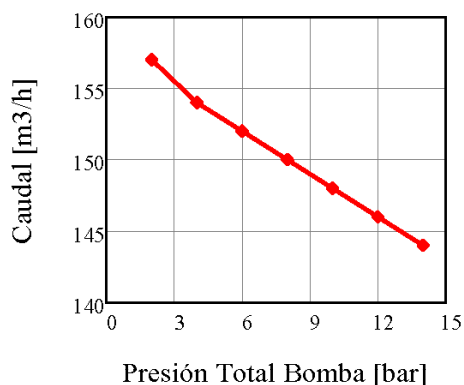
Datos y curvas de las bombas de la estación de bombeo del sistema de transferencia

Datos de la curva característica proporcionada por el fabricante (3300 cSt)

Q [m ³ /h]	157	154	152	150	148	146	144
P [bar]	2	4	6	8	10	12	14
Ni [hp]	50	62	74	85	97	109	122

BST :=

	1	2	3	4	5	6	7
1	157	154	152	150	148	146	144
2	2	4	6	8	10	12	14
3	50	62	74	85	97	109	122



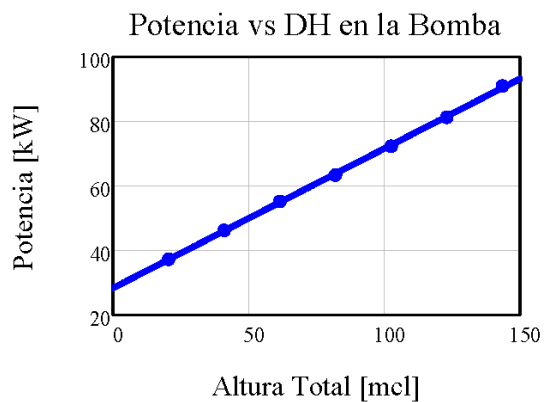
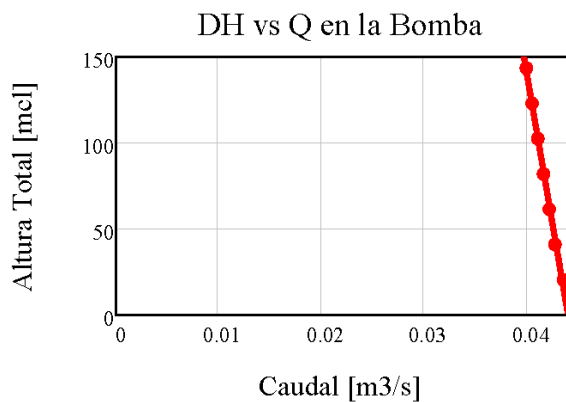
$$Q_BST := \frac{(BST^T)^{(1)}}{3600} \quad [m^3/s] \quad P_BST := (BST^T)^{(3)} \cdot 0.74569987 \quad [kW] \quad DP_BST := \frac{(BST^T)^{(2)} \cdot 100000}{pesp} \quad [mcl]$$

$$BST_A := \text{regress}(Q_BST, DP_BST, 1) \quad b1 := BST_A_{4,1} \quad b2 := BST_A_{5,1}$$

$$BST_B := \text{regress}(DP_BST, P_BST, 1) \quad b3 := BST_B_{4,1} \quad b4 := BST_B_{5,1}$$

$$DPBST(x) := b1 + b2 \cdot (x) \quad \text{Curva de Carga de Presión contra Caudal}$$

$$PBST(x) := b3 + b4 \cdot (x) \quad \text{Curva de Potencia contra Presión}$$



Datos y curvas de las bombas de la estación de bombeo alta presión de la caldera

Viscosidad del Fuel Oil n°. 6 [cSt]	300								
Presión total [kgf/cm ²]	0	10	20	30	40	50	60	70	80
Caudal [m ³ /h]	62	61	60	59	57	56	55	53	52
Eficiencia de la bomba [%]			58	65	69	71	72	73	72
Potencia eje de la bomba [kW]	26	43	60	77	94	111	128	145	162

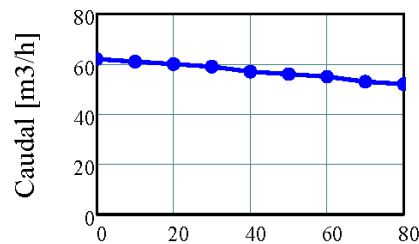
BHP :=

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	10	20	30	40	50	60	70	80
2	62	61	60	59	57	56	55	53	52
3	26	43	60	77	94	111	128	145	162

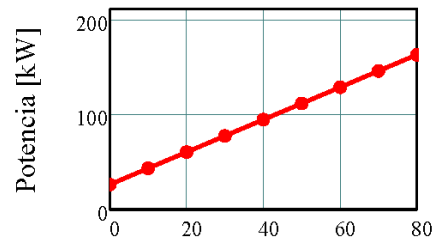
$$\text{AlturaPresion} := \frac{(\text{BHP}^T)^{(1)} \cdot \text{grav} \cdot 100^2}{\text{pesp}}$$

$$\text{Caudal} := \frac{(\text{BHP}^T)^{(2)}}{3600}$$

$$\text{Potencia} := (\text{BHP}^T)^{(3)}$$



Presión Total [kgf/cm²]



Presión Total [kgf/cm²]

MHIa := regress(Caudal, AlturaPresion, 1)

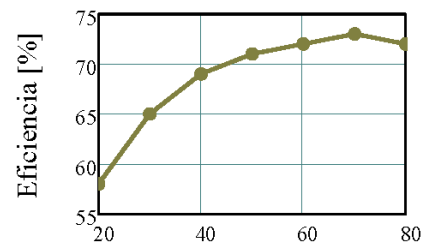
MHIb := regress(AlturaPresion, Potencia, 1)

c1 := MHIa_{4,1} c2 := MHIa_{5,1}

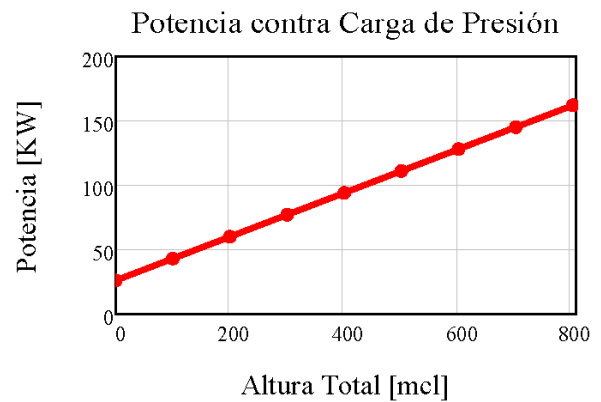
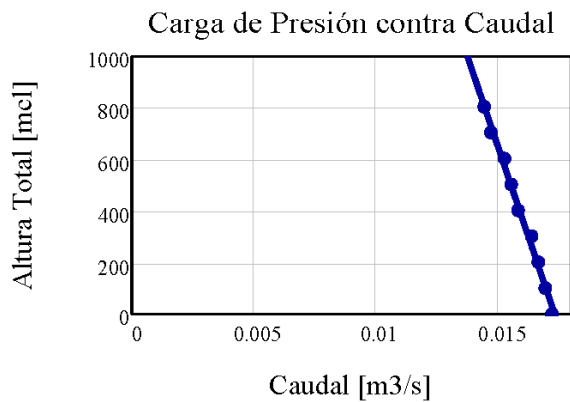
c3 := MHIb_{4,1} c4 := MHIb_{5,1}

DPBAP(x) := c1 + c2·(x) Carga de Presión en mcl

PBAP(x) := c3 + c4·(x) Potencia en kW



Presión Total [kgf/cm²]



Método Hardy-Cross con NEWTON-RAPHSON
Tercer Caso: Sistema de transferencia a Planta (TRES BOMBAS EN NIVEL +26)

Viscosidad $\nu_x := 1600 \text{ cSt}$		Temperatura $\text{temp} := 30 \text{ }^\circ\text{C}$		Temperatura $[\text{ }^\circ\text{C}]$	
(1)	(70.9)	(15.25)	(1)	(289.117)	(1)
(2)	(0)	(15.25)	(2)	(455.57)	(2)
(3)	(0)	(11.938)	(3)	(151.857)	(3)
(4)	(120.2)	(15.25)	(4)	(455.57)	(4)
(5)	(126.5)	(7.981)	(5)	(101.09)	(5)
(6)	(16.4)	(13.25)	(6)	(354.48)	(6)
(7)	(0)	(15.25)	(7)	(354.48)	(7)
(8)	(0)	(15.25)	(8)	(236.32)	(8)
(9)	(0)	(10.02)	(9)	(118.16)	(9)
(10)	(0)	(7.981)	(10)	(59.08)	(10)
(11)	(0)	(7.981)	(11)	(59.08)	(11)
(12)	(52.5)	(7.981)	(12)	(118.16)	(12)
(13)	(40.7)	(7.981)	(13)	(21.788)	(13)
(14)	(0)	(7.981)	(14)	(96.372)	(14)
(15)	(0)	(7.981)	(15)	(96.372)	(15)
(16)	(0)	(10.02)	(16)	(43.576)	(16)
(17)	(0)	(10.02)	(17)	(65.363)	(17)
(18)	(0)	(10.02)	(18)	(166.453)	(18)
(19)	(0)	(11.938)	(19)	(151.857)	(19)
(20)	(0)	(11.938)	(20)	(151.857)	(20)
	[m]	[pulgadas]		en m ³ /h	[cSt]

$$D := d \cdot 0.0254 \text{ [m]} \quad Q := \frac{Q_h}{3600} \text{ [m}^3\text{/s]} \quad \nu_1 := \frac{\nu_2}{1000000} \text{ [m}^2\text{/s]} \quad \epsilon_o := 0.04572 \text{ en mm}$$

Nivel mínimo de vaciado del tanque n.º 4

$$zmint4 := 42.33 \text{ [msnm]}$$

Nivel mínimo de vaciado del tanque n.º 6

$$zmint6 := 41.79 \text{ [msnm]} \quad \text{máximo} = 52.97 \text{ msnm}$$

Valor de ajuste de la válvula de control a la descarga de las bombas del nivel 26

$$ZVCN26 := 5 \text{ [kgf/cm}^2 \text{ man]}$$

$$zvsp := \frac{ZVCN26 \cdot 98066.5}{\text{pesp}} = 50.26 \text{ [mcl]}$$

L = longitud equivalente de tubería en metros.

d = diámetro interno de la tubería en pulgadas.

Z = altura de la entrada o salida de la tubería en metros sobre el nivel del mar

Qh = valor de caudal semilla para comenzar las iteraciones en m³/h.

D = diámetro en metros.

Q = valor de caudal en m³/s.

ν_1 = viscosidad en m²/s

Valor de ajuste de la válvula de control reguladora de presión de combustible

$$ZVC30k := 30 \text{ [kgf/cm}^2 \text{ man]}$$

$$zvfp := \frac{ZVC30k \cdot 98066.5}{\text{pesp}} = 301.57 \text{ [mcl]}$$

Valor de ajuste de la válvula de control reguladora de flujo de la caldera

$$ZVC20k := 20 \text{ [kgf/cm}^2 \text{ man]}$$

$$zvfc := \frac{ZVC20k \cdot 98066.5}{\text{pesp}} = 201.05 \text{ [mcl]}$$

Valor mínimo requerido de presión en los quemadores de la caldera

$$ZVC19k := 19 \text{ [kgf/cm}^2 \text{ man]}$$

$$zvfpq := \frac{ZVC19k \cdot 98066.5}{\text{pesp}} = 191 \text{ [mcl]}$$

$$L_2 := 139.1 + 415.0 + 78.4$$

$$L_3 := 25.7 + 12.7 + 45.5 \cdot \left(\frac{11.938}{10.02} \right)^5$$

$$L_7 := 895.3 + 16.4 \cdot \left(\frac{15.25}{13.25} \right)^5$$

$$L_8 := 152.5 + 204.9$$

$$L_9 := 68 \cdot \left(\frac{10.02}{7.981} \right)^5 + 33.8 + 75.1$$

$$L_{10} := 35.1 + 61.1 \cdot \left(\frac{7.981}{6.065} \right)^5$$

$$L_{11} := 35.1 + 61.1 \cdot \left(\frac{7.981}{6.065} \right)^5$$

$$L_{14} := 45.9 + 67.2 + 40.3 + 42.2 + 13.3 + 206.0 = 414.9$$

$$L_{15} := 168.1 + 32.0 + 1.2 \cdot \left(\frac{7.981}{4.09} \right)^5 + 40.7 + 141.2 \cdot \left(\frac{7.981}{6.065} \right)^5$$

$$L_{16} := 128.7 + 135.6$$

$$L_{17} := 762.8$$

$$L_{18} := 608.7$$

$$L_{19} := 25.7 + 12.7 + 45.5 \cdot \left(\frac{11.938}{10.02} \right)^5$$

$$L_{20} := 25.7 + 12.7 + 45.5 \cdot \left(\frac{11.938}{10.02} \right)^5$$

	1
1	70.9
2	632.5
3	147.627
4	120.2
5	126.5
6	16.4
7	928.422
8	357.4
9	321.01
10	276.187
11	276.187
12	52.5
13	40.7
14	414.9
15	831.895
16	264.3
17	762.8
18	608.7
19	147.627
20	147.627

L =

[m]

$$Re_i := \frac{4 \cdot Q_i}{\pi \nu_{l,i} D_i} \quad \text{Numero de Reynolds}$$

i := 1 .. 20

$$f := \frac{64}{Re} \quad \text{Factor de fricción para flujo laminar}$$

Dado **PARA TUBERIA 15**

ff := 0.01

$$\frac{1}{\sqrt{ff}} = -2 \log \left(\frac{\epsilon_0}{1000 \cdot 3.7 D_{15}} + \frac{2.51}{Re_{15} \sqrt{ff}} \right)^{10} \quad \text{Ecuación de Coolebrook}$$

$$f_{15} := \text{Find}(ff) = 0.03267$$

Ecuación de Darcy Weisbach

$$k_1 := f_1 \cdot \frac{L_1^8}{(D_1)^5 \cdot \pi^2 \cdot \text{grav}} \quad \frac{[L][T]^2}{[L]^5[L]} \quad K \quad \frac{Q^2}{[L]^3/[T]^2} \quad K \cdot Q^2$$

	1		1		1		1
	1		1		1		1
	164.99		1.18·10 ⁻⁴		0.388		260.688
	2		1.18·10 ⁻⁴		0.246		1475.887
	3		1.508·10 ⁻⁴		0.578		2751.897
	4		1.18·10 ⁻⁴		0.246		280.477
	5		2.255·10 ⁻⁴		0.581		17732.915
	6		1.358·10 ⁻⁴		0.275		86.301
	7		1.18·10 ⁻⁴		0.055		487.236
	8		1.18·10 ⁻⁴		0.083		281.345
	9		1.796·10 ⁻⁴		0.109		2711.703
Re =	10	$\frac{\epsilon_0}{1000D} =$	10	f =	10	k =	10
	368.128		2.255·10 ⁻⁴		0.174		11593.072
	11		2.255·10 ⁻⁴		0.174		11593.072
	12		2.255·10 ⁻⁴		0.087		1101.856
	736.256		2.255·10 ⁻⁴		1.094		10753.955
	13		2.255·10 ⁻⁴		0.107		10676.488
	58.482		2.255·10 ⁻⁴		0.033		6561.831
	14		2.255·10 ⁻⁴		0.687		14053.98
	600.495		1.796·10 ⁻⁴		0.458		27041.342
	15		1.796·10 ⁻⁴		0.443		20857.768
	8406.931		1.796·10 ⁻⁴		0.578		2751.897
	16		1.508·10 ⁻⁴		0.578		2751.897
	93.162		1.508·10 ⁻⁴				
	17						
	139.741						
	18						
	144.57						
	19						
	110.702						
	20						
	110.702						

rugosidad relativa mm/mm

321

Resultados

	Reynolds	f	k	Q [m³/s]	Q [m³/h]	
	1	2	3	4		
	1	164.99	0.3879	260.6875	0.0803	289.117
	2	259.9796	0.2462	1475.8869	0.1265	455.5699
	3	110.7024	0.5781	2751.8972	0.0422	151.8566
	4	259.9796	0.2462	280.4768	0.1265	455.5699
	5	110.2313	0.5806	17732.9147	0.0281	101.0895
	6	232.8251	0.2749	86.301	0.0985	354.4804
	7	1155.9466	0.0554	487.2359	0.0985	354.4804
	8	770.6311	0.083	281.3454	0.0656	236.3203
	9	586.4333	0.1091	2711.7033	0.0328	118.1601
RQ =	10	368.1282	0.1739	11593.0722	0.0164	59.0801
	11	368.1282	0.1739	11593.0722	0.0164	59.0801
	12	736.2563	0.0869	1101.8556	0.0328	118.1601
	13	58.4818	1.0944	10753.9549	0.0061	21.7878
	14	600.495	0.1066	10676.4878	0.0268	96.3723
	15	8406.9307	0.0327	6561.8312	0.0268	96.3723
	16	93.1623	0.687	14053.9799	0.0121	43.5756
	17	139.7413	0.458	27041.3415	0.0182	65.3635
	18	144.5699	0.4427	20857.7677	0.0462	166.453
	19	110.7024	0.5781	2751.8972	0.0422	151.8566
	20	110.7024	0.5781	2751.8972	0.0422	151.8566

Punto de operación de las bombas en servicio de la estación de bombeo de combustible del sistema de transferencia (nivel 26)

Altura total de las bombas

$$DH_{bomba} := DPBST \left[\left(RQ^{(4)} \right)_3 \right] = 65.4 \quad [mcl]$$

$$DH_{bomba} \cdot \frac{p_{esp}}{1000} = 638.03 \quad [kPa]$$

Potencia mecánica en la bomba según la gráfica del fabricante

$$P_{mecf} := PBST \left[DPBST \left[\left(RQ^{(4)} \right)_3 \right] \right] = 56.63 \quad [kW]$$

Eficiencia calculada de la bomba

$$Phid := dens \cdot grav \cdot \left(RQ^{(4)} \right)_3 \cdot DH_{bomba} \cdot 0.001 = 26.91 \quad [kW]$$

$$Eficiencia := \frac{Phid}{P_{mecf}} \cdot 100 = 47.53 \quad [\%]$$

Potencia mecánica de la bomba

$$P_{mec} := \frac{dens \cdot grav \cdot \left(RQ^{(4)} \right)_3 \cdot DH_{bomba}}{Eficiencia \cdot 10} = 56.63 \quad [kW]$$

Eficiencia del motor $Em := .95$

$$P_{elec} := \frac{P_{mec}}{Em} = 59.61 \quad [kW]$$

Corriente eléctrica en el motor de la bomba

$$Corrientemotor := \frac{P_{elec} \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 460 \cdot 0.86} = 87 \quad [A]$$

**Punto de operación de las bombas en servicio de la estación de bombeo de combustible
de alta presión de la caldera**

Altura total de las bombas

$$DH_{bomba1} := DPBAP \left[\left(RQ^{(4)} \right)_{10} \right] = 257.65 \text{ [mcl]}$$

$$DH_{bomba1} \cdot \frac{pesp}{1000} = 2513.51 \text{ [kPa]}$$

$$DPBAP \left[\left(RQ^{(4)} \right)_{11} \right] = 257.65 \text{ [mcl]}$$

Potencia mecánica en la bomba según la gráfica del fabricante

$$P_{mecfl} := PBAP \left[DPBAP \left[\left(RQ^{(4)} \right)_{10} \right] \right] = 69.57 \text{ [kW]}$$

$$PBAP \left[DPBAP \left[\left(RQ^{(4)} \right)_{11} \right] \right] = 69.57 \text{ [kW]}$$

Potencia hidráulica de la bomba

$$Phidl := dens \cdot grav \cdot \left(RQ^{(4)} \right)_{10} \cdot DH_{bomba1} \cdot 0.001 = 41.25 \text{ [kW]}$$

Eficiencia calculada de la bomba

$$Eficiencia1 := \frac{Phidl}{P_{mecfl}} \cdot 100 = 59.29\%$$

Potencia mecánica de la bomba

$$P_{mec1} := \frac{dens \cdot grav \cdot \left(RQ^{(4)} \right)_{10} \cdot DH_{bomba1}}{Eficiencia1 \cdot 10} = 69.57 \text{ [kW]}$$

Eficiencia del motor $Em1 := 0.95$

$$P_{elec1} := \frac{P_{mec1}}{Em1} = 73.23 \text{ [kW]}$$

Corriente eléctrica en el motor de la bomba

$$Corrientemotor1 := \frac{P_{elec1} \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 4160 \cdot 0.80} = 12.7 \text{ [A]}$$

Velocidad del flujo [m/s]

	1
1	0.682
2	1.074
3	0.584
4	1.074
5	0.87
6	1.107
7	0.836
8	0.557
9	0.645
10	0.508
11	0.508
12	1.017
13	0.188
14	0.829
15	0.829
16	0.238
17	0.357
18	0.909
19	0.584
20	0.584

$$v := \frac{4RQ^{(4)}}{\pi \cdot D^2} =$$

$$k := RQ^{(3)}$$

$$q := RQ^{(4)}$$

$$n := 1 \dots 20$$

$$hf_n := k_n \cdot (q_n)^2$$

Perdidas de carga [mcl]

	1
1	1.681
2	23.635
3	4.897
4	4.492
5	13.983
6	0.837
7	4.724
8	1.212
9	2.921
10	3.122
11	3.122
12	1.187
13	0.394
14	7.651
15	4.702
16	2.059
17	8.914
18	44.591
19	4.897
20	4.897

$$hf_n =$$

Velocidad media del fluido en la tubería [m/s]

Perdidas de presión por cada tramo de tubería equivalente en Pa

$$\Delta P_n := \frac{128 \cdot \nu_1 \cdot \text{dens} \cdot L_n \cdot (RQ^{(4)})_n}{\pi \cdot (D_n)^4}$$

$$\Delta P_n =$$

$$\frac{(hf_n \cdot p_{esp})}{1000} =$$

	1
1	$1.64 \cdot 10^4$
2	$2.306 \cdot 10^5$
3	$4.777 \cdot 10^4$
4	$4.382 \cdot 10^4$
5	$1.364 \cdot 10^5$
6	$8.163 \cdot 10^3$
7	$4.609 \cdot 10^4$
8	$1.183 \cdot 10^4$
9	$2.85 \cdot 10^4$
10	$3.046 \cdot 10^4$
11	$3.046 \cdot 10^4$
12	$1.158 \cdot 10^4$
13	$3.843 \cdot 10^3$
14	$7.464 \cdot 10^4$
15	$1.069 \cdot 10^4$
16	$2.009 \cdot 10^4$
17	$8.696 \cdot 10^4$
18	$4.35 \cdot 10^5$
19	$4.777 \cdot 10^4$
20	$4.777 \cdot 10^4$

Perdidas de Presión [Pa]

	1
1	16.403
2	230.572
3	47.769
4	43.818
5	136.407
6	8.163
7	46.086
8	11.827
9	28.499
10	30.46
11	30.46
12	11.58
13	3.843
14	74.641
15	45.875
16	20.088
17	86.964
18	435.005
19	47.769
20	47.769

Perdidas de presión [kPa]

Tramo a la succión de la bombas del nivel 26

$$\Delta P_{3_1} := \frac{128 \cdot \nu_{1_3} \cdot \text{dens} \cdot (25.7 + 12.7) \cdot (\text{RQ}^{(4)})_3}{\pi \cdot (D_3)^4} = 12425.369 [\text{Pa}]$$

Tramo a la descarga de la bombas del nivel 26

$$\Delta P_{3_2} := \frac{128 \cdot \nu_1 \cdot \rho_3 \cdot \text{dens} \cdot (45.5) \cdot (RQ^{(4)})_3}{\pi \cdot (10.02 \cdot 0.0254)^4} = 29665.035 [\text{Pa}]$$

Tramo a la succión de la bombas de alta presión

$$\Delta P_{10,1} := \frac{128 \cdot \nu_{10} \cdot \text{dens.}(35.1) \cdot (RQ^{(4)})_{10}}{\pi \cdot (7.981 \cdot 0.0254)^4} = 3871.04 [\text{Pa}]$$

Tramo a la descarga de la bombas de alta presión

$$\Delta P_{10_2} := \frac{128 \cdot \nu_{10} \cdot \text{dens.}(61.1) \cdot (RQ^{(4)})_{10}}{\pi \cdot (6.065 \cdot 0.0254)^4} = 20205.41 \text{ [Pa]}$$

NPSH disponible > NPSH requerido

$$NPSH = h_a - h_{vap} + h_{st} - h_{fs}$$

h_a = presión absoluta sobre la superficie de líquido en el tanque
 h_{vap} = presión de vapor
 h_{st} = nivel del líquido con respecto a la línea central de la bomba
 h_{fs} = pérdidas en la línea de succión de la bomba

Presión atmosférica

$$P_{atm} := 101325 [\text{Pa}]$$

Presión de vapor del Fuel Oil #6 a 37,8 °C

$$P_{vap} := \frac{0.6 \text{ psi}}{Pa} = 4136.85 [\text{Pa}]$$

Diferencia de altura entre el nivel de líquido en el tanque n.º 6 y la succión de las bombas del sistema de transferencia

$$h_{st1} := z_{mint6} - 4.164 = 37.63 [\text{m}]$$

NPSH disponible del las bombas del sistema de transferencia

$$NPSH1 := P_{atm} - P_{vap} + h_{st1} \cdot \text{pesp} - (\Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + F_{sbt} \cdot \text{pesp}) = 124433.2 [\text{Pa}] \quad \frac{NPSH1}{\text{pesp}} = 12.76 [\text{mcl}]$$

Cabezal mínimo de succión las bombas del tanque n.º 10

$$P_{suc10} := P_{atm} + h_{st1} \cdot \text{pesp} - (\Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + F_{sbt} \cdot \text{pesp}) = 128570.05 [\text{Pa}] \quad \frac{P_{suc10}}{\text{pesp}} = 13.18 [\text{mcl}]$$

Diferencia de altura entre la descarga de la bombas del nivel 26 y la succión de las bombas de la caldera

$$h_{st2} := 27.3 - 4.020 = 23.28 [\text{m}]$$

Perdidas de presión en la tubería de descarga de la bomba del tanque n.º 10

$$h_{fs} := \Delta P_3 + \Delta P_4 + \Delta P_6 + C_{st} \cdot \text{pesp} + \Delta P_7 + \Delta P_9 + F_{sbc} \cdot \text{pesp} + \Delta P_{10} = 229728.584 [\text{Pa}]$$

$$h_{fs} = 229728.584 [\text{Pa man}] \quad \frac{h_{fs}}{\text{pesp}} = 23.55 [\text{mcl}]$$

NPSH disponible del las bombas de la caldera

$$NPSH2 := (P_{atm} + D_{Hbomba} \cdot \text{pesp}) - P_{vap} + h_{st2} - h_{fs} = 505516.3 [\text{Pa}] \quad \frac{NPSH2}{\text{pesp}} = 51.82 [\text{mcl}]$$

Cabezal mínimo de succión de las bombas de la caldera

$$P_{sucB} := (P_{atm} + D_{Hbomba} \cdot \text{pesp}) + h_{st2} - h_{fs} = 509653.151 [\text{Pa man}] \quad \frac{P_{sucB}}{\text{pesp}} = 52.24 [\text{mcl}]$$

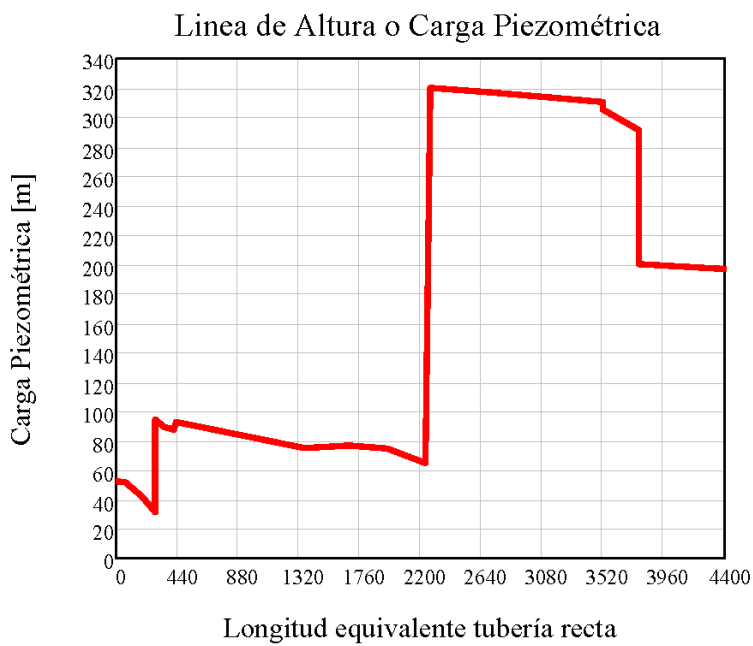
Tramo de tres segmentos a la salida del calentador de alta presión

$$\Delta P_{16} := \frac{128 \cdot v_{16} \cdot \text{dens} \cdot (42.2 + 13.3 + 206.0) \cdot (RQ^{(4)})_{16}}{\pi \cdot (7.981 \cdot 0.0254)^4} = 49379.9 [\text{Pa}]$$

Carga Piezometrica

$$\begin{aligned}
 CP_1 &:= \frac{Patm}{pesp} + z_{mint6} & LH_1 &:= 0 \\
 CP_2 &:= CP_1 - hf_1 + (Z_1 - Z_2) = 51.3 & LH_2 &:= LH_1 + L_1 \\
 CP_3 &:= CP_2 - hf_2 + (Z_2 - Z_3) = 41.56 & LH_3 &:= LH_2 + L_4 \\
 CP_4 &:= CP_3 - \frac{\Delta P3_1}{pesp} - F_{sbst} + (Z_3 - Z_4) = 30.94 & LH_4 &:= LH_3 + (89 + 4.6) \\
 CP_5 &:= CP_4 + DPBST \left[\left(RQ^{(4)} \right)_3 \right] - \frac{\Delta P3_2}{pesp} + (Z_4 - Z_5) = 94.1 & LH_5 &:= LH_4 \\
 CP_6 &:= CP_5 - hf_4 + (Z_6 - Z_5) = 89.31 & LH_6 &:= LH_5 + 62.5 \\
 CP_7 &:= CP_6 - hf_4 - (Z_6 - Z_7) = 87.12 & LH_7 &:= LH_6 + 72.2 \\
 CP_8 &:= CP_7 - C_{st} - hf_7 + (Z_8 - Z_9) = 92.47 & LH_8 &:= LH_7 + L_6 \\
 CP_9 &:= CP_8 - hf_9 + (Z_{10} - Z_9) - Cap = 74.72 & LH_9 &:= LH_8 + L_7 \\
 CP_{10} &:= CP_9 - hf_9 - C_{st} + (Z_9 - Z_{10}) = 76.48 & LH_{10} &:= LH_9 + L_9 \\
 CP_{11} &:= CP_{10} - \frac{\Delta P10_2}{pesp} = 74.4 & LH_{11} &:= LH_{10} + L_{10} \\
 CP_{12} &:= CP_{11} - hf_{11} - F_{sbc} + (Z_{11} - Z_{14}) = 64.47 & LH_{12} &:= LH_{11} + L_{11} \\
 CP_{13} &:= CP_{12} - \frac{\Delta P10_2}{pesp} + DPBAP \left[\left(RQ^{(4)} \right)_{10} \right] = 320.05 & LH_{13} &:= LH_{12} + 35.1 \\
 CP_{14} &:= CP_{13} = 320.05 & LH_{14} &:= LH_{13} \\
 CP_{15} &:= CP_{14} - hf_{14} + (Z_{14} - Z_{15}) = 317.2 & LH_{15} &:= LH_{14} + L_{14} \\
 CP_{16} &:= CP_{15} - hf_{15} - F_{dbc} = 310.49 & LH_{16} &:= LH_{15} + L_{15} \\
 CP_{17} &:= CP_{16} - C_{st} = 305.36 & LH_{17} &:= LH_{16} \\
 CP_{18} &:= CP_{17} - \frac{\Delta P16_1}{pesp} - (Z_{19} - Z_{16}) = 291.3 & LH_{18} &:= LH_{17} + (42.2 + 13.3 + 206.0) \\
 CP_{19} &:= 200 & LH_{19} &:= LH_{18} \\
 CP_{20} &:= CP_{19} - hf_{16} - (Z_{20} - Z_{19}) = 195.54 & LH_{20} &:= LH_{19} + L_{15}
 \end{aligned}$$

CP =		1	LH =		1
	1	52.2		1	0
	2	51.3		2	70.9
	3	41.6		3	191.1
	4	30.9		4	284.7
	5	94.1		5	284.7
	6	89.3		6	347.2
	7	87.1		7	419.4
	8	92.5		8	435.8
	9	74.7		9	1364.2
	10	76.5		10	1685.2
	11	74.4		11	1961.4
	12	64.5		12	2237.6
	13	320.1		13	2272.7
	14	320.1		14	2272.7
	15	317.2		15	2687.6
	16	310.5		16	3519.5
	17	305.4		17	3519.5
	18	291.3		18	3781
	19	200		19	3781
	20	195.5		20	4612.9



Viscosidad cSt
 Nivel combustible [msnm]
 Caudal de Retorno m3/h
 Presión total de la bomba bar
 Caudal de Retorno m3/h
 Eficiencia
 Corriente en el motor
 Presión total de la bomba bar
 Eficiencia
 Corriente en el motor

$$RQt := \begin{pmatrix} 3300 & 41.79 & 86.28 & 10.81 & 66.11 & 57.94 & 117.17 & 24.19 & 58.56 & 12.4 \\ 1600 & 41.79 & 101.09 & 6.38 & 65.36 & 47.53 & 87 & 25.14 & 59.29 & 12.7 \\ 650 & 41.79 & 110.36 & 3.64 & 64.8 & 35.16 & 68.3 & 25.84 & 59.81 & 12.93 \\ 3300 & 47.38 & 87.78 & 10.33 & 66.15 & 57.15 & 113.89 & 24.15 & 58.53 & 12.39 \\ 1600 & 47.38 & 102.7 & 5.87 & 65.38 & 45.7 & 83.51 & 25.11 & 59.27 & 12.7 \\ 650 & 47.38 & 112.04 & 3.1 & 64.81 & 31.82 & 64.68 & 25.83 & 59.8 & 12.93 \\ 3300 & 52.97 & 89.27 & 9.85 & 66.18 & 56.3 & 110.61 & 24.1 & 58.49 & 12.38 \\ 1600 & 52.97 & 104.31 & 5.36 & 65.4 & 43.69 & 80.02 & 25.09 & 59.26 & 12.69 \\ 650 & 52.97 & 113.72 & 2.57 & 64.82 & 28.04 & 61.06 & 25.83 & 59.8 & 12.92 \end{pmatrix}$$

$$RF := \begin{bmatrix} vx \\ zmint6 \\ (RQ^{(4)})_{5,3600} \\ DHbomba \cdot \frac{pesp}{100000} \\ (RQ^{(4)})_{17,3600} \\ Eficiencia \\ Corrientemotor \\ DHbomba1 \cdot \frac{pesp}{100000} \\ Eficiencia1 \\ Corrientemotor1 \end{bmatrix} \quad RF = \begin{bmatrix} 1600 \\ 41.79 \\ 101.09 \\ 6.38 \\ 65.36 \\ 47.53 \\ 87 \\ 25.14 \\ 59.29 \\ 12.7 \end{bmatrix}$$

[cSt] Viscosidad estimada del fuel oil en el tanque n.º 4 ó 6
 [msnm] Nivel de combustible en el tanque n.º 4 ó 6
 [m³/h] Caudal de retorno sistema de transferencia anillo tanque n.º 4
 [bar] Presión total de la bomba nivel 26
 [m³/h] Caudal de retorno de las calderas hacia el anillo tanque n.º 4
 [%] Eficiencia bomba nivel 26
 [A] Corriente en el motor de la bomba nivel 26
 [bar] Presión total de la bomba de combustible de la caldera
 [%] Eficiencia bomba de combustible de la caldera
 [A] Corriente en el motor de la bomba de combustible de la caldera

RF =	3300	1600	650
	41.79	41.79	41.79
	86.28	101.09	110.36
	10.81	6.38	3.64
	66.11	65.36	64.8
	57.94	47.53	35.16
	117.17	87	68.3
	24.19	25.14	25.84
	58.56	59.29	59.81
	12.4	12.7	12.93

RF =	3300	1600	650
	47.38	47.38	47.38
	87.78	102.7	112.04
	10.33	5.87	3.1
	66.15	65.38	64.81
	57.15	45.7	31.82
	113.89	83.51	64.68
	24.15	25.11	25.83
	58.53	59.27	59.8
	12.39	12.7	12.93

RF =	3300	1600	650
	52.97	52.97	52.97
	89.27	104.31	113.72
	9.85	5.36	2.57
	66.18	65.4	64.82
	56.3	43.69	28.04
	110.61	80.02	61.06
	24.1	25.09	25.83
	58.49	59.26	59.8
	12.38	12.69	12.92

Hoja de calculo en Mathcad para determinar los caudales de la red por el método de Hardy-Cross

Cuarto caso: Suministro de combustible liquido del tanque n.º 7 a la caldera en la unidad 7, por medio del sistema de gravedad.

Gravedad API Fuel Oil 6

$$g_{API} := 10.6$$

$$\text{densH}_2\text{O} := 999 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$g_{esp} := \frac{141.5}{131.5 + g_{API}} = 0.9958$$

$$\text{dens} := g_{esp} \cdot \text{densH}_2\text{O} = 994.7818 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$g_{rav} := 9.80665 \text{ [m/s}^2\text{]}$$

$$\text{pesp} := \text{dens} \cdot g_{rav} = 9755.477 \text{ [N/m}^3\text{]}$$

- *Filtros a la succión de las bombas de alta presión de la caldera*

Perdida de presión en el filtro con la malla tapada en un 70% (Fsbcc) es de: 0,2 kg/cm²

$$F_{sbcc} := \frac{\left(0.2 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}\right)}{\text{pesp Pa}} = 2.0105 \text{ [mcl]}$$

- *Filtros a la descarga de las bombas de alta presión de la caldera* (Fdbc)

$$F_{dbc} := \frac{\left(0.2 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}\right)}{\text{pesp Pa}} = 2.0105 \text{ [mcl]}$$

- *Calentadores de combustible de alta presión ubicados en el nivel planta cerca de las bombas*

Pérdida de presión del lado del combustible es de 0,5 kg/cm²

$$C_{ap} := \frac{\left(0.5 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}\right)}{\text{pesp Pa}} = 5.0262 \text{ [mcl]}$$

- *Filtros de retorno de los quemadores de la caldera* (Frqc)

$$F_{rqc} := \frac{\left(0.2 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}\right)}{\text{pesp Pa}} = 2.0105 \text{ [mcl]}$$

Datos y curvas de las bombas de la estación de bombeo alta presión de la caldera

Viscosidad del Fuel Oil n°. 6 [cSt]	300									
Presión total [kgf/cm ²]	0	10	20	30	40	50	60	70	80	
Caudal [m³/h]	62	61	60	59	57	56	55	53	52	
Eficiencia de la bomba [%]			58	65	69	71	72	73	72	
Potencia eje de la bomba [kW]	26	43	60	77	94	111	128	145	162	

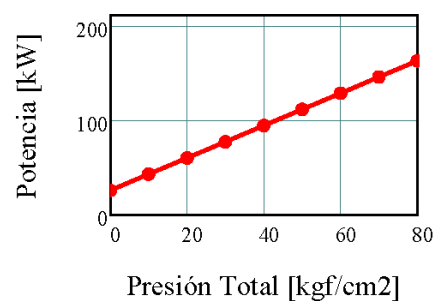
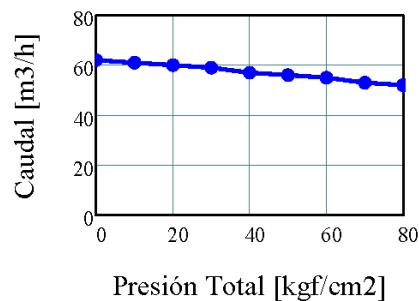
BHP :=

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	10	20	30	40	50	60	70	80
2	62	61	60	59	57	56	55	53	52
3	26	43	60	77	94	111	128	145	162

$$\text{AlturaPresion} := \frac{(\text{BHP}^T)^{(1)} \cdot \text{grav} \cdot 100^2}{\text{pesp}}$$

$$\text{Caudal} := \frac{(\text{BHP}^T)^{(2)}}{3600}$$

$$\text{Potencia} := (\text{BHP}^T)^{(3)}$$



MHIa := regress(Caudal, AlturaPresion, 1)

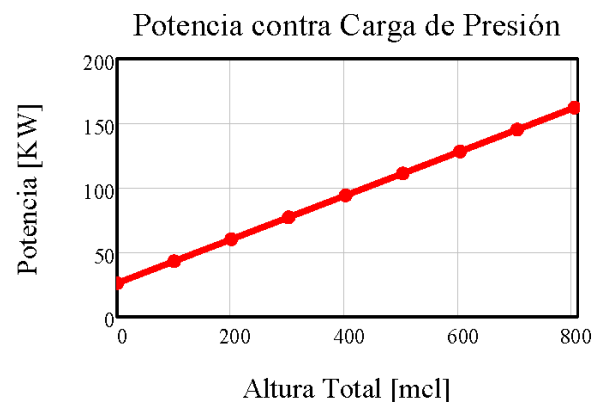
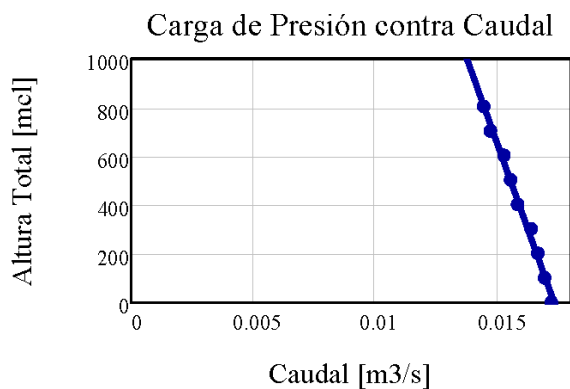
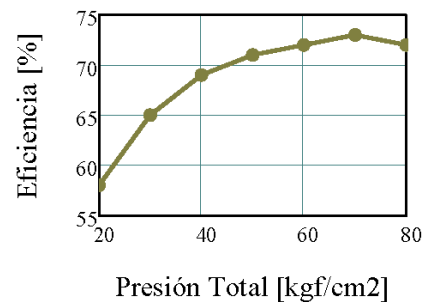
MHIb := regress(AlturaPresion, Potencia, 1)

c1 := MHIa_{4,1} c2 := MHIa_{5,1}

c3 := MHIb_{4,1} c4 := MHIb_{5,1}

DPBAP(x) := c1 + c2·(x) Carga de Presión en mcl

PBAP(x) := c3 + c4·(x) Potencia en kW



Método Genérico con Hardy-Cross
Cuarto Caso: Tanque n.º 7 a la caldera de la unidad 7, por el sistema de gravedad

Viscosidad vx := 280 cSt **Temperatura** temp := 60 [°C]

(1)	(706.6)	(15.25)	(1)	(95.9733)	(3300)	(1)	(30)	(1)
2	496.5	15.25	2	117.1506	vx	2	temp	2
3	0	10.02	3	21.1773	150	3	70	3
4	0	10.02	4	117.1506	vx	4	temp	4
5	0	7.981	5	58.5753	vx	5	temp	5
6	0	7.981	6	58.5753	vx	6	temp	6
7	L := 52.5	d := 7.981	7	Qh := 117.1506	v2 := vx	7	Temp := temp	7
8	40.7	7.981	8	9.3154	vx	8	temp	8
9	153.4	7.981	9	107.8352	vx	9	temp	9
10	168.1	7.981	10	107.8352	20	10	120	10
11	22	7.981	11	95.9733	20	11	120	11
12	33.4	5.047	12	11.8619	20	12	120	12
13	0	7.981	13	21.1773	150	13	70	13
	[m]	[pulgadas]		en m3/h	[cSt]		Temperatura [°C]	

$$D := d \cdot 0.0254 \quad [\text{m}]$$

$$Q := \frac{Q_h}{3600} \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

$$\nu_1 := \frac{\nu_2}{1000000} \quad [\text{m}^2/\text{s}]$$

$$i := 1..13$$

$$\varepsilon_0 := 0.04572 \quad \text{en mm}$$

L = longitud equivalente de tubería en metros.

d = diámetro interno de la tubería en pulgadas.

Z = altura de la entrada o salida de la tubería en metros sobre el nivel del mar

Qh = valor de caudal semilla para comenzar las iteraciones en m³/h.

D = diámetro en metros.

Q = valor de caudal en m³/s.

ν1 = viscosidad en m²/s

Nivel mínimo de vaciado del tanque n.º 7

$$zmint7 := 26.13 \quad [\text{msnm}]$$

Altura máxima de llenado del tanque n.º 7 = 37.26 msnm

Valor de ajuste de la válvula de control reguladora de flujo de la caldera

$$ZVC20k := 20 [\text{kgf}/\text{cm}^2 \text{ man}]$$

$$zvfc := \frac{ZVC20k \cdot 98066.5}{\text{pesp}} = 201.05 [\text{mcl}]$$

Valor de ajuste de la válvula de control reguladora de presión de combustible

$$ZVC30k := 30 [\text{kgf}/\text{cm}^2 \text{ man}]$$

$$zvvp := \frac{ZVC30k \cdot 98066.5}{\text{pesp}} = 301.57 [\text{mcl}]$$

Valor mínimo requerido de presión en los quemadores de la caldera

$$ZVC19k := 19 [\text{kgf}/\text{cm}^2 \text{ man}]$$

$$zvvpq := \frac{ZVC19k \cdot 98066.5}{\text{pesp}} = 191 [\text{mcl}]$$

$$L_3 := 56.0 + 375.0$$

$$L_4 := 64.2 \cdot \left(\frac{10.02}{7.981} \right)^5 + 33.8 + 75.1$$

$$L_5 := 35.1 + 61.1 \cdot \left(\frac{7.981}{6.065} \right)^5$$

$$L_6 := 35.1 + 61.1 \cdot \left(\frac{7.981}{6.065} \right)^5$$

$$L_{10} := 45.9 + 67.2 + 40.3$$

$$L_{10} := 168.2 + 32.0 + 1.2 \cdot \left(\frac{7.981}{4.09} \right)^5 + 40.7 + 141.2 \cdot \left(\frac{7.981}{6.065} \right)^5$$

$$L_{12} := \frac{168.1}{2}$$

$$L_{13} := 24.1 \cdot \left(\frac{5.047}{1.61} \right)^5 + 22.6 \cdot \left(\frac{5.047}{4.09} \right)^5 + 108.9 + 55.3$$

Longitud equivalente de tubería recta [m]

	1
1	706.6
2	496.5
3	431
4	309.157
5	276.187
6	276.187
7	52.5
8	40.7
9	153.4
10	831.995
11	22
12	84.05
13	7524.349

L =

$$Re_1 := \frac{4 \cdot Q_1}{(\pi \nu 1 \cdot D_1)} \quad \text{Numero de Reynolds}$$

$$f := \frac{64}{Re} \quad \text{Factor de fricción para flujo laminar}$$

Dado

$ff := 0.01$ **PARA TUBERIA 10** $Re > 2000$

$$\frac{1}{\sqrt{ff}} = -2 \log \left(\frac{\epsilon_0}{1000 \cdot 3.7 D_{10}} + \frac{2.51}{|Re_{10}| \cdot \sqrt{ff}} \right)^{10} \quad \text{Ecuación de Coolebrook}$$

$$f_{10} := \text{Find}(ff) = 0.0317$$

Dado

$ff := 0.01$ **PARA TUBERIA 11** $Re > 2000$

$$\frac{1}{\sqrt{ff}} = -2 \log \left(\frac{\epsilon_0}{1000 \cdot 3.7 D_{11}} + \frac{2.51}{|Re_{11}| \cdot \sqrt{ff}} \right)^{10} \quad \text{Ecuación de Coolebrook}$$

$$f_{11} := \text{Find}(ff) = 0.0327$$

Ecuación de Darcy Weisbach

$$k_1 := f_1 \cdot \frac{L_1 \cdot 8}{(D_1)^5 \cdot \pi^2 \cdot \text{grav}}$$

$$\frac{[L][T]^2}{[L]^5[L]}$$

$$\frac{K}{[T]^2/[L]^5}$$

$$\frac{Q^2}{[[L]^3/[T]]^2}$$

$$\frac{K \cdot Q^2}{[L]}$$

Re =

	1
1	26.555
2	382.024
3	196.194
4	581.424
5	364.983
6	364.983
7	729.967
8	58.044
9	671.922
10	9406.913
11	8372.15
12	1636.307
13	246.318

$\frac{\epsilon_0}{1000D} =$

	1
1	0.00012
2	0.00012
3	0.00018
4	0.00018
5	0.00023
6	0.00023
7	0.00023
8	0.00023
9	0.00023
10	0.00023
11	0.00023
12	0.00036
13	0.00023

f =

	1
1	2.4101
2	0.1675
3	0.3262
4	0.1101
5	0.1754
6	0.1754
7	0.0877
8	1.1026
9	0.0952
10	0.0317
11	0.0327
12	0.0391
13	0.2598

k =

	1
1	16142.278
2	788.425
3	10882.636
4	2634.076
5	11692.961
6	11692.961
7	1111.349
8	10834.996
9	3527.773
10	6372.972
11	173.721
12	7848.511
13	472027.602

rugosidad relativa mm/mm

Dado

$$[1] \quad Q_2 = Q_1 + Q_3$$

$$[2] \quad Q_2 = Q_4$$

$$[3] \quad Q_4 = Q_5 + Q_6$$

$$[4] \quad Q_7 = Q_5 + Q_6$$

$$[5] \quad Q_7 = Q_8 + Q_9$$

$$[6] \quad Q_3 = Q_{13}$$

$$[7] \quad Q_9 = Q_{10}$$

$$[8] \quad Q_{10} = Q_{11} + Q_{12}$$

$$[9] \quad Q_{13} = Q_8 + Q_{12}$$

$$[10] \quad \text{zmint7} - k_1(Q_1)^2 - k_2(Q_2)^2 - k_4(Q_4)^2 - \text{Fsbc} - k_5(Q_5)^2 + (c1 + c2 \cdot Q_5) - k_7(Q_7)^2 - k_8(Q_8)^2 = \text{zvvp}$$

$$[11] \quad -k_5(Q_5)^2 + (c1 + c2 \cdot Q_5) + k_6(Q_6)^2 - (c1 + c2 \cdot Q_6) = 0$$

$$[12] \quad 12.55 + \text{zvfc} - k_{10}(Q_{10})^2 - k_{11}(Q_{11})^2 = \text{zvpq} + 17.9$$

$$[13] \quad \text{zmint7} - k_1(Q_1)^2 + k_3(Q_3)^2 + k_{13}(Q_{13})^2 + \text{Frqc} + k_{12}(Q_{12})^2 + k_{10}(Q_{10})^2 = 12.55 + \text{zvfc}$$

$\text{RQ} := \text{Minerr}(\text{Q})$

Resultados:

Q [m³/s]		Q [m³/h]			
RQ =	1	0.02666	1	95.973	Caudal que sale del tanque n.º 6
	2	0.03254	2	117.151	
	3	0.00588	3	21.177	Retorno de combustible al anillo de calentamiento
	4	0.03254	4	117.151	Colector succión de las bombas de caldera
	5	0.01627	5	58.575	Bombas de la caldera
	6	0.01627	6	58.575	Colector descarga de las bombas de caldera
	7	0.03254	7	117.151	Retorno por válvula reguladora de presión
	8	0.00259	8	9.315	Caudal de suministro al calentador
	9	0.02995	9	107.835	Caudal a la descarga del calentador
	10	0.02995	10	107.835	Suministro de combustible del quemador
	11	0.02666	11	95.973	Retorno por bypass de arranque - anillo calentamiento
	12	0.00329	12	11.862	
	13	0.00588	13	21.177	Retorno de combustible al anillo de calentamiento

Punto de operación de las bombas en servicio de la estación de bombeo de combustible de alta presión de la caldera

Altura total de las bombas

$$DH_{bomba1} := DPBAP(RQ_5) = 296.8961 \text{ [mcl]}$$

$$DPBAP(RQ_6) = 296.8961 \text{ [mcl]}$$

Potencia mecánica en la bomba según la gráfica del fabricante

$$P_{mecf1} := PBAP(DPBAP(RQ_5)) = 76.209 \text{ [kW]}$$

$$PBAP(DPBAP(RQ_6)) = 76.209 \text{ [kW]}$$

Potencia hidráulica de la bomba

$$Phid1 := \text{dens} \cdot \text{grav} \cdot RQ_5 \cdot DH_{bomba1} \cdot 0.001 = 47.1265 \text{ [kW]}$$

Eficiencia calculada de la bomba

$$Eficiencia1 := \frac{Phid1}{P_{mecf1}} \cdot 100 = 61.84 \text{ [%]}$$

Potencia mecánica de la bomba

$$P_{mec1} := \frac{\text{dens} \cdot \text{grav} \cdot (RQ)_5 \cdot DH_{bomba1}}{Eficiencia1 \cdot 10} = 76.21 \text{ [kW]}$$

Eficiencia del motor $Em1 := 0.95$

$$P_{elec1} := \frac{P_{mec1}}{Em1} = 80.22 \text{ [kW]}$$

Corriente eléctrica en el motor de la bomba

$$Corriente_{motor1} := \frac{P_{elec1} \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 4160 \cdot 0.80} = 13.92 \text{ [A]}$$

Velocidad del flujo [m/s]

	1
1	0.2262
2	0.2762
3	0.1156
4	0.6397
5	0.5041
6	0.5041
7	1.0083
8	0.0802
9	0.9281
10	0.9281
11	0.826
12	0.2553
13	0.1823

$$v := \frac{4RQ}{\pi \cdot D^2} =$$

$$q := RQ$$

$$n := 1 \dots 13$$

$$hf_n := k_n \cdot (q_n)^2$$

Perdidas de carga [mcl]

	1
1	11.4726
2	0.8349
3	0.3766
4	2.7894
5	3.0956
6	3.0956
7	1.1769
8	0.0725
9	3.1653
10	5.7182
11	0.1235
12	0.0852
13	16.3344

$$hf_n =$$

Perdidas de presión por cada tramo de tubería equivalente en Pa

$$\Delta P_n := \frac{128 \cdot v_{1n} \cdot \text{dens} \cdot L_n \cdot RQ_n}{\pi \cdot (D_n)^4}$$

	1
1	111920.435
2	8145.038
3	3673.825
4	27212.035
5	30199.321
6	30199.321
7	11481.094
8	707.743
9	30879.15
10	11962.789
11	281.53
12	831.263
13	159349.902

$$\Delta P_n =$$

$$\frac{(hf_n \cdot \text{pesp})}{1000} =$$

	1
1	111.9205
2	8.145
3	3.6738
4	27.212
5	30.1993
6	30.1993
7	11.4811
8	0.7077
9	30.8792
10	55.7836
11	1.2045
12	0.8313
13	159.3498

$$1 \text{ psi} = 6894.7573 \text{ Pa}$$

	1
1	16.2327
2	1.1813
3	0.5328
4	3.9468
5	4.38
6	4.38
7	1.6652
8	0.1026
9	4.4786
10	1.7351
11	0.0408
12	0.1206
13	23.1117

$$\frac{\Delta P_n}{6894.7573} =$$

Perdidas de Presión [Pa]

Perdidas de presión [kPa]

Perdidas de presión [psi]

NPSH disponible > NPSH requerido

$$NPSH = h_a - h_{vap} + h_{st} - h_{fs}$$

$$P_{atm} := 101325 [\text{Pa}]$$

$$P_{vap} := \frac{0.6 \text{ psi}}{\text{Pa}} = 4136.8544 [\text{Pa}]$$

$$h_{st} := z_{mint7} - 4.020 = 22.11 [\text{m}]$$

Succión de las bombas de la caldera

$$\Delta P5_1 := \frac{128 \cdot v1_5 \cdot \text{dens} \cdot (35.1) \cdot RQ_5}{\pi \cdot (7.981 \cdot 0.0254)^4} = 3837.9658 [\text{Pa}]$$

Descarga de las bombas de la caldera

$$\Delta P5_2 := \frac{128 \cdot v1_5 \cdot \text{dens} \cdot (61.1) \cdot RQ_5}{\pi \cdot (6.065 \cdot 0.0254)^4} = 20032.7799 [\text{Pa}]$$

NPSH disponible

$$NPSH := P_{atm} - \Delta P_1 - \Delta P_2 - \Delta P_4 - \Delta P5_1 - F_{sbc} \cdot p_{esp} + h_{st} \cdot p_{esp} - P_{vap} = 142152.98 [\text{Pa}] \quad \frac{NPSH}{p_{esp}} = 14.57 [\text{m}]$$

Cabezal mínimo de succión

$$HEAD1 := P_{atm} - \Delta P_1 - \Delta P_2 - \Delta P_4 - \Delta P5_1 + h_{st} \cdot p_{esp} - F_{sbc} \cdot p_{esp} = 146289.83 [\text{Pa abs}] \quad \frac{HEAD1}{p_{esp}} = 14.9957 [\text{m}]$$

$$HGL_1 := z_{mint7}$$

$$LH_1 := 0$$

$$HGL_2 := HGL_1 - hf_1$$

$$LH_2 := LH_1 + L_1$$

$$HGL_3 := HGL_2 - hf_2$$

$$LH_3 := LH_2 + L_2$$

$$HGL_4 := HGL_3 - hf_4 - F_{sbc}$$

$$LH_4 := LH_3 + L_4$$

$$HGL_5 := HGL_4 - \frac{\Delta P5_1}{p_{esp}}$$

$$LH_5 := LH_4 + 1$$

$$HGL_6 := HGL_5 + DPBAP(RQ_5)$$

$$LH_6 := LH_5$$

$$HGL_7 := HGL_6 - \frac{\Delta P5_2}{p_{esp}}$$

$$LH_7 := LH_6 + 1$$

$$HGL_8 := HGL_7 - hf_7$$

$$LH_8 := LH_7 + L_7$$

$$HGL_9 := HGL_8 - hf_9$$

$$LH_9 := LH_8 + L_9$$

$$HGL_{10} := HGL_9 - hf_{10}$$

$$LH_{10} := LH_9 + L_{10}$$

$$HGL_{11} := 200$$

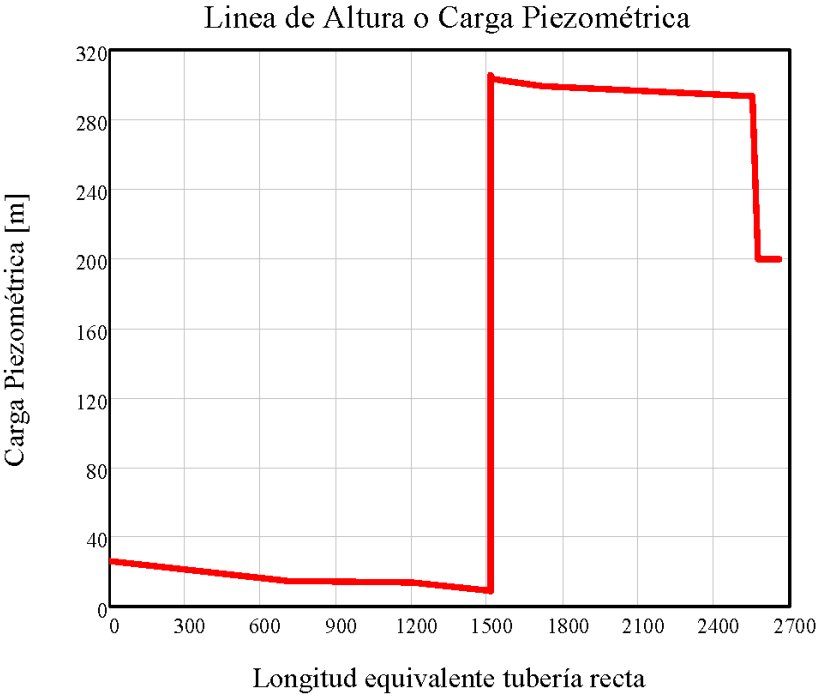
$$LH_{11} := LH_{10} + L_{11}$$

$$HGL_{12} := HGL_{11} - hf_{11}$$

$$LH_{12} := LH_{11} + L_{12}$$

	1
1	26.1
2	14.7
3	13.8
4	9
5	8.6
HGL = 6	305.5
7	303.5
8	302.3
9	299.1
10	293.4
11	200
12	199.9

	1
1	0
2	706.6
3	1203.1
4	1512.3
5	1513.3
LH = 6	1513.3
7	1514.3
8	1566.8
9	1720.2
10	2552.2
11	2574.2
12	2658.2



Viscosidad cSt
 Nivel combustible [msnm]
 Caudal de Retorno m3/h
 Caudal de Retorno m3/h
 Presión total de la bomba bar
 Eficiencia
 Corriente en el motor

$$RQt := \begin{pmatrix} 280 & 26.13 & 21.18 & 11.86 & 28.96 & 61.84 & 13.92 \\ 280 & 31.695 & 21.32 & 11.86 & 28.42 & 61.51 & 13.75 \\ 280 & 37.26 & 21.46 & 11.86 & 27.88 & 61.18 & 13.57 \\ 650 & 26.13 & 20.91 & 11.86 & 29.99 & 62.42 & 14.24 \\ 650 & 31.695 & 21.05 & 11.86 & 29.45 & 62.12 & 14.07 \\ 650 & 37.26 & 21.19 & 11.86 & 28.91 & 61.8 & 13.9 \\ 780 & 26.13 & 20.81 & 11.86 & 30.34 & 62.62 & 14.35 \\ 780 & 31.695 & 20.96 & 11.86 & 29.8 & 62.32 & 14.18 \\ 780 & 37.26 & 21.1 & 11.86 & 29.26 & 62.01 & 14.01 \\ 1600 & 26.13 & 20.22 & 11.86 & 32.59 & 63.75 & 15.06 \\ 1600 & 31.695 & 20.36 & 11.86 & 32.05 & 63.5 & 14.89 \\ 1600 & 37.26 & 20.5 & 11.86 & 31.51 & 63.23 & 14.72 \end{pmatrix}$$

$$RF := \begin{bmatrix} zmint7 \\ vx \\ (RQ)_3 \cdot 3600 \\ (RQ)_{12} \cdot 3600 \\ DHbomba1 \cdot \frac{pesp}{100000} \\ Eficiencia1 \\ Corrientemotor1 \end{bmatrix} \quad RF = \begin{pmatrix} 26.13 \\ 280 \\ 21.18 \\ 11.86 \\ 28.96 \\ 61.84 \\ 13.92 \end{pmatrix} \quad \begin{array}{ll} \text{[msnm]} & \text{Nivel de combustible en el tanque n.º 7} \\ \text{[cSt]} & \text{Viscosidad del fluido a la entrada de las bombas} \\ \text{[m³/h]} & \text{Retorno de combustible hacia el anillo de calentamiento} \\ \text{[m³/h]} & \text{Retorno de las calderas por el bypass de arranque} \\ \text{[bar]} & \text{Presión total de la bomba de alta presión de combustible} \\ \text{[%]} & \text{Eficiencia bomba de alta presión de combustible} \\ \text{[A]} & \text{Corriente en el motor de la bomba de combustible} \end{array}$$

$\text{RF} = \begin{pmatrix} 26.13 \\ 280 \\ 21.18 \\ 11.86 \\ 28.96 \\ 61.84 \\ 13.92 \end{pmatrix}$	$\text{RF} = \begin{pmatrix} 26.13 \\ 650 \\ 20.91 \\ 11.86 \\ 29.99 \\ 62.42 \\ 14.24 \end{pmatrix}$	$\text{RF} = \begin{pmatrix} 26.13 \\ 780 \\ 20.81 \\ 11.86 \\ 30.34 \\ 62.62 \\ 14.35 \end{pmatrix}$	$\text{RF} = \begin{pmatrix} 26.13 \\ 1600 \\ 20.22 \\ 11.86 \\ 32.59 \\ 63.75 \\ 15.06 \end{pmatrix}$
$\text{RF} = \begin{pmatrix} 31.7 \\ 280 \\ 21.32 \\ 11.86 \\ 28.42 \\ 61.51 \\ 13.75 \end{pmatrix}$	$\text{RF} = \begin{pmatrix} 31.7 \\ 650 \\ 21.05 \\ 11.86 \\ 29.45 \\ 62.12 \\ 14.07 \end{pmatrix}$	$\text{RF} = \begin{pmatrix} 31.7 \\ 780 \\ 20.96 \\ 11.86 \\ 29.8 \\ 62.32 \\ 14.18 \end{pmatrix}$	$\text{RF} = \begin{pmatrix} 31.7 \\ 1600 \\ 20.36 \\ 11.86 \\ 32.05 \\ 63.5 \\ 14.89 \end{pmatrix}$
$\text{RF} = \begin{pmatrix} 37.26 \\ 280 \\ 21.46 \\ 11.86 \\ 27.88 \\ 61.18 \\ 13.57 \end{pmatrix}$	$\text{RF} = \begin{pmatrix} 37.26 \\ 650 \\ 21.19 \\ 11.86 \\ 28.91 \\ 61.8 \\ 13.9 \end{pmatrix}$	$\text{RF} = \begin{pmatrix} 37.26 \\ 780 \\ 21.1 \\ 11.86 \\ 29.26 \\ 62.01 \\ 14.01 \end{pmatrix}$	$\text{RF} = \begin{pmatrix} 37.26 \\ 1600 \\ 20.5 \\ 11.86 \\ 31.51 \\ 63.23 \\ 14.72 \end{pmatrix}$