

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DESARROLLO DE HERRAMIENTAS ELECTRÓNICAS PARA LOS SERVICIOS INDUSTRIALES DEL COMPLEJO MEJORADOR DE CRUDO DE PETROLERA AMERIVEN.

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de
Venezuela por el
Br. Pedro Antonio Villarroel Mijares
para optar al título de
Ingeniero Químico

Caracas, julio de 2005

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DESARROLLO DE HERRAMIENTAS ELECTRÓNICAS PARA LOS SERVICIOS INDUSTRIALES DEL COMPLEJO MEJORADOR DE CRUDO DE PETROLERA AMERIVEN.

TUTOR ACADÉMICO: Prof. José Francisco Fernández.
TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Kilkeny Isturiz.

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de
Venezuela por el
Br. Pedro Antonio Villarroel Mijares
para optar al título de
Ingeniero Químico

Caracas, julio de 2005

Caracas, julio de 2005

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Pedro A. Villarroel M., titulado:

"Desarrollo de herramientas electrónicas para los servicios industriales del complejo mejorador de crudo de Petrolera Ameriven."

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Químico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por los autores, lo declaran APROBADO.

Prof. Mary Luz Alonso
Jurado

Prof. Johnny Vásquez
Jurado

Ing. Kilkeny Isturiz
Tutor

Prof. José F. Fernández
Tutor

Dedicatoria

Quisiera primeramente honrar la memoria de mis abuelos, espero que donde sea que estén puedan vernos y sentirse orgullosos de los frutos que su siembra ha dado, una familia unida y trabajadora que fomenta los principios que ustedes dejaron.

Luego, pero no menos especial, dedico esta tesis a ti madre, se que estás leyendo estas líneas y no cabe en ti de tanta felicidad y orgullo, pues así eres tú, bella.

Este trabajo es tan tuyo como mío, pues sin ti no hubiese podido; tus regaños, tu apoyo, tus comidas, tus consejos, y en fin, todo el amor que depositas en mi a diario, lejos o cerca. Este logro es para ti.

Por último quiero ofrendar este trabajo a Víctor Adolfo García, espero que crezcas grande, fuerte, sano e inteligente, y que ya grande te pueda servir como ejemplo a seguir y a superar. Dios te bendiga hijo.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios, al Creador, por la vida, mi país, mi familia, mi existencia, y por absolutamente todo, incluyendo el colocar personas y entes tan extraordinarios como a los que a continuación brindo mi gratitud.

Quiero dar reconocimiento a la grandiosa Universidad Central de Venezuela, *“la casa que vence la sombra”*, institución que me ha brindado la oportunidad de formarme como un profesional integral. Concretamente a la Facultad de Ingeniería y muy especialmente a *“mi”* escuela, en donde aprendí sobre procesos y teorías académicas, sobre el papel de un ingeniero en la sociedad, sobre el trabajo en equipo y sobre muchos otros aspectos, fruto de las experiencias que en sus instalaciones viví.

A mi tutor industrial, la ingeniero Kilkeny Istúriz, por sus consejos, apoyo y sabia guiatúra durante mi transitar por mi primera experiencia en la industria petrolera, en lo que fue el desarrollo de este trabajo especial de grado.

Quiero agradecer también a mi tutor académico, el Prof. José F. Fernández, por ser el faro que guió este barco a buen puerto, por tener siempre una visión clara de lo que se debía hacer, por la excelente instrucción que me dio como profesor antes y durante la realización de este trabajo, y además por ser uno más de mis amigos.

Gracias a Petrolera Ameriven S.A., por darme la oportunidad de aprender en sus instalaciones la práctica de lo que se ve en los libros, y más. Gracias por permitirme la posibilidad de ser miembro temporal de esa familia, de conocer las excelentes instalaciones del Mejorador, y de codearme con el excelentísimo capital humano que ahí labora. Aprovecho la oportunidad para agradecer al personal administrativo y al cuerpo de ingenieros que me apoyaron durante la realización de este trabajo, especialmente a los Ingenieros Félix D. C., Pedro E., Horacio B., José V. (Cheo), Carlos P., José G., Ana H., José A., José M. J., Gustavo G., Anmarie V., Natacha M., Oscar P., Rebeca P., Rebeca N., Daniel B., Olga B., Ana R., Rafael G., Darwin O., Francisco L., Raúl V., Jesús F., Ornaldy C., Maxdis Z., Mariana O., Yurimar B., Sausan A., Deyanira R., Lisbeth V., Xavier B., Glency S., Eliani R., Alejandro M., Maria A. A. e Iván R. Gracias a todos, son “de clase mundial”

Muchísimas gracias para mi familia Mijares-Simanca, de todo corazón muchísimas gracias, no sólo por proveerme de un techo y comida, que ya es bastante, si no por entregarme el calor de hogar que tanto hace falta cuando uno está lejos de su lar. Gracias de nuevo.

A toda la familia Mijares, con su extensa y variada cantidad de ramificaciones, a mis hermanos (aunque soy hijo único), primos, tíos, etc., son el mejor soporte que se puede tener. Gracias, los quiero enormemente.

Agradecimiento especial a dos personas que tan sólo les faltó concebirme, a mi papá Fernando Aponte y a mi mamá Teresa Mijares, qué les puedo decir, si hoy estoy aquí es por su apoyo incondicional y su amor.

A los profesores que me instruyeron, especialmente a Robinson Arcos, Marta Serpa, Ana Cecilia, Francisco Dos Santos, José Moreno, Samir Marzuka, Wadou Baré (excelente persona), Mariluz Alonso, José Francisco (nuevamente), Rafael Martín (modelo a seguir), Salvatore Valentino, Carlos Morales (excelsa persona y tremendo amigo), Berenice Blanco y Humberto Kum. Sin duda alguna, resaltan, son de los mejores.

De igual forma al personal administrativo de la escuela, desde el profesor Luís García en la dirección, hasta los distintos departamentos. Mención especial para dos damas muy queridas, Iraida Rojas y Leudith Figuera.

A mis compañeros y amigos de la U.C.V., son demasiados y no creo poder nombrarlos a todos, pero igual los llevo en mi mente y en mi corazón, a los que se fueron a Italia, los que se quedaron, los que ya se graduaron, con los que compartí los viajes a Morrocoy, los congresos, el ping-pong, el DESBIT, las Quimiolimpiadas, los laboratorios, la música, los proyectos, Puerto la Cruz, Puerto Ordaz, los inter-escuela, la parroquia, Higuerote, el introductorio, la Colonia, Maracaibo, Cuyagua, y tantas otros momentos y lugares. A Adriana García y a Daniela Márquez, por su amistad y el apoyo tecnológico cuando mi computadora se averió. Quiero reconocer especialmente la amistad de ciertas personas como Andreina Gonzáles, Oscar Rojas, Maria Elena Arcos, Ramiro Ortega, Maria del Mar Karam, Jessica Da Costa, Ronald Díaz, Karina Díaz y Víctor García.

A mis amigos de siempre, Fernando J. Aponte (más que un hermano), Milagros García (otra madre), Samy Depablos, Aura Orozco, Yvette Nuñez, Juan Carlos Tarazona, Cesar Santiago, Hernán García, Moisés Pirela, a mi familia Gomez-Pantoja, a mis amigos de AFS y los del Colegio San Agustín, gracias a ellos y a sus familias, están y estarán en mi corazón.

A Julio Villarroel, gracias por darme esa carga genética que sin duda supiste aportar, y que me constituye como ser humano.

Y ya para ir finalizando, he reservado este último párrafo para reconocer a un ser muy especial, siempre he pensado que lo mejor se debe dejar para el final. Quiero agradecer a mi madre, a la persona que me dio la existencia y quien me ha guiado durante mis años de vida. No tengo palabras ni elocuencia suficiente para expresar el inmenso e infinito agradecimiento que siento hacia ella; toda una vida no bastará. Gracias a ti soy el hombre que soy. Te amo.

Villarroel M., Pedro A.

**DESARROLLO DE HERRAMIENTAS ELECTRÓNICAS PARA
LOS SERVICIOS INDUSTRIALES DEL COMPLEJO
MEJORADOR DE CRUDO DE PETROLERA AMERIVEN.**

Tutor Académico: Prof. José F. Fernández. Tutor Industrial: Ing. Kilkeny Isturiz. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. Año 2005, 164 p.

Palabras Claves: Servicios Industriales, Agua de Enfriamiento, Vapor, Gas Combustible, Herramientas Electrónicas, Evaluación Hidráulica, Correlación de Datos.

Resumen. El presente trabajo tiene por objeto principal la creación de una herramienta de evaluación hidráulica para el sistema de distribución de agua de enfriamiento, y otra de proyección de consumos para los sistemas de vapor y de gas combustible, en el Mejorador de Petrolera Ameriven S.A., dada la necesidad existente de contar con herramientas que permitan evaluar los sistemas, o predecir su funcionamiento bajo ciertos escenarios operacionales, con el fin de determinar y evitar problemas, y así ahorrar tiempo y dinero.

Para alcanzar los objetivos planteados primero se hizo una documentación sobre los procesos, para así poder describir los sistemas involucrados y fijar las bases necesarias para desarrollar las herramientas. Luego el trabajo se dividió en dos partes, una por cada herramienta.

Para la herramienta de evaluación hidráulica hizo el levantamiento de la información correspondiente al sistema de agua de enfriamiento, para obtener la herramienta en sí como resultado primordial; luego se creó el Caso Base para ser simulado, de donde se obtuvieron las presiones de la simulación correspondientes a las llegadas a cada usuario del servicio. Posteriormente, se levantó el perfil de presiones del sistema de distribución del servicio, del cual se obtuvieron las presiones reales, que serían contrastadas con las de la simulación para validar la herramienta con desviaciones inferiores al 5%.

Con la herramienta creada y validada, se establecieron diferentes escenarios que permitieron concluir que es posible trabajar con dos bombas, siempre y cuando el flujo sea suficiente, ya que las presiones obtenidas resultan adecuadas para la operación; un aumento del doble en la rugosidad no acarrea mayores aumentos en la caída de presión, por lo que no se requieren acciones especiales para este caso; existe capacidad hidráulica para brindar el servicio a una nueva unidad con consumo de 2914 gpm; y finalmente, no se debe aumentar el diámetro de las tuberías de descarga de las bombas, ya que no inducen reducciones significativas en la caída de presión.

Para la herramienta de proyección de consumos, se descargaron los datos hacia archivos EXCEL desde el ASPEN, en donde se depuraron, eliminando varios datos debido a la inestabilidad que presentó la planta durante los días de estudio, luego se crearon los diagramas de dispersión de los diferentes servicios con respecto a la carga a sus respectivas unidades, para luego ajustar las curvas que correlacionaran ambas variables y así obtener las ecuaciones destinadas a la herramienta, obteniendo un total de 17 ecuaciones, de un total de 29 casos estudiados de esta forma. Existieron casos en donde no hubo correlación, en los cuales se fijaron cantidades constantes con errores asociados menores al 10%. Finalmente se creó un archivo en EXCEL en donde el usuario introduciría la carga deseada a cada unidad, así como los poderes caloríficos de los gases involucrados, permitiendo así el cálculo de los consumos y generaciones por cada unidad, y el balance de masa total para cada servicio.

Por último, se recomienda hacer nuevos estudios como la creación de un caso base a partir de un perfil de presiones en conjunto con un perfil de flujo, evaluaciones hidráulicas del sistema de agua de enfriamiento dentro de los límites de batería de los usuarios, y el levantamiento de datos en períodos de operación estables en la planta.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
1.1. Planteamiento del problema.....	4
1.2. Antecedentes.....	8
1.3. Objetivos.....	12
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	14
2.1. Operación del mejorador.....	15
2.2. Servicios industriales.....	19
2.3. Sistema de agua de enfriamiento.....	20
2.3.1. Capacidades.....	22
2.3.2. Secciones del sistema.....	23
2.4. Sistema de generación y distribución de vapor.....	28
2.5. Sistema de gas combustible.....	31
2.6. Fundamentos de evaluación hidráulica.....	32
2.7. Métodos para ajustar datos.....	39
2.8. Programas informáticos.....	41
2.8.1. INPLANT.....	41
2.8.2. ASPEN PROCESS EXPLORER.....	44
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....	47
3.1. Planificación.....	48
3.2. Génesis y seguimiento teórico.....	49
3.3. Desarrollo de la herramienta de evaluación hidráulica.....	50
3.3.1. Concepción de la herramienta.....	51
3.3.2. Validación de la herramienta.....	59
3.3.3. Manejo de escenarios.....	65
3.4. Desarrollo de la herramienta de proyección de consumos.....	67
3.5. Presentación final de las herramientas.....	73
CAPÍTULO IV: RESULTADOS.....	75
4.1. Consideraciones preliminares.....	76
4.1.1. Descripción del sistema de agua de enfriamiento.....	76
4.1.2. Descripción del sistema de generación y distribución de vapor.....	80
4.1.3. Descripción del sistema de generación y distribución de gas combustible.....	83
4.2. Herramienta de evaluación hidráulica.....	85

4.2.1. Concepción de la herramienta.....	85
4.2.2. Validación de la herramienta.....	87
4.2.3. Desarrollo de escenarios.....	95
4.3. Herramienta de proyección de consumos.....	101
4.3.1. Depuración de datos.....	102
4.3.2. Obtención de correlaciones.....	104
4.3.3. Archivo ejecutable.....	140
4.4. Manuales de operación.....	145
4.4.1. Herramienta de evaluación hidráulica.....	146
4.4.2. Herramienta de proyección de consumos.....	153
CONCLUSIONES.....	157
RECOMENDACIONES.....	161
REFERENCIA CITADA.....	162
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	164

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1. Características de la materia prima y del producto final.....	15
Tabla N° 2. NPSH de las bombas para diferentes flujos.....	24
Tabla N° 3. Proporción de longitud equivalente de diversos accesorios.....	38
Tabla N° 4. Lenguaje INPLANT vs. Proceso. (General).....	43
Tabla N° 5. Sistema de unidades utilizado (variables principales).....	53
Tabla N° 6. Aspectos globales predeterminados para la herramienta.....	54
Tabla N° 7. Variables fijadas para la simulación del Caso Base.....	60
Tabla N° 8. Extracto de hoja de etiquetas (“tags”) del archivo “Download”	70
Tabla N° 9. Consumos Típicos de agua de enfriamiento.....	79
Tabla N° 10. Características de los distintos niveles de presión para el vapor de servicio en el Mejorador de Petrolera Ameriven.....	83
Tabla N° 11. Lenguaje INPLANT vs. Proceso. (Detalle de Sinks y Sources).....	86
Tabla N° 12. Presiones y flujos de simulación del Caso Base.....	88
Tabla N° 13. Presiones reales del sistema de distribución de agua de enfriamiento.....	89
Tabla N° 14. Presiones reales vs. Presiones de simulación (tabla preeliminar).....	91
Tabla N° 15. Presiones y flujos de simulación de Caso Base (adaptación).....	93
Tabla N° 16. Segunda comparación de presiones. Simulación vs. Realidad.....	94
Tabla N° 17. Resultados para el caso en que operan dos bombas.....	96
Tabla N° 18. Resultados para una rugosidad del doble de la original.....	98
Tabla N° 19. Resultados para el caso de la incorporación de una Unidad nueva.....	99
Tabla N° 20. Caída de presión entre las descargas de las bombas y el límite de batería de la Unidad 47, para cuatro distintos diámetros de tubería.....	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1. División territorial de la Faja Petrolífera del Orinoco entre las asociaciones estratégicas.....	4
Figura N° 2. Ubicación geográfica del Mejorador de Petrolera Ameriven	6
Figura N° 3. Diagrama de bloques simplificado del Mejorador de Petrolera Ameriven.....	16
Figura N° 4. Red de Tuberías del Sistema de Agua de Enfriamiento.....	27
Figura N° 5. Pantalla de trabajo del INPLANT.....	44
Figura N° 6. Gráfica de tendencias del ASPEN, para el caso específico de la monitorización del Sistema de Temperaturas de la Unidad 12.....	45
Figura N° 7. Diagrama de flujo de la metodología.....	48
Figura N° 8. Algoritmo general del proceso de una simulación en el INPLANT.....	52
Figura N° 9. Diagrama de Interconexión de Tuberías del Sistema de Distribución y retorno de Agua de Enfriamiento. Área 70.....	55
Figura N° 10. Diagrama de bloques del sistema de distribución de agua de enfriamiento.....	56
Figura N° 11. Diagrama Isométrico del Área 70, Unidad 47.....	58
Figura N° 12. Ventana de edición de valores para una salida.....	61
Figura N° 13. Ventana de edición de valores para una llegada.....	61
Figura N° 14. Ventana de INPLANT con la última página de reporte de errores.....	62
Figura N° 15. Esquema inicial para el desarrollo de la herramienta de proyección de consumos.....	68
Figura N° 16. Flujograma de la segunda planificación para desarrollar la herramienta de proyección de consumos.....	71
Figura N° 17. Esquema simplificado del ciclo del agua de enfriamiento.....	76
Figura N° 18. Esquema detallado del sistema de agua de enfriamiento.....	78
Figura N° 19. Esquema del sistema de generación y distribución de vapor en sus tres niveles de presión.....	81
Figura N° 20. Diagrama de bloque simplificado de la Unidad 45.....	84
Figura N° 21. Primer diagrama de flujo del sistema, en ambiente INPLANT.....	85

Figura N° 22. Diagrama de flujo del sistema (definitivo), en ambiente INPLANT.....	87
Figura N° 23. Gráfico de tendencias en el Área 20 con períodos eliminados.....	102
Figura N° 24. Consumo de vapor de alta con respecto a la carga a la Unidad 10.....	105
Figura N° 25. Consumo de vapor de alta con respecto a la carga a la Unidad 10. Rango limitado para valores entre 210 y 280 MBD.....	105
Figura N° 26. Consumo de vapor de media presión con respecto a la carga de la Unidad 10.....	107
Figura N° 27. Consumo de vapor de baja con respecto a la carga de la Unidad 10.....	108
Figura N° 28. Generación de vapor de baja presión con respecto a la carga de la Unidad 10.....	109
Figura N° 29. Consumo de gas combustible con respecto a la carga de la Unidad 10.....	110
Figura N° 30. Consumo de vapor de alta con respecto a la carga hacia el Área 20.....	111
Figura N° 31. Consumo de vapor de media con respecto a la carga del Área 20.....	112
Figura N° 32. Generación de vapor de media con respecto a la carga del Área 20.....	114
Figura N° 33. Consumo de gas combustible con respecto a la carga del Área 20.....	116
Figura N° 34. Generación de gas combustible con respecto a la carga del Área 20.....	118
Figura N° 35. Consumo de vapor de alta presión con respecto a la carga de la Unidad 28.....	119
Figura N° 36. Generación de vapor de media presión con respecto a la carga de la Unidad 28.....	120
Figura N° 37. Consumo de vapor de baja presión con respecto a la carga de la Unidad 28.....	121
Figura N° 38. Generación de vapor de baja presión con respecto a la carga de la Unidad 28.....	122
Figura N° 39. Consumo de vapor de alta presión con respecto a la carga de gas a la unidad, durante una situación de arranque.....	123

Figura N° 40. Consumo de vapor de alta con respecto a la carga de la Unidad 14.....	125
Figura N° 41. Consumo de vapor de alta con respecto a la carga de la Unidad 16.....	125
Figura N° 42. Consumo de vapor de alta presión de la Unidad 14 con respecto al tiempo.....	126
Figura N° 43. Consumo de vapor de alta presión de la Unidad 16 con respecto al tiempo.....	126
Figura N° 44. Consumo de vapor de alta con respecto a la carga de la Unidad 15.....	127
Figura N° 45. Consumo de gas combustible con respecto a la carga de la Unidad 14.....	129
Figura N° 46. Consumo de gas combustible con respecto a la carga a la Unidad 16.....	129
Figura N° 47. Generación de gas combustible con respecto a la carga la Unidad 15.....	130
Figura N° 48. Consumo de vapor de alta presión con respecto a la carga al tren 1 de la Unidad 22.....	131
Figura N° 49. Consumo de vapor de alta presión con respecto a la carga del tren 2 de la Unidad 22.....	132
Figura N° 50. Generación de vapor de alta presión con respecto a la carga al tren 1 de la Unidad 22.....	133
Figura N° 51. Generación de vapor de alta presión con respecto a la carga al tren 2 de la Unidad 22.....	134
Figura N° 52. Consumo de gas combustible con respecto a la carga al tren 1 de la Unidad 22.....	135
Figura N° 53. Consumo de gas combustible con respecto a la carga al tren 2 de la Unidad 22.....	136
Figura N° 54. Consumo de gas combustible con respecto a la cantidad de vapor de alta generada en la caldera 1 de la Unidad 41.....	139
Figura N° 55. Consumo de gas combustible con respecto a la cantidad de vapor de alta generada en la caldera 2 de la Unidad 41.....	139
Figura N° 56. Pantalla de la página “Data” del archivo “Interfaz”.....	141
Figura N° 57. Pantalla de la página “Res. Glob” del archivo “Interfaz”.....	143
Figura N° 58. Pantalla de la página “Res. Esp. FG” del archivo “Interfaz”.....	144

Figura N° 59. Pantalla de la página “Res. Esp. Vap” del archivo “Interfaz”	145
Figura N° 60. Ambiente de trabajo INPLANT.....	147
Figura N° 61. Ambiente INPLANT en modo para ver resultados (“View Output”).....	149
Figura N° 62. Ventana de introducción de valores para una source. Ejemplo de la bomba A (PA).....	150
Figura N° 63. Ventana de introducción de valores para un sink. Ejemplo del Área 70...	150
Figura N° 64. Recuadro de desactivación. Ejemplo de “sink” que se deshabilita.....	151
Figura N° 65. Segundo sector superior izquierdo. Introducción de poderes caloríficos.....	154
Figura N° 66. Sector para la introducción de cargas y turbinas en operación.....	154
Figura N° 67. Sector botones. Actualización y visualización de resultados.....	155

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo ha sido desarrollado debido a la necesidad existente en Petrolera Ameriven S.A., de contar con una forma práctica, rápida y eficaz, de controlar el uso de los servicios industriales del Mejorador de Crudo Hamaca. Éste ha sido estructurado para ir avanzando desde la misma comprensión y entorno del problema, hasta los resultados encontrados.

En primer lugar, se expone en el Capítulo I todo lo concerniente al problema, ubicándolo geográficamente y operacionalmente, haciendo énfasis en la importancia de los servicios industriales y en la carencia de herramientas electrónicas que permitiesen evaluar o predecir el funcionamiento del sistema bajo ciertas condiciones, determinar problemas o prevenirlos, y así ahorrar tiempo, dinero y energía. Sin embargo, debido a lo extenso que resultaría hacer herramientas para todos los aspectos de todos los servicios, se decidió realizar dos herramientas sin precedentes en la planta: una de evaluación hidráulica para el sistema de distribución de agua de enfriamiento y otra de proyección para los servicios de vapor y de gas combustible.

El objetivo de la herramienta de evaluación es determinar restricciones en el suministro de agua de enfriamiento a las diferentes Unidades consumidoras para diferentes escenarios de operación, mientras que la herramienta de proyección de consumos busca desarrollar una aplicación que permita la determinación de la cantidad correcta de vapor y de gas combustible que se debe consumir a partir de la carga determinada a una Unidad dada.

Luego, en el Capítulo II, se desarrolla la teoría que enmarca el trabajo, específicamente aquella relacionada con la operación general del Mejorador, los servicios industriales (acentuando los de agua de enfriamiento, vapor y gas combustible), los fundamentos de una evaluación hidráulica (mecánica de fluidos), el ajuste de curvas (métodos numéricos), y los programas informáticos (softwares) a utilizar: INPLANT y ASPEN PROCESS EXPLORER.

En el Capítulo III se presenta la metodología seguida para alcanzar los objetivos fijados. Se siguió un esquema que partía desde un punto en común, con la etapa de “génesis y seguimiento teórico”, en donde se alcanzó la comprensión de los sistemas en estudio. Luego el esquema se bifurca para pasar al desarrollo por separado de cada una de las herramientas, presentando paso a paso las acciones que se materializaron en los archivos electrónicos y, en el caso de la herramienta de evaluación, el análisis de ciertos escenarios. La metodología termina con la etapa de “presentación final de las herramientas”, en donde se manifiesta la manera de entregar los resultados a la empresa, en forma oral, archivos ejecutables electrónicos y en documentación escrita, tanto en formato digital como impreso.

Finalmente se exhiben los resultados en el Capítulo IV, tomando como referencia las etapas principales de la metodología. Los primeros resultados están dados en términos de descripción de los procesos involucrados; luego, del desarrollo de la herramienta de evaluación hidráulica, se muestra como se obtuvieron la herramienta en sí, la validación y los escenarios manejados. Del desarrollo de la herramienta de proyección de consumos, se presentan básicamente los resultados de relación de las variables, representados como correlaciones, y el acabado de la herramienta en sí. Por último, se exponen los manuales operativos complementos de las herramientas, resultados propios de la presentación final de las mismas.

El desarrollo de este proyecto ha permitido precisar ciertas fallas operacionales o relacionadas con la filosofía de operación, las cuales se exponen en el texto y se establecen en forma de recomendaciones al final del trabajo. De igual forma éste ha sido de utilidad en la evaluación y creación de escenarios diversos para Petrolera Ameriven S.A.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

En esta sección se presentan las condiciones y circunstancias que dieron pie para realizar el presente proyecto, así como la forma en que se pretende solucionar el problema.

1.1.- Planteamiento del problema.

Petrolera Ameriven S.A. es una empresa privada creada para explotar los recursos energéticos de la Faja Petrolífera del Orinoco, tal y como lo hacen otras tres empresas que la precedieron (**Petrozuata**, **Sincor** y **Operadora Cerro Negro**), en lo que se ha denominado Asociaciones Estratégicas, entre capital venezolano y capital privado extranjero. Los socios de esta empresa son **Conoco-Phillips** (socio mayoritario), que tiene el 40% de las acciones, y **PDVSA** y **Chevron-Texaco**, con 30% cada uno, los cuales se fijaron un período renovable de 35 años de actividad, con una inversión cercana a los cuatro mil millones de dólares. En la figura N°1 se puede apreciar como están distribuidos los campos petroleros de la Faja, entre las cuatro Asociaciones Estratégicas antes citadas.

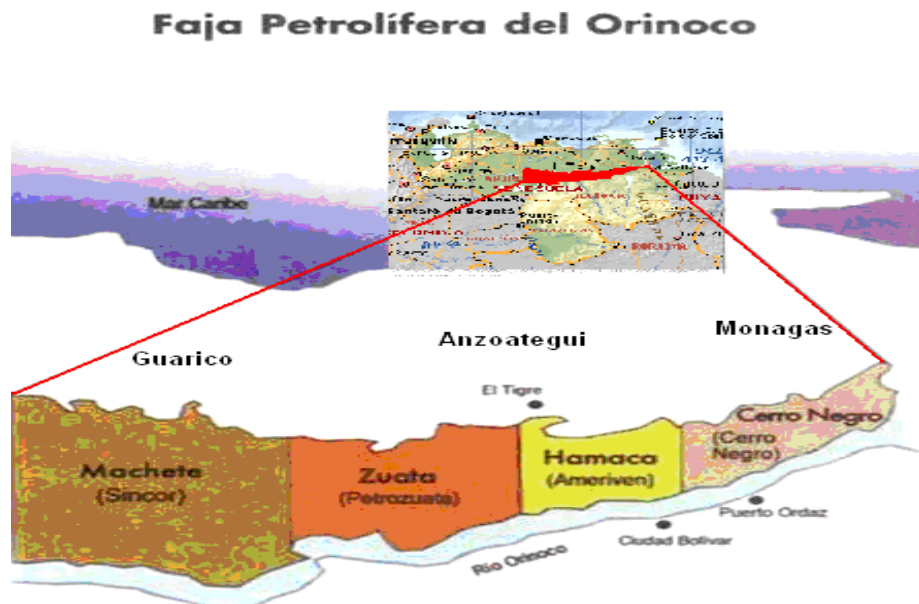


Figura N°1. División territorial de la Faja Petrolífera del Orinoco, entre las Asociaciones Estratégicas.

Petrolera Ameriven empezó formalmente sus actividades como operadora del Proyecto Hamaca en 1997 y desde ese entonces ha trabajado construyendo y desarrollando diversas instalaciones, entre las que destacan los cuatro componentes principales del proyecto que se describen a continuación:

- Instalaciones de Producción Aguas Arriba: Están ubicadas directamente el Campo Hamaca de la Faja Petrolífera del Orinoco al sur del Edo. Anzoátegui, aproximadamente a 200 Km. de la costa oriental del país. Éstas se encargan de extraer el crudo extra pesado, para luego separar el gas y el agua asociados al crudo, y finalmente diluirlo con nafta para reducir su viscosidad.
- Tubería de Petróleo Pesado (crudo diluido): Se encarga de transportar el crudo desde Hamaca hasta las Instalaciones Aguas Abajo, mediante estaciones de bombeo.
- Instalaciones Aguas Abajo (Mejorador de Crudo Hamaca): Están ubicadas en las costas del Edo. Anzoátegui, exactamente en el Complejo Industrial y Criogénico Jose Antonio Anzoátegui, o simplemente Jose, como se le conoce comúnmente (ver figura N° 2). Éste es el lugar donde se llevan a cabo todos los procesos necesarios para aumentar la calidad del crudo y posteriormente venderlo como Petróleo Sintético.
- Tubería de Diluyente: Se encuentra en paralelo con la Tubería de Petróleo Pesado y tiene como función transportar, mediante estaciones de bombeo, la nafta que ha sido reciclada, desde las Instalaciones Aguas Abajo hacia el campo. Este sistema de tuberías, así como el de crudo diluido, se comparte con la *Operadora Cerro Negro*.

La empresa tiene como objetivo principal, extraer y procesar 190.000 Barriles por Día de Operación (BPDO) de Crudo Hamaca, que es de característica extrapesada con un promedio de 8,5°API y alto contenido de azufre y nitrógeno, para producir a

partir de esta carga, 180.000 BPDO de crudo mejorado (26°API), o lo que se conoce como crudo liviano sintético, el cual tiene un mayor valor comercial.

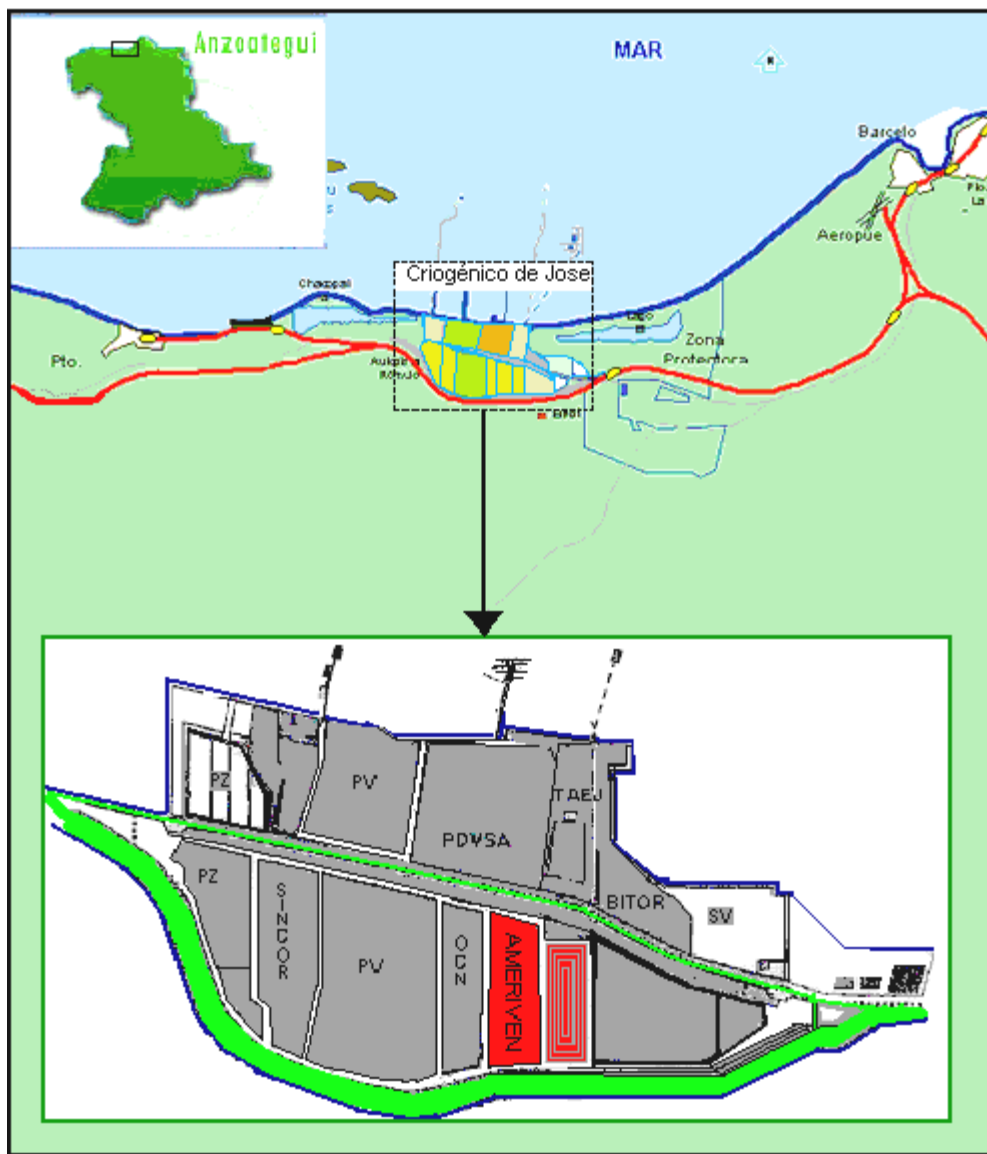


Figura N°2. Ubicación geográfica del Mejorador de Petrolera Ameriven S.A.

El Mejorador de Crudo Hamaca de Petrolera Ameriven es una planta refinadora que maneja una serie de procesos complejos, que debidamente interrelacionados y coordinados, logran el objetivo principal: producir crudo sintético de calidad comercial. Debido a la importancia de estos procesos, se debe garantizar su

correcto funcionamiento, optimizándolos constantemente y así reducir los costos de operación y mantenimiento, obtener mayor rendimiento y calidad, y para brindar seguridad a los equipos, a las personas que trabajan en el complejo y al medio ambiente circundante.

En tal sentido, Petrolera Ameriven se ve en la necesidad de desarrollar herramientas que permitan evaluar o predecir el funcionamiento de los sistemas y equipos asociados, de manera tal que se puedan determinar las causas de un problema determinado y sus posibles soluciones e incluso, en ciertas circunstancias, prevenir el problema.

Actualmente, los servicios industriales del Mejorador no cuentan con este tipo de instrumentos, de manera que no se puede identificar el por qué, en un determinado momento, los servicios son insuficientes, ni cuándo están siendo mal utilizados, o cuánto se debería utilizar para situaciones particulares, ya que el único consumo establecido es el de operación normal planteado en el diseño de la planta. Esta situación constituye una debilidad importante, pues de ellos dependen muchos de los demás procesos desarrollados en la planta, bien sea para procesos térmicos en intercambio de calor o como la energía para activar dispositivos mecánicos.

Por esta razón, se plantea la creación de herramientas que permitan la evaluación del consumo de cada uno de los sistemas más relevantes de estos servicios industriales y/o determinen la cantidad de consumo ideal para una situación en específico.

El primero de estos instrumentos se ocupará del Sistema de Agua de Enfriamiento, específicamente de la red de distribución, es decir, ejecutará una evaluación hidráulica del servicio, desde los límites de batería de la unidad de enfriamiento hasta los límites de batería de cada una de las unidades usuarias (consumidoras). El otro se concentrará en el Sistema de Generación y Distribución de

Vapor y de Gas Combustible, en relación a la alimentación a procesar en cada una de las unidades consumidoras de estos servicios.

La primera herramienta se proyectó por la necesidad de evaluar constantemente el suministro de agua de enfriamiento y así garantizar el correcto funcionamiento de este servicio sin incurrir en pérdidas o derroches de energía. Con ésta se procura determinar fácilmente problemas en la distribución del líquido, bien sea por ensuciamiento de las tuberías y accesorios, o cualquier otro tipo de obstrucciones, así como establecer consumos tipificados para diferentes situaciones de planta, como lo pueden ser paradas temporales de ciertas unidades, cargas de crudo variable, etc. De igual forma, ésta permitiría establecer las limitaciones funcionales del sistema.

La segunda es una herramienta de predicción más que de evaluación, soportada en los balances de masa automatizados y registrados en el historial de la planta. Ésta correlacionará el consumo de vapor y de gas combustible en cada una de las unidades de proceso con respecto a la carga introducida a cada una de ellas, permitiendo determinar la cantidad de vapor y/o gas combustible necesaria para brindar el servicio en diferentes situaciones de planta que no están contempladas en el diseño original, como lo pueden ser las paradas temporales de ciertas unidades, la disminución de carga por unidad (o a todo el Mejorador) por problemas aguas arriba, o simplemente el aumento de carga y producción. Este instrumento evitará la pérdida de tiempo real, de horas hombre y de energía en la planta, lo cual se traduciría en un beneficio económico de gran escala para la empresa.

1.2.- Antecedentes

Las herramientas electrónicas son de vital importancia en una planta como el Mejorador de Crudo de Petrolera Ameriven, ya que las mismas economizan horas-hombre, facilitando las evaluaciones, soportando los datos inherentes a la operación, proyectando variables (flujos, presiones, temperaturas, etc.), facilitando el

seguimiento del proceso, y muchas otras aplicaciones, que se traducen en un ahorro de dinero considerable.

Para realizar herramientas electrónicas, como las que se han de desarrollar en este proyecto, se requiere del total conocimiento de la operación de la planta, es decir, no basta con conocer el caso dado por el diseño; precisamente, estas herramientas se hacen en base a los datos obtenidos día a día, para así reproducir la realidad. En otras palabras, las mismas son el resultado de la operación y por lo tanto, solamente son aplicables al Mejorador de Crudo de Hamaca de Petrolera Ameriven.

Debido a que la planta tiene un tiempo de operación muy corto, existen áreas del complejo que no cuentan con estas herramientas electrónicas, las cuales apenas se están empezando a desarrollar para las diferentes unidades y sistemas. A continuación se presentan en orden cronológico, tres de las herramientas que han sido elaboradas y que guardan relación con las herramientas electrónicas a desarrollar en este proyecto.

En mayo de 2004, la Ing. Ana María Benítez desarrolla la **Herramienta para la Evaluación de Intercambiadores de Calor con Agua de Enfriamiento**, teniendo como objetivo principal la evaluación de los intercambiadores de tubo y carcasa del Mejorador, a partir de la determinación del factor de obstrucción de éstos y del seguimiento a las variables operacionales conectadas a la base de tiempo real. Se enfocó en el factor de ensuciamiento, debido a la fuerte influencia de la deposición de sólidos en la superficie de los intercambiadores, y la forma en que éste afecta las variables operacionales.

Ésta se desarrolló en ambiente EXCEL, mas la misma fue validada por las simulaciones de los intercambiadores más críticos en PROII y en HEXTRAN, las cuales a su vez servirían para futuras evaluaciones. En ese proceso de validación se obtuvieron porcentajes de error menores al 5% (porcentaje fijado como máximo permisible), hecho que da confiabilidad a la herramienta a la hora de realizar las evaluaciones. Los usuarios (Ingenieros, Técnicos, etc.) sólo introducen los datos

requeridos, obteniendo de manera inmediata los resultados referentes a área de transferencia de calor, coeficiente de transferencia, etc.

Para culminar el trabajo, se presentó una metodología de evaluación, así como una hoja de las fallas más frecuentes en los intercambiadores (troubleshooting), con sus respectivas acciones de respuesta [Petrolera Ameriven S.A., 2004a].

Posteriormente, en el mes de septiembre del mismo año, el Ing. Carmelo Trezza desarrolla la **Simulación del Sistema de Alivio de Gases Ácidos de Petrolera Ameriven**, con el objetivo principal de modelar el sistema de alivio de gases ácidos con el programa Visual Flow, con el fin de validar las contrapresiones reportadas en el diseño realizado por el Grupo Alvica.

El Sistema de Alivio de Gases Ácidos recibe las descargas de las válvulas de seguridad que protegen a los equipos de las unidades de Regeneración de Aminas (Unidad 24), Despojadoras de Aguas Agrias (Unidad 26), Recuperación de Azufre (Unidad 28) y Tratamiento de Gas de Cola (Unidad 30), así como las válvulas de control de presión de los tambores de cabecera de las torres de las Unidades 24 y 26.

Para realizar la herramienta se utilizó el software Visual Flow, específicamente con la aplicación Visual Flare, la cual permite la simulación de redes de tuberías y así modelar sistemas hidráulicos, utilizando los métodos de Moody y Lochkart-Martinelli o Beggs-Brill-Moody, para el cálculo de pérdidas de presión por fricción, lo cual permite generar un perfil de presiones a lo largo del sistema de alivio.

La metodología utilizada fue básicamente, la recolección de información, el levantamiento de la red en el programa, la simulación del Caso Diseño (Caso Base), la validación de este caso (comparando con fuentes diversas), el desarrollo de diferentes escenarios de operación y la presentación de la herramienta con sus debidas conclusiones.

La herramienta quedó validada y como conclusión principal de los diversos escenarios simulados se obtuvo que la operación de las válvulas del sistema no debiera verse afectada por la contrapresión. Esta herramienta se hizo para un caso puntual, con el fin de validar los reportes del grupo constructor de la planta, sin embargo, esta simulación queda ya cargada en el programa, permitiendo realizar evaluaciones hidráulicas del sistema en un futuro [Petrolera Ameriven S.A., 2004b].

Finalmente, en diciembre de 2004, los ingenieros Gustavo Gonzáles, Kilkeny Istúriz y Natacha Montaña, desarrollan la **Automatización de los Balances de Vapor, Agua Tratada y Condensado en el Mejorador de Petrolera Ameriven**, con el objetivo de hacer un seguimiento diario del consumo de servicios por las diferentes Unidades de Proceso.

Entre las principales premisas que se contemplaron para el desarrollo de esta herramienta, destacan el uso de los valores teóricos contemplados en el diseño, en aquellos casos en que no se disponía de medidores de flujo para las trazas de vapor y otros consumos menores, el cierre del balance con el Vapor de Baja Presión a condensación, y finalmente la utilización de las curvas de diseño de las válvulas para el cálculo de los flujos a través de las estaciones reductoras y válvulas de control.

La herramienta fue realizada en un archivo EXCEL, mostrando cada uno de los servicios específicamente (Vapor de Alta, de Media y de Baja Presión, Agua Desmineralizada y Condensado), con los flujos de vapor presentados en Klb/h y los de agua en GPM. Además de esto, se muestra en cada valor reportado la desviación entre el valor actual y el valor de diseño, así como la desviación entre el consumo y la producción total, bien sea actual o en promedio diario.

Esta herramienta permite identificar desviaciones en cada una de las unidades, además de servir como base para el estudio de Optimización Energética del Mejorador [Petrolera Ameriven S.A., 2004c].

1.3.- Objetivos.

En función de lo anteriormente expuesto, en el trabajo especial de grado se plantea el desarrollo de herramientas electrónicas para los Servicios Industriales (agua de enfriamiento, vapor y gas combustible) del Complejo Mejorador de Crudo de Petrolera Ameriven.

Para el **sistema de agua de enfriamiento**, el objetivo general consiste en desarrollar una herramienta que permita la fácil determinación de restricciones y/o limitaciones en el suministro de agua de enfriamiento a todos los consumidores del Mejorador, para diferentes escenarios de operación. Para ello, se deberán alcanzar los siguientes objetivos específicos:

1. Comprender el funcionamiento del sistema de distribución de agua de enfriamiento del Complejo Mejorador.
2. Determinar los consumos típicos establecidos en el diseño de cada una de las unidades.
3. Simular el sistema de agua de enfriamiento para un caso base.
4. Validar los resultados de la simulación del caso base.
5. Establecer diferentes escenarios, simularlos y establecer el comportamiento del sistema (sensibilidades).

Para los **sistemas de gas combustible y vapor**, el objetivo general consiste en desarrollar una aplicación que permita la determinación de la cantidad correcta de cada uno de estos servicios a consumir, partiendo de la carga que será introducida a cierta unidad, para así promover mejoras en las operaciones, resolver problemas potenciales y evitar gastos innecesarios de energía para diferentes escenarios de operación en el Mejorador. Para ello, se deberán alcanzar los siguientes objetivos específicos:

1. Comprender el funcionamiento del sistema de generación y distribución de vapor, y el de gas combustible.
2. Desarrollar hojas de cálculo en MICROSOFT EXCEL, que permitan la obtención y manejo de los datos proveídos por el Sistema de Información en Tiempo Real (RTIS- Real Time Information System) a través del ASPEN.
3. Desarrollar correlaciones matemáticas entre la carga y el servicio, para cada uno de los servicios en cada una de las unidades.
4. Desarrollar la hoja de cálculo en MICROSOFT EXCEL, que sirva de interfaz entre el usuario y las correlaciones matemáticas encontradas.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

A continuación se presentan las bases teóricas que fundamentan la realización de este proyecto.

2.1.-Operación del Mejorador

El Mejorador procesa crudo diluido proveniente de los campos de Hamaca, removiendo residuos de carbón (en forma de coque), azufre y nitrógeno como principales contaminantes, para de esta forma producir crudo comercial de 26° API. Este proceso de mejoramiento se puede apreciar en la tabla N° 1, la cual muestra las características con las cuales llega el crudo (Crudo Diluido), así como las del Crudo Sintético, que es el principal producto [Grupo Alvica, 2002a].

Tabla N° 1. Características de la materia prima y del producto final

Característica	Crudo Diluido	Crudo Sintético
Gravedad API, °API	16.0	25.8 ~ 25.9
Azufre Total, pp%	3.16	1.60
Nitrógeno básico, ppm	1,244	————
Nitrógeno total, ppm	4,577	2,700
Níquel, ppm	63	49
Vanadio, ppm	249	171

Para lograr este mejoramiento de crudo y así obtener el producto especificado, la planta tiene una serie de unidades de proceso, que se interrelacionan según el diagrama presentado en la figura N° 3, las cuales se explican brevemente a continuación [Grupo Alvica, 2002a]:

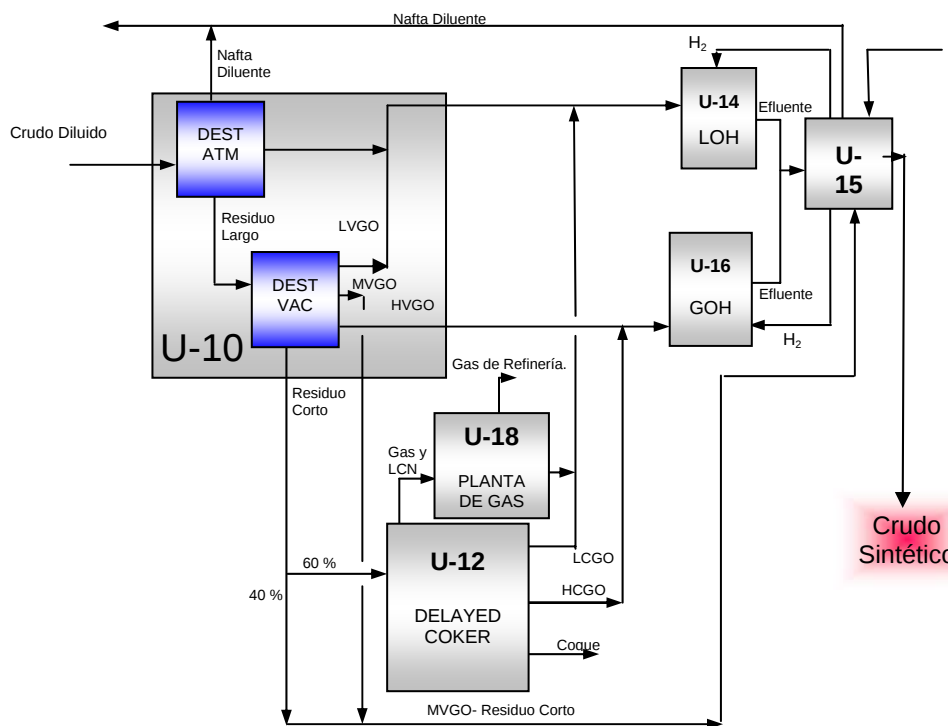


Figura N° 3. Diagrama de Bloques simplificado del Mejorador de Petrolera Ameriven.

- ❖ **Unidad 10 – Crudo:** Esta unidad es la primera en el orden del proceso y por lo tanto es la que recibe al Crudo Diluido de Hamaca, el cual es desalado, calentado y posteriormente fraccionado en la Torre Atmosférica y en la Torre de Vacío. Los productos resultantes de esta unidad son los siguientes:
 - a) Nafta Diluyente, la cual es reciclada al campo de producción en Hamaca.
 - b) Gasóleo Medio de Vacío o Medium Vacuum Gas Oil (MVGO), que se mezcla posteriormente para conseguir el crudo comercial.
 - c) Residuo Caliente de Vacío, el cual es alimentado en la Unidad 12.
 - d) Gasóleo Pesado de Vacío o Heavy Vacuum Gas Oil (HVGO), posteriormente procesado en la Unidad 16.
 - e) Residuo Frío de Vacío, que es llevado con MVGO para mezclarse y obtener el crudo comercial.

- ❖ **Unidad 12 - Coquificación Retardada (Coker):** Esta unidad está diseñada para procesar 62 MBPD de Residuo Caliente de Vacío (+1000° F) y a partir de ésta producir las siguientes corrientes:
 - a) Gasóleo Liviano de Coquer o Light Coker Gas Oil (LCGO), que es alimentado a la Unidad 14.
 - b) Gasóleo Pesado de Coquer o Heavy Coker Gas Oil (HCGO), alimentado a la Unidad 16.
 - c) Nafta y productos livianos finales, los cuales son llevados a la Unidad 18, es decir, a la Planta de Gas.
 - d) Coque, que luego de ser removido de los tambores es llevado a la Unidad 68 (Carga de Coque) para ser enviado, mediante camiones especiales, al terminal de sólidos, propiedad de Petrolera Petrozuata.

- ❖ **Unidades 14, 15 y 16 – Hidroprocesos:** Estas tres unidades conforman el Área 50, conocida como Área de los Hidroprocesos, las cuales tienen como objetivo general mejorar la calidad de los destilados. Cada una de ellas tiene una operación y función específica, la cual se expone a continuación:
 - a) **Unidad 14 - Hidrotratamiento de Aceites Livianos (Light Oil Hydrotreater - LOH):** Está diseñada para procesar 55 MBPD de destilados combinados de la Unidad 10, de LCGO de la Unidad 12, y Nafta de Coquer y Livianos Finales de Coquer de la Unidad 18. El objetivo de la unidad es maximizar la cantidad de compuestos C₅ de 680° F (Nafta pura, kerosén y Diesel) mientras se disminuye la producción de Gas Combustible.
 - b) **Unidad 16 - Hidrocraqueo de Gasóleo (Gas Oil Hydrocracker - GOH):** Ésta ha sido diseñada para procesar el HVGO (Heavy Vacuum Gas Oil – Gasóleo Pesado de Vacío) producto de la Torre de Vacío de la Unidad 10 y HCGO (Heavy Coker Gas Oil – Gasóleo Pesado del Coquificador) procedente de la Unidad 12, persiguiendo el mismo objetivo de la Unidad 14.

c) **Unidad 15 - Soporte de Hidroprocesos:** Esta unidad está diseñada para procesar los productos líquidos y el gas de tope provenientes de los Tambores Flash tanto de la Unidad 14, como de la 16, y con estas corrientes producir Crudo Comercial y Nafta de reposición. La misma, en sus procesos, consume una gran cantidad de hidrógeno, el cual es proveído por la Unidad 22.

❖ **Unidad 18 - Planta de Gas:** Conforman, en conjunto con la Unidad 12, el Área 20. Ésta recibe el gas sobrecalentado y la nafta inestable procedentes de la Unidad 12, para procesarlas y transformarlas en las siguientes corrientes:

- a) Nafta de Coque, es una corriente de cadenas de carbono de C_4^- a 350°F o menos, destinada a la Unidad 14.
- b) Livianos Finales del Coquificador, cuya corriente está compuesta de cadenas de carbono de C_3^- , y es alimentada en la Unidad 14.
- c) Gas de agotamiento de Coquificador, con cadenas de dos o tres carbonos, es una corriente que debe ser tratada para eliminar el contenido de aminas y así enviarla al Sistema de Gas de Refinería.

❖ **Unidades de Soporte, Offsites y Utilities:** Las Unidades de Soporte son aquellas que procesan corrientes para generar la alimentación a cierta unidad de proceso, para eliminar contaminantes o para obtener productos secundarios. Entre éstas se encuentran las unidades 22 (Producción de Hidrógeno), 24 (Regeneración de Aminas), 26 (Despojadora de Agua Agria), 28 (Recuperación de Azufre), 30 (Gas de Cola) y 32 (Empastilladora de Azufre).

Las Unidades Offsites son las que se encargan de hacer de puente o interfase entre los procesos desarrollados en el Mejorador y sus alrededores, bien sea por transferencia de materia prima o productos, o por tratamiento a corrientes que saldrán de la plantas como efluentes. Éstas son las unidades 51 (Aceite de Lavado), 52 (Generación de Energía de Emergencia), 57 (Sistema de Alivio),

61 (Patio de Tanques), 63 (Aceite de Desecho), 65 (Agua Residuales) y 90 (Transferencia de Materia Prima y Productos).

Las Unidades de Utilities son aquellas que se encargan de dar servicio a todo el Mejorador, es decir, son las unidades que proporcionan los Servicios Industriales, las cuales se detallan en la próxima sección

2.2.- Servicios Industriales.

Los Servicios Industriales son un compendio de plantas u operaciones que no procesan directamente a las corrientes que se convierten en producto, mas se encargan de dar las condiciones necesarias para el correcto procesamiento de la materia prima, las condiciones del producto, de las corrientes de efluentes, etc., e incluso pueden promover el funcionamiento de equipos y accesorios, sin los cuales el proceso sería prácticamente imposible [Ludwing, 1997].

Todas las operaciones del Mejorador, así como las de otras plantas e industrias, están soportadas por el funcionamiento de estos servicios, los cuales, por esta razón, son una de las bases fundamentales del proceso.

Los Servicios Industriales en el Mejorador de Petrolera Ameriven están constituidos por las siguientes unidades:

- Generación y Distribución de Vapor (Unidad 41): Se encarga de generar el vapor de alta presión necesario para suplir las deficiencias que puedan existir en la planta, además de regular, mantener y distribuir el vapor en sus tres niveles de presión.
- Ósmosis Inversa (Unidad 42): Ésta se basa en este proceso de separación física para quitar los sólidos disueltos en el agua, bacterias y otras impurezas, que afectan el desempeño de los equipos aguas abajo.
- Agua de Carga a Calderas y Recuperación de Condensados (Unidad 43): Esta unidad se encarga de recobrar parte de los condensados del

Mejorador para reutilizarlos para la generación de vapor en las calderas de la unidad 41. Además, es responsable de la desmineralización del agua de reposición necesaria para cumplir con la demanda de las calderas, evitando así las incrustaciones de hierros y silicatos.

- Sistema de Agua Potable y Agua de Servicio (Unidad 44): Como su nombre lo indica, esta unidad es la responsable de acondicionar y habilitar el agua para el consumo humano y para las demás instalaciones del Mejorador. El agua de servicio se utiliza, además, como agua de reposición en sistemas como el de agua de enfriamiento.
- Producción de Gas Combustible (Unidad 45): Unidad encargada de mezclar el gas de refinería con el gas natural, para así producir un gas combustible capaz de satisfacer las necesidades energéticas del Mejorador.
- Aire de Instrumentación (Unidad 46): Esta unidad genera y regula el aire comprimido necesario para la activación de los dispositivos finales de control utilizados en la planta.
- Agua de Enfriamiento (Unidad 47): Unidad responsable de disminuir la temperatura del agua utilizada por los equipos de transferencia de calor, mediante una torre de enfriamiento, para luego distribuir el agua fría a los diferentes consumidores.
- Sistema de Gas Inerte (Unidad 48): Unidad comisionada para generar el nitrógeno para crear atmósferas inertes en tanques, tuberías, etc.

El presente Trabajo Especial de Grado se enfoca básicamente en el estudio de las unidades 41, 45 y 47, las cuales se desarrollan en las próximas secciones.

2.3.- Sistema de Agua de Enfriamiento.

El agua de enfriamiento es un servicio cuya función principal es disminuir la temperatura de ciertas corrientes de proceso o favorecer la condensación de vapores,

para así darle las condiciones necesarias para su posterior procesamiento. Este enfriamiento o condensación ocurre en los equipos de transferencia de calor encontrados en las diferentes unidades de una planta, los cuales pueden ser, de tipo tubo y carcasa, doble tubo o de placas, implicando un intercambio de calor indirecto, es decir, el agua no está en contacto con las corrientes de proceso.

Además de cumplir con esta función primordial, este servicio se utiliza para el enfriamiento de sistemas de lubricación de ciertos equipos como compresores, turbinas y bombas, así como para sellos de agua.

El sistema de agua de enfriamiento del Mejorador de Petrolera Ameriven es un sistema de recirculación de contacto directo de agua fresca, conocido comúnmente como sistema de recirculación de lazo abierto, diseñado para cumplir con los requerimientos de agua de enfriamiento para todos los usuarios (unidades consumidoras) de la planta. Dicho sistema consta de los siguientes elementos:

- Una Torre de Enfriamiento con seis celdas de contra flujo con un sumidero elevado.
- Tres bombas de agua de enfriamiento accionadas por turbinas y una bomba de repuesto accionada por motor.
- Dos filtros multimedio de corriente lateral.
- Sistemas de Inyección Química (paquetes de inyección de biocida, de inhibidor de corrosión, de cloro, de ácido sulfúrico, de dispersante y de surfactante/dispersante).
- Red de tuberías.

En el proceso de enfriamiento de lazo abierto se pierde agua por cuatro mecanismos: por arrastre, por fugas, por purga y por evaporación. Esta pérdida de agua se ve compensada por agua de reposición, la cual se toma de dos fuentes: el Sistema de Agua de Servicio y el agua de rechazo del Sistema de Ósmosis Inversa. La calidad del agua de enfriamiento es indirectamente controlada por la tasa de purga basada en el

control de la conductividad. Adicionalmente, la misma es también ajustada por la adición de químicos. [Grupo Alvica, 2002b].

2.3.1- Capacidades.

El sistema de agua de enfriamiento está diseñado para distribuir 75000 gpm de agua de enfriamiento a 90° F con un máximo de temperatura de retorno de 120° F. La torre de enfriamiento tiene 6 celdas, cada una diseñada para enfriar 15000 gpm (una celda es de reserva, pero normalmente todas las celdas están en funcionamiento). Se cuenta con tres bombas operando y una bomba de reserva, diseñadas para bombear 25000 gpm cada una.

La capacidad de otros equipos es:

- Dos filtros multimedio de corriente lateral con capacidad de 2250 gpm entre ambos.
- Un paquete de inyección de biocida con una capacidad de 0.0042 gpm. El proveedor del químico proporciona un dispositivo con una capacidad de operación de 100 galones.
- Un paquete de inyección de inhibidor de corrosión con una capacidad de 0.038 gpm. El tanque de almacenamiento tiene una capacidad de operación 1000 galones.
- Un paquete de inyección de cloro con una capacidad de 4500 libras por día.
- Un paquete de inyección de ácido sulfúrico con una capacidad de 0.34 gpm. El tanque de almacenamiento cuenta con una capacidad de operación de 7300 galones.
- Un paquete de inyección de dispersante con una capacidad de 0.055 gpm. El tanque de almacenamiento cuenta con 1300 galones de capacidad de operación.

- Un paquete de inyección de surfactante/dispersante con una capacidad de 0.0042 gpm. El proveedor químico proporciona un dispositivo con una capacidad de operación de 100 galones [Grupo Alvica, 2002b].

2.3.2.- Secciones del Sistema.

A continuación se detallan las secciones que conforman el Sistema de Agua de Enfriamiento, haciendo especial énfasis en la torre de enfriamiento, que es el corazón del servicio en cuestión.

- ❖ **Torre de Enfriamiento:** La teoría del proceso de transferencia de calor y masa en una torre de enfriamiento, es la que desarrolló Merkel. Este análisis se basa en la diferencia de entalpía, entre el equilibrio y la operación, como fuerza impulsora. Se supone que cada partícula de agua está rodeada por una película de aire y que la diferencia de entalpía entre la misma y el aire circundante proporciona la fuerza impulsora para el proceso de enfriamiento.

La eliminación de calor teóricamente posible por libra de aire circulado en una torre de enfriamiento, depende de la temperatura y de la humedad del aire, de manera tal que el agua se aproxima a la temperatura de bulbo húmedo mas no llega a ser equivalente, y esto se debe a que es imposible establecer un contacto de toda el agua con el aire fresco a medida que éste descende por la superficie del relleno hacia la base. El grado de aproximación a la temperatura de bulbo húmedo depende del diseño de la torre, ya que depende de factores como el tiempo de contacto, la magnitud de la superficie de relleno y la separación de agua en gotitas. En la práctica, las torres de enfriamiento rara vez se diseñan para aproximaciones menores a 2,8° C (5° F).

Las torres de enfriamiento pueden ser de tiro natural o de tiro mecánico [Perry, 2001]. Estas últimas son las empleadas en la industria, encontrándose dos tipos de tiro mecánico, las de tiro forzado, en donde los ventiladores se

colocan en la base de la torre (por donde entra el aire), y de tiro inducido, en donde los ventiladores se encuentran en el tope de la torre, tal y como se encuentran los seis ventiladores de la torre de enfriamiento del Mejorador.

- ❖ **Bombas de agua de enfriamiento:** Las bombas son parte esencial en el servicio de agua de enfriamiento, ya que éstas dan el potencial hidráulico para poder suministrar el agua hacia todas las unidades usuarias.

La capacidad estimada de cada una de las bombas del agua de enfriamiento para el Mejorador es de 27500 gpm, sin embargo se debe prestar atención a ciertas restricciones en cuanto a este tópico. El factor límite en la operación de la bomba es el NPSH disponible, tal y como se muestra en la tabla N° 2, ya que éste no puede ser menor al NPSH requerido. Si el NPSH disponible es menor al requerido, la presión de succión a la entrada de la bomba será menor que la presión necesaria para que se presente una vaporización a la temperatura de operación del líquido, ocasionando así la formación de burbujas y, por ende, la cavitación dentro de la bomba, lo cual es un caso indeseado pues genera ruido excesivo, vibración de los equipos de desgaste tanto de los álabes como de los demás partes de la bomba [Mott, 1996].

Tabla N° 2. NPSH de las bombas para diferentes flujos.

Flujo de Operación de la Bomba (gpm)	NPSH Requerido (pie.)	NPSH Disponible (pie.)		
		Nivel de Líquido Normal	Nivel de Líquido Bajo	Nivel de Líquido Bajo Bajo
25000	17	25.1	22.8	19.1
27500	19	24.6	22.3	19.0
30000	21	25.1	21.8	18.1
32500	24	24.6	21.3	17.6

Fuente: Manual de Operaciones del Mejorador de Crudo Hamaca, Unidad 47.

Las bombas de agua de enfriamiento deben operar cerca al punto estimado para mantener el NPSH disponible mayor que el NPSH requerido. De esta manera, con las bombas operando, el caudal total de agua de enfriamiento que se debe bombear se tiene que mantener entre 75000 gpm, que sería el caso diseño, y 82500 gpm, que es la condición límite para el caso más conservador [Grupo Alvica, 2002b].

- ❖ **Filtros Multimedia de Corriente Lateral:** Con el objeto de remover sólidos suspendidos en la recirculación del agua de enfriamiento, se disponen de dos filtros de corriente lateral del 50%. Este sistema procesa 2250 gpm de agua de enfriamiento (~3% del total de la tasa de recirculación). Los filtros multimedia de corriente lateral son filtros que contienen lechos de arena, grava y/o carbón antracita, los cuales retienen los sólidos (partículas) suspendidas en las diferentes capas de medio filtrante, mientras que el agua atraviesa los mismos, quedando filtrada. Estos filtros se someten a retrolavado para remover los sólidos suspendidos acumulados. El sistema iniciará el retrolavado cuando la alarma de presión se active o la limpieza periódica se inicie basada en una duración predefinida [Grupo Alvica, 2002b].
- ❖ **Sistema de Inyección de Químicos:** Tal y como se mencionó anteriormente, este sistema es una de las formas de controlar la calidad del agua de enfriamiento, evitando el ensuciamiento o contaminación y regulando el pH resultante. Está compuesto por varios paquetes de inyección, los cuales son activados o desactivados mediante un control a distancia sobre las bombas dosificadoras

Cada paquete de inyección química tiene dos bombas de inyección al 100%, que succionan de los tanques de almacenamiento los químicos y envían estos fluidos a la mezcla con agua en la torre, para de esta forma lograr las diversas especificaciones. La finalidad de cada uno de los productos químicos se muestra a continuación.

- El **biocida** se provee para el control de bacterias, hongos y algas en el agua de enfriamiento.
 - El **inhibidor de corrosión** reduce las propiedades de corrosión del agua de enfriamiento.
 - La **solución acuosa de cloro** controla el crecimiento biológico en el agua de enfriamiento. El cloro se provee en contenedores de una tonelada, destinados a producir una solución acuosa, y se inyecta en el fondo de la torre de enfriamiento.
 - El **dispersante** se utiliza para mantener los sólidos suspendidos en el agua de enfriamiento.
 - El **surfactante/dispersante** es un biodispersante no iónico para remoción y dispersión de depósitos de fango. Como un surfactante, éste mejora la penetración de biocida y cloro en el fango. Como un dispersante, éste desaloja los microorganismos dentro del volumen del agua donde ellos son más fácilmente controlados por el biocida y el cloro [Grupo Alvica, 2002b].
- ❖ **Red de tuberías:** Si el conjunto formado por la Torre de Enfriamiento y las bombas, son el corazón del sistema, definitivamente esta red cumple la función de las venas y las arterias, ya que son el vehículo o canal de transporte del agua de enfriamiento.

Esta red empieza en la descarga de las bombas, para luego confluir en el Cabezal de Suministro de Agua de Enfriamiento (CWS – Cooling Water Supply), que es la tubería de mayor diámetro, para así, mediante diversas ramificaciones, entregar el flujo requerido por cada unidad consumidora. Una vez que el agua de enfriamiento ha sido utilizada, la misma es retornada a la torre de enfriamiento, de forma similar que como se distribuye, es decir, de cada unidad salen líneas (tuberías) que son reunidas en el Cabezal de Retorno de Agua de Enfriamiento (CWR - Cooling Water Return), el cual va en paralelo al de Suministro.

Una representación simplificada del Sistema o Red de tuberías, se puede apreciar en la figura N° 4, en donde sobre un plano de planta se representan los cabezales de Agua de Enfriamiento. En color rojo se observa una línea correspondiente a la sub-red de suministro (CWS), así como sus respectivas ramificaciones. Análogamente, se representa en color verde la sub-red de retorno (CWR). Ambos cabezales de agua recorren la planta de forma aérea, y como se ve en la figura, van en paralelo a la calle 3 [Grupo Alvica, 2002 b].

La red de tuberías está compuesta por segmentos de tubería rectos, de acero comercial, unidos mediante soldaduras y/o bridas y complementados a lo largo de su recorrido por diferentes accesorios, como lo son los codos, los niples (descargas), los instrumentos de medición, las reducciones o ampliaciones, las válvulas, etc. Estos accesorios, debido a sus rugosidades y formas características, afectan la hidráulica del flujo de Agua de Enfriamiento, alterando la distribución del servicio de forma significativa.

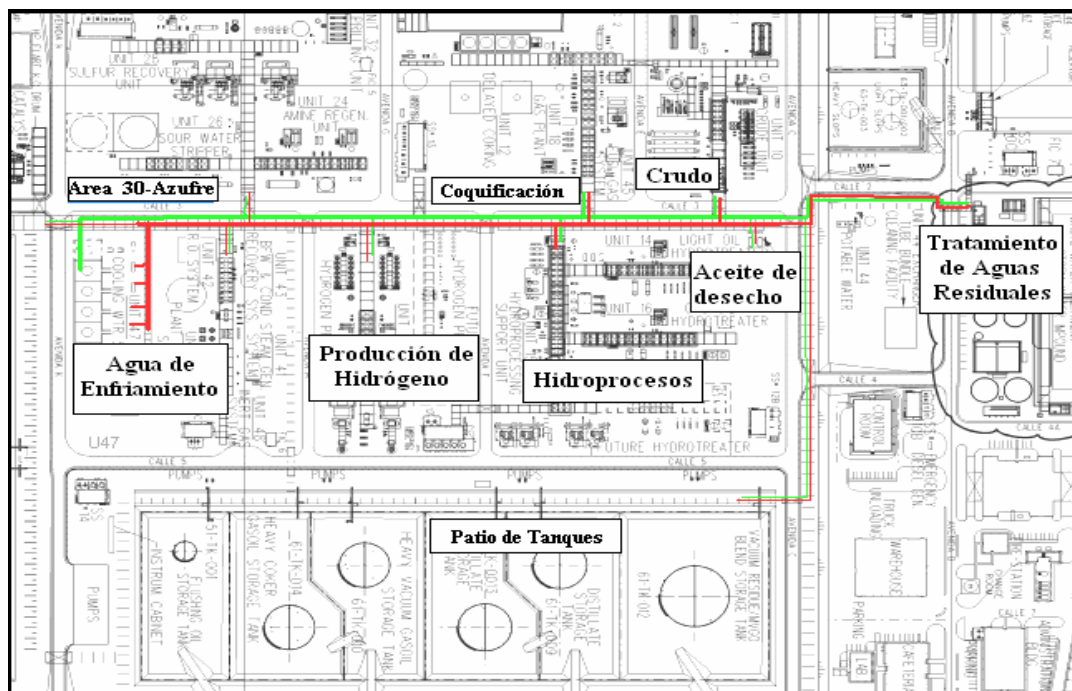


Figura N° 4. Red de Tuberías del Sistema de Agua de Enfriamiento.

Fuente: Manual del Mejorador de Crudo Hamaca, Unidad 00.

No todas las unidades del Mejorador consumen agua de enfriamiento en sus procesos, ni todas aquellas que la consumen lo hacen en las mismas cantidades. Por esta razón, cada una de las Unidades usuarias deben establecer cuanta agua de enfriamiento es necesaria para poder llevar a cabo los procesos requeridos.

Para las Plantas Refinadoras, las Unidades que suelen consumir mayor cantidad de agua de enfriamiento son las unidades de destilación, la de coquificación térmica y las de hidrocrackeo y asociadas. Esto se debe principalmente a las muy elevadas temperaturas que se deben alcanzar en sus equipos y a la gran cantidad de masa que manejan, especialmente los destiladores atmosféricos y de vacío.

2.4.- Sistema de Generación y Distribución de Vapor.

El vapor, utilizado en los servicios industriales del Mejorador así como en muchas otras plantas, es agua en estado gaseoso proporcionado con una temperatura determinada y una presión asociada. Éste es de vital importancia, ya que del mismo depende la operación de la planta.

Este servicio es el que proporciona la energía calórica y la presión necesaria para utilizar en procesos de calentamiento en intercambiadores especiales, para promover el movimiento de mecanismos o incluso para la limpieza de equipos.

El vapor suele calificarse según la presión en que se encuentre en los siguientes niveles:

- Vapor de Alta Presión, también conocido como HPS por sus siglas en inglés (High Pressure Steam). En esta clasificación entran los vapores con presiones mayores a 250 psig.
- Vapor de Media Presión o MPS (Medium Pressure Steam), que son vapores con más de 75 psig de presión y menos de 250 psig.
- Vapor de Baja Presión o LPS (Low Pressure Steam), que son los vapores con presiones inferiores a 75 psig.

En las plantas existe una unidad que es la encargada de producir vapor de alta presión para ser distribuido hacia las consumidoras del servicio. El vapor de alta presión (VAP) se distribuye en su estado de sobrecalentamiento para minimizar el contenido de humedad en las primeras etapas de las turbinas, con el fin de evitar la erosión de los álabes [Austin, 1998].

Luego que se cumple con la cuota de servicio necesaria para el funcionamiento de toda planta, el sobrante de vapor se degrada, es decir, se reduce en su nivel de presión para pasar a formar parte del servicio de vapor de media presión (VMP), en conjunto con la cantidad de VMP que se pueda generar en otras secciones de la planta, ya que el VMP se puede producir en intercambiadores de calor con cambio de fase o en los mismos equipos que utilizan VAP para su funcionamiento, los cuales al consumir parte de la energía aportada, reducen su presión y su temperatura, en lo que se denomina extracción [Petrolera Ameriven S.A., 2004d].

La extracción puede ser total, en los casos en que todo el vapor de un nivel superior se convierte en vapor de un nivel inferior, o parcial, cuando, como su nombre lo explica, sólo un cierto porcentaje de la masa se transforma. Este proceso dependerá del diseño de la turbina.

A continuación se detallan las unidades generadoras de vapor del Mejorador de Petrolera Ameriven, en sus diferentes niveles de presión.

- ❖ **Unidad 41 - Generación y Distribución de Vapor:** Esta unidad tiene como propósito principal, servir de apoyo en la generación de VAP durante la operación normal de la planta, sustentando las fluctuaciones que se suscitan en los requerimientos de vapor. Consta de dos calderas de vapor de alta presión y de equipo asociado para mantener los tres cabezales de diferentes niveles de presión antes explicados (VAP, VMP y VBP).

Las calderas operan mediante la quema de Gas Combustible y están diseñadas para producir 200 Klb/h de VAP a partir de Agua de Alimentación a Calderas

(BFW por las siglas en inglés, de Boiler Feed Water). Por otra parte, las estaciones de degradación de vapor de alta y de media, están diseñados para manejar 165 Klb/h y 250 Klb/h, respectivamente [Grupo Alvica, 2002c].

- ❖ **Producción de VAP en la Unidad 22:** Debido a los requerimientos de las unidades de hidrop procesos del Mejorador de Petrolera Ameriven, de contar con hidrógeno de alta pureza (99.9%), se diseñó la unidad de Producción de Hidrógeno. Ésta produce todo el hidrógeno necesario a través de dos reformadores de gas metano.

En el proceso de producción de hidrógeno se genera de forma indirecta la mayor cantidad de VAP, con una cantidad de 490 Klb/h (por diseño en operación normal), que representaría aproximadamente un 95% del total del VAP requerido. Es por esta razón que, a pesar de no ser una Unidad de Servicio Industrial, se toma en cuenta como una unidad más de servicio (sólo por y para el caso de vapor).

El VAP es generado en dos etapas: primero se produce vapor saturado mediante la recuperación de calor en las calderas de los reformadores, las cuales están conectadas al tambor de vapor. Posteriormente el vapor saturado es sobrecalentado, para lograr el nivel de presión necesario y así distribuirlo a todo el Mejorador [Grupo Alvica, 2002d].

- ❖ **Producción de VMP en la Unidad 12:** El VMP es producido en la Unidad 12, en los intercambiadores de calor que se encuentran en el área para enfriar tanto el reciclo como el producto de Heavy Coker Gas Oil. Éste se genera en una cantidad aproximada de 111 Klb/h es enviado al cabezal de VMP para ser distribuido a los usuarios [Grupo Alvica, 2002c].
- ❖ **Producción de VMP en la Unidad 28:** Esta unidad genera Vapor de Media Presión principalmente en las Calderas de Vapor Residual (28-E-101, 28-E-

201 y 28-E-301), distribuidas una por cada tren de procesamiento de azufre, a una tasa de 53.5 Klb/h por cada una. Luego de que parte de este vapor es consumido por ciertos equipos dentro del límite de batería de esta unidad, se envían 155 Klb/h al cabezal de VMP [Grupo Alvica, 2002c].

- ❖ **Producción de VMP en la Unidad 15:** El VMP generado en esta unidad es aportado únicamente por el Tambor Flash de Condensado de VAP, en una cantidad prácticamente despreciable (4.1 Klb/h), que de hecho es menor al consumo de VMP de toda el Área [Grupo Alvica, 2002c].

- ❖ **Otros Generadores de Vapor:** Existen otras diversas formas de generación de VMP y de VBP, que se resumen en la degradación de vapor de alta y media presión en equipos (no estaciones de degradación) ubicados en las diferentes unidades consumidoras. Ejemplo de esta situación se encuentra en las turbinas que accionan a las bombas de la Unidad 47, las cuales utilizan el VAP para transformar su energía en movimiento, degradando en el proceso este vapor a VBP.

2.5.- Sistema de Gas Combustible.

En Petrolera Ameriven se utilizan únicamente combustibles gaseosos, debido a los tipos de procesos de quema en los que son utilizados y a la disponibilidad del mismo. Estos pueden ser quemados al ponerlos en contacto con una llama o alguna otra fuente de ignición, como lo puede ser una chispa.

De todos los combustibles químicos, el gas natural está considerado como el menos problemático de generar calor. Se transporta por tubería directo al consumidor, está sustancialmente libre de cenizas y se mezcla íntimamente con el aire para dar una combustión completa, con poco aire en exceso y sin humo [Austin, 1998].

Existen otros combustibles gaseosos ampliamente usados, entre los cuales destacan, el gas licuado de petróleo (GLP o LPG por sus siglas en inglés), el hidrógeno y el gas de refinería, entre otros. Para el caso específico de Petrolera Ameriven se utiliza principalmente gas natural, sin embargo, para suplir las necesidades energéticas, se aprovecha el gas de refinería que se genera en la planta como consecuencia de sus procesos.

El Sistema de Gas Combustible (Unidad 45) es el encargado de recolectar diferentes gases para producir y distribuir un combustible gaseoso con especificaciones que cumplan con los requerimientos energéticos de las unidades usuarias del Mejorador. Además de esta función, el sistema procesa directamente el gas natural de alta presión entregado por el proveedor, para bajar su presión [Grupo Alvica, 2002e].

2.6.- Fundamentos de Evaluación Hidráulica

Cuando se habla de hidráulica, se habla del flujo de un fluido, siendo uno de los términos más importantes la rapidez de éste, y más específicamente de la rapidez de flujo de volumen, término que comúnmente se conoce como caudal.

El caudal suele calcularse mediante la ecuación N° 1, presentada seguidamente [Mott, 1996]:

$$Q = A * v \quad (1)$$

Donde,

Q : caudal o rapidez de flujo de volumen

A : área de la sección transversal por donde fluye el fluido

v : velocidad promedio del flujo

El caudal es entonces la cantidad de volumen que pasa por una sección de una tubería por unidad de tiempo, y además es constante en un sistema, siempre que no exista almacenamiento, retiro o aditamento de fluido, y siempre que el fluido que está

fluyendo sea incompresible. Esto es lo que se conoce como principio de continuidad para fluidos incompresibles (generalmente líquidos), lo cual es consecuencia de la continuidad de la masa en un sistema cerrado.

Ya habiendo evaluado lo que es el flujo volumétrico, se debe hablar de lo que es la conservación de la energía en un sistema de líneas de conducto (por donde fluye el fluido), es decir, que para hacer evaluaciones hidráulicas, se debe tomar en cuenta las tres formas de energía que existen para los sistemas hidráulicos, ya que en este análisis radica la resolución de los mismos.

Las tres energías existentes para estos análisis de líneas de conductos son la potencial, la cinética y la de flujo. La energía potencial es la que depende de la elevación de un elemento con respecto a un nivel de referencia, calculada mediante [Mott, 1996]:

$$E_p = w * z \quad (2)$$

Donde,

E_p : energía potencial

w : peso del elemento

z : Distancia vertical (elevación) desde un nivel de referencia

La segunda de las energías es la cinética, que se debe a la velocidad del elemento y cuya ecuación es:

$$E_c = \alpha \frac{w * v^2}{2 * g} \quad (3)$$

Donde,

E_c : energía cinética

g : aceleración de la gravedad

α : factor de corrección cinético

Este factor de corrección (α) toma en cuenta la variación radial de la velocidad del fluido, variación existente debido a la interacción del fluido con las paredes de la tubería, lo cual provoca un perfil de velocidades que va desde cero, en las paredes, hasta la velocidad máxima en el centro de la tubería. Para los casos ideales, en donde la viscosidad del fluido es despreciable o donde el régimen sea totalmente turbulento, el valor de éste es 1.

La última de las energías a considerar en este análisis, es la energía de flujo o trabajo de flujo, la cual es la cantidad de trabajo necesario para mover el elemento de fluido a través de una sección en contra de la presión (p) inherente a dicha sección. Ésta se calcula mediante la siguiente ecuación [Mott, 1996]:

$$E_F = \frac{w^* p}{\rho^* g} \quad (4)$$

Donde,

E_F : Energía de flujo

p : presión

ρ : densidad de fluido

De esta manera, se puede decir que para los sistemas ideales, en donde no se toma en cuenta el factor de corrección, tal como el que se tiene, la energía total en una sección será la sumatoria de todas las tres energías en ese lugar [Mott, 1996], quedando de esta forma la ecuación N° 5.

$$E = \frac{w^* p}{\rho^* g} + w^* z + \frac{w^* v^2}{2^* g} \quad (5)$$

Donde,

E : energía total en el punto evaluado

Ahora, si no se agrega, o se pierde, energía al fluido entre dos secciones genéricas diferentes (1 y 2), por el principio de la conservación de la energía se tendrá que la energía en la sección 1 será igual a la de la sección 2, tal y como se ve en la siguiente ecuación:

$$E_1 = E_2 \quad (6)$$

Donde,

E_1 : energía total en la sección 1

E_2 : energía total en la sección 2

De manera que unificando las ecuaciones N° 5 y N° 6, se tiene que:

$$\frac{w^* p_1}{\rho^* g} + w^* z_1 + \frac{w^* v_1^2}{2^* g} = \frac{w^* p_2}{\rho^* g} + w^* z_2 + \frac{w^* v_2^2}{2^* g} \quad (7)$$

Pero además de esto, debido a que el peso (w) es una variable común en todos los términos, el mismo se puede eliminar, simplificando la ecuación N° 7 hasta llegar a la forma final que prosigue [Mott, 1996]:

$$\frac{p_1}{\rho^* g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2^* g} = \frac{p_2}{\rho^* g} + z_2 + \frac{v_2^2}{2^* g} \quad (8)$$

Esta ecuación se conoce como “ecuación de Bernoulli” (sólo para sistemas ideales) y debido a que sus términos tienen dimensión de longitud, cada uno de estos se conoce como cabezal, teniendo entonces un cabezal de presión, uno de elevación y otro de velocidad. Ésta no contempla dispositivos mecánicos, entre las secciones evaluadas, que puedan provocar pérdidas por fricción, así como tampoco se contemplan las pérdidas producidas por la fricción del fluido, ya que la ecuación establece que la energía total del fluido es constante [Mott, 1996].

Debido a las restricciones antes citadas, es que se añaden nuevos términos que incluyen adición o sustracción de energía, para así llegar a la “ecuación general de la energía”, mostrada a continuación:

$$\frac{p_1}{\rho * g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2 * g} + h_A - h_R - h_L = \frac{p_2}{\rho * g} + z_2 + \frac{v_2^2}{2 * g} \quad (9)$$

Donde,

h_A : energía por unidad de peso añadida mediante un dispositivo mecánico, por lo general una bomba.

h_R : energía por unidad de peso retirada mediante dispositivos mecánicos (ej. Turbinas).

h_L : pérdidas de energía, por unidad de peso, por parte del sistema, debidas a fricción en los conductos, o a la presencia de válvulas, conectores, etc.

Este último término, el de las pérdidas por fricción, es el más importante para el tipo de herramienta que se ha de realizar, ya que el sistema no incluye, entre las secciones de entrada y salida (1 y 2) dispositivos mecánicos que añadan o tomen energía. El mismo se calcula a través de la ecuación N° 10, conocida como ecuación de Darcy, para el caso de flujos turbulentos [Mott, 1996].

$$h_L = f_D * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2 * g} \quad (10)$$

Donde,

L : longitud de la corriente de flujo

D : diámetro del conducto

f_D : factor de fricción de Darcy

El factor de fricción de Darcy solía hallarse mediante un método gráfico basado en el diagrama de Moody, el cual muestra al factor con respecto al número de Reynolds, con una serie de curvas paramétricas relacionadas con la rugosidad relativa. Debido a que este método tiene limitaciones a la hora de automatizar los cálculos, hoy en día se suelen utilizar ecuaciones que permitan el cálculo de dicho factor.

Existen diversas ecuaciones para realizar el cálculo del factor de fricción, sin embargo, una de las más utilizadas es la ecuación de Colebrook mostrada a continuación [Mott, 1996]:

$$\frac{1}{\sqrt{f_D}} = -2 * \text{Log}_{10} * \left(\frac{1}{3.7 * \left(\frac{D}{E} \right)} + \frac{2.51}{R * \sqrt{f_D}} \right) \quad (11)$$

Donde,

E : Rugosidad de la tubería

D : Diámetro interno de la tubería

R : Número de Reynolds (adimensional)

Además de esta pérdida de energía por fricción en las tuberías de conducto del flujo, existen las pérdidas por fricción ocasionadas por el cambio en la sección cruzada de la trayectoria de flujo, cambios en la dirección del mismo, o cuando la trayectoria de éste se ve obstruida, lo cual ocurre al utilizar accesorios como codos, reducciones, válvulas, etc.

Para calcular estas pérdidas se utiliza una ecuación general (ecuación N° 12) que toma ésta como una variable proporcional al cabezal de velocidad del fluido al fluir éste a través de dilataciones súbitas o graduales, por salida o por entrada, por contracciones, uniones o válvulas [Mott, 1996].

$$h_L = K * \left(\frac{v^2}{2 * g} \right) \quad (12)$$

Donde,

K : coeficiente de resistencia

Este coeficiente de resistencia varía según el accesorio o perturbación que encuentre el flujo, tomando en cuenta factores como diámetros de entrada y salida, la longitud equivalente y la proporción de longitud equivalente [Mott, 1996].

Una de las formas más importantes de calcular el coeficiente de resistencia, debido a su aplicación en cálculos automatizados en computadoras y calculadoras programables, es la siguiente [Mott, 1996]:

$$K = \left(\frac{L_e}{D} \right) * f_t \quad (13)$$

Donde,

L_e/D : proporción de longitud equivalente

f_t : factor de fricción (tomado de la zona de turbulencia completa)

La proporción de longitud equivalente es un factor que se considera constante para un tipo determinado de accesorio y es el resultado de la división de la longitud equivalente (L_e), entre el diámetro interno real del accesorio. Algunos valores de este término se presentan en la tabla N° 3.

Tabla N° 3. Proporción de longitud equivalente de diversos accesorios

Tipo	L_e/D
Válvula de globo – Completamente abierta	340
Válvula de ángulo – Completamente abierta	150
Válvula de compuerta – Completamente abierta	8
- ½ abierta	160
- ¼ abierta	900
Válvula de verificación – Tipo giratorio	100
Válvula de verificación – Tipo de bola	150
Válvula de mariposa – Completamente abierta	45
Codo estándar de 90°	30
Codo de radio largo de 90°	20
Codo de calle de 90°	50
Codo estándar de 45°	16
Codo de calle de 45°	26
Codo de devolución cerrada	50
Te estándar con flujo a través de un tramo	20
Te estándar con flujo a través de un tramo	60

Fuente: Mott, 1996.

2.7.- Métodos para ajustar datos

A menudo se requieren estimaciones de valores intermedios entre valores discretos de una serie de datos en un intervalo continuo, e incluso valores que superen los límites del rango de datos. Para ello se hace necesario hallar una función que ajuste los valores de los datos a lo largo del rango de interés, y esto es lo que se conoce como ajuste de datos a curvas.

Los ajustes suelen hacerse en dos formas, la primera es aquella que toma datos muy precisos, cuyo procedimiento básico consiste en ajustar a una curva, o serie de éstas, que pasen directamente por cada uno de los puntos. La otra forma es aquella en donde los datos exhiben un grado significativo de error o “ruido”, caso en que la estrategia seguida es producir una sola curva que represente la tendencia general de los datos.

En esta última metodología destaca el hecho de que no se necesita interceptar cada punto de la serie de datos, debido a que cualquiera de estos datos individuales puede ser incorrecto. En lugar de esto, se designa la curva para seguir un patrón de los puntos tomados como un grupo, tal y como se hace en el método llamado regresión por mínimos cuadrados, el cual es uno de los procedimientos más utilizados, además de ser el que utilizan programas especializados como MICROSOFT EXCEL.

Al hacer un ajuste a un conjunto de datos puede haber diversas opciones, rectas, polinomios, funciones logarítmicas, exponenciales, etc., razón por la cual se debe apartar la subjetividad y así concebir algunos criterios con el fin de establecer una base para el ajuste, que es precisamente lo que hace este procedimiento de regresión por mínimos cuadrados, para luego poder determinar el mejor de los ajustes.

Este método radica en la diferencia entre cada uno de los puntos reales de la variable dependiente y el valor de esta variable calculada por la función de la curva de ajuste, y su procedimiento de cálculo parte desde la sumatoria de los cuadrados de esta diferencia, tal y como se muestra en la siguiente ecuación:

$$S_r = \sum_{i=1}^n (y_i - y_{iC})^2 \quad (14)$$

Donde,

S_r : suma de los cuadrados de los residuos alrededor de la línea de regresión

n : número de datos

i : posición del dato (desde 1 hasta n)

y_i : valor real de la variable dependiente dado en la serie de datos

y_{iC} : valor calculado, según la línea de regresión, para el mismo valor de la variable independiente (x_i)

Debido a que se evalúan diversas regresiones, también hace falta caracterizar los datos originales con respecto al valor del promedio aritmético de éstos, lo cual se hace calculando la suma total de los cuadrados de la diferencia entre los valores reales y el valor de la media, tal y como se puede apreciar en la ecuación N° 15.

$$S_t = \sum_{i=1}^n (y_i - y_m)^2 \quad (15)$$

Donde,

S_t : suma de los cuadrados alrededor de la media

y_m : media aritmética de los valores de la variable dependiente de los datos

Finalmente, para determinar cuál de las regresiones posee el mejor ajuste, se debe mejorar el error y normalizarlo a S_r , quedando un coeficiente que será el utilizado para comparar, dado por la ecuación que sigue:

$$R^2 = \frac{S_t - S_r}{S_t} \quad (16)$$

Donde,

R^2 : coeficiente de determinación

El valor de R^2 está limitado entre 0 y 1, ya que para un ajuste perfecto, es decir, donde todos los puntos de la serie de datos sean interceptados por la regresión, S_r es nulo, entonces $R^2 = 1$, lo que significa que la línea explica el 100% de la variabilidad de los datos. Para el caso en que el ajuste no representa mejora alguna el $S_r = S_t$, y por lo tanto $R^2 = 0$ [Chapra, 1999].

2.8 Programas Informáticos

Los softwares son la base fundamental para la realización de las herramientas electrónicas, ya que bajo su ambiente y reglas se desarrollan las aplicaciones sobre las cuales trabajarán, tanto el constructor de la herramienta, como el usuario. Entre los softwares a utilizar para la realización de las herramientas electrónicas, destacan el INPLANT y el ASPEN PROCESS EXPLORER, los cuales son explicados a continuación.

2.8.1.- INPLANT

El INPLANT es un programa de SIMSCI-ESSCOR, que junto con los programas PRO/II, HEXTRAN, DATACON y VISUAL FLOW, forman el Process Engineering Suite (PES).

INPLANT es un poderoso simulador especializado en el campo del diseño y evaluación de tuberías que manejan flujos (multifásicos o no) en estado estacionario. Este programa es ideal para hacer evaluaciones hidráulicas ya que cuenta con una extensa base de datos de fluidos con sus respectivas propiedades, materiales de tuberías, así como de diversos modelos matemáticos para realizar los cálculos de

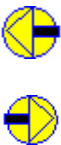
propiedades, de pérdida de presión y transferencia de calor. Además, permite al usuario introducir modelos para las propiedades diferentes a los preestablecidos, o simplemente fijar valores constantes para éstas [Invensys System, 2003].

Para los cálculos de pérdida de presión por fricción en los tramos de tuberías, este programa utiliza el modelo matemático propuesto por Moody, el cual se basa en el cálculo del factor de fricción por la ecuación N° 11. Además de utilizar la ecuación de Moody, el programa calcula la pérdida de presión en los diversos accesorios usando la proporción de longitudes equivalentes, las cuales están especificadas para cada uno de los diferentes accesorios en la biblioteca interna del software.

Este programa tiene la ventaja de ofrecer al usuario la creación de un sistema hidráulico de forma gráfica simplificada, en forma de diagrama de flujo, permitiendo así una mejor visualización de los fenómenos y facilidades de adaptación o modificación del sistema. Estos diagramas de flujo deben ser completados con las especificaciones de los accesorios en cada una de las líneas encontradas, con las dimensiones y cotas de las tuberías, así como con la especificación de otros dispositivos presentados en el diagrama.

Para realizar los mencionados diagramas de flujo, INPLANT cuenta con ciertas figuras básicas, que representan un equipo, o compendio de éstos, con funciones específicas. Estas figuras son básicamente cuatro; los “Sources” representan las salidas o lugares desde donde se suministra un fluido; los “Sinks”, que constituyen lo que serían las llegadas; los “Links”, que simbolizan las líneas que conectan los dispositivos o unidades de salida y llegada; y finalmente los “Junctions” que representan bien sea los puntos en donde confluyen dos o más corrientes, o los puntos en donde se divide una corriente en dos o mas ramificaciones. Para explicar mejor estas figuras, se expone la tabla N° 4. Cabe destacar que tanto los “Sources” como los “Sinks” pueden estar de derecha a izquierda o viceversa.

Tabla N° 4. Lenguaje INPLANT vs Proceso. (General)

Icono	Tipo (INPLANT)	Descripción (Proceso)
	Sources	Fuente o Salida del Flujo
	Sinks	Llegada
	Link	Línea por donde va el fluido
	Junction	Nodo

El ambiente de trabajo (pantalla principal de trabajo) del INPLANT se puede apreciar en la figura N° 5, donde se puede apreciar en primer plano un diagrama de flujo con sus componentes, en la parte superior tiene un menú principal en donde se controlan todas las funciones y opciones, bajo este menú se presenta la barra de herramientas con las principales aplicaciones, lo cual facilita el manejo del programa al usuario, y finalmente se puede observar las flechas de desplazamiento y las casillas de cierre, minimización y restauración (en la esquina superior derecha), típicas de los programas que trabajan en ambiente Windows.

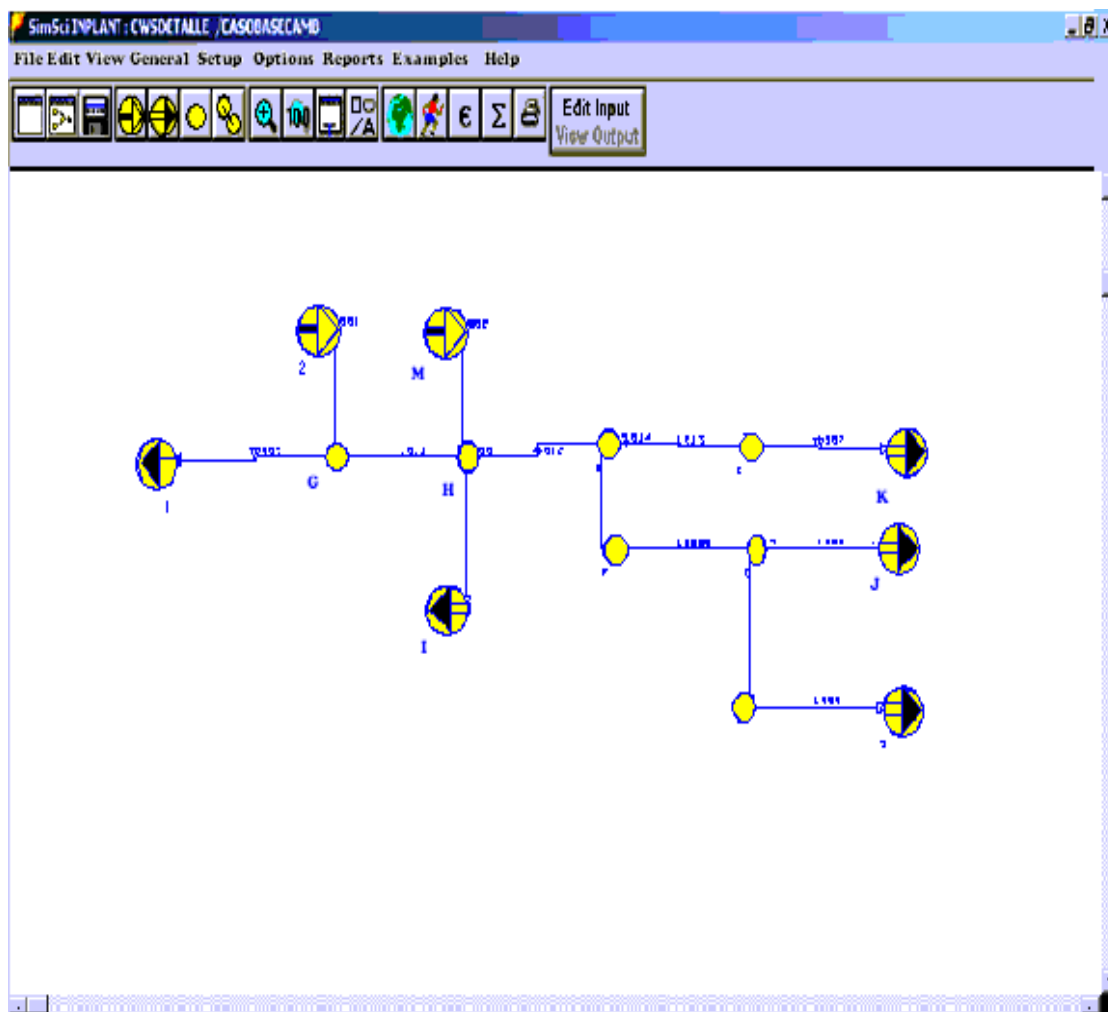


Figura N° 5. Pantalla de trabajo del INPLANT.

2.8.2. ASPEN PROCESS EXPLORER

El ASPEN PROCESS EXPLORER (APE) es un poderoso programa de monitorización, creado por la compañía ASPEN TECH, el cual organiza y presenta información de un proceso, permitiendo así la detección de irregularidades, toma de acciones para evitar éstas y así mejorar el desempeño del mismo. El APE entrega información que es recolectada en *InfoPlus.21* que es una base de datos en tiempo real, la cual proporciona un ambiente de aplicaciones al usuario, entre las que destaca la descarga de datos actuales o de históricos de la planta.

Este programa presenta diagramas esquemáticos que ilustran el proceso, y potentes gráficos de tendencias, tales como el que se puede apreciar en la figura N° 6, los cuales permiten la visualización del comportamiento de las variables seleccionadas en el tiempo [Aspen Tech, 2005].

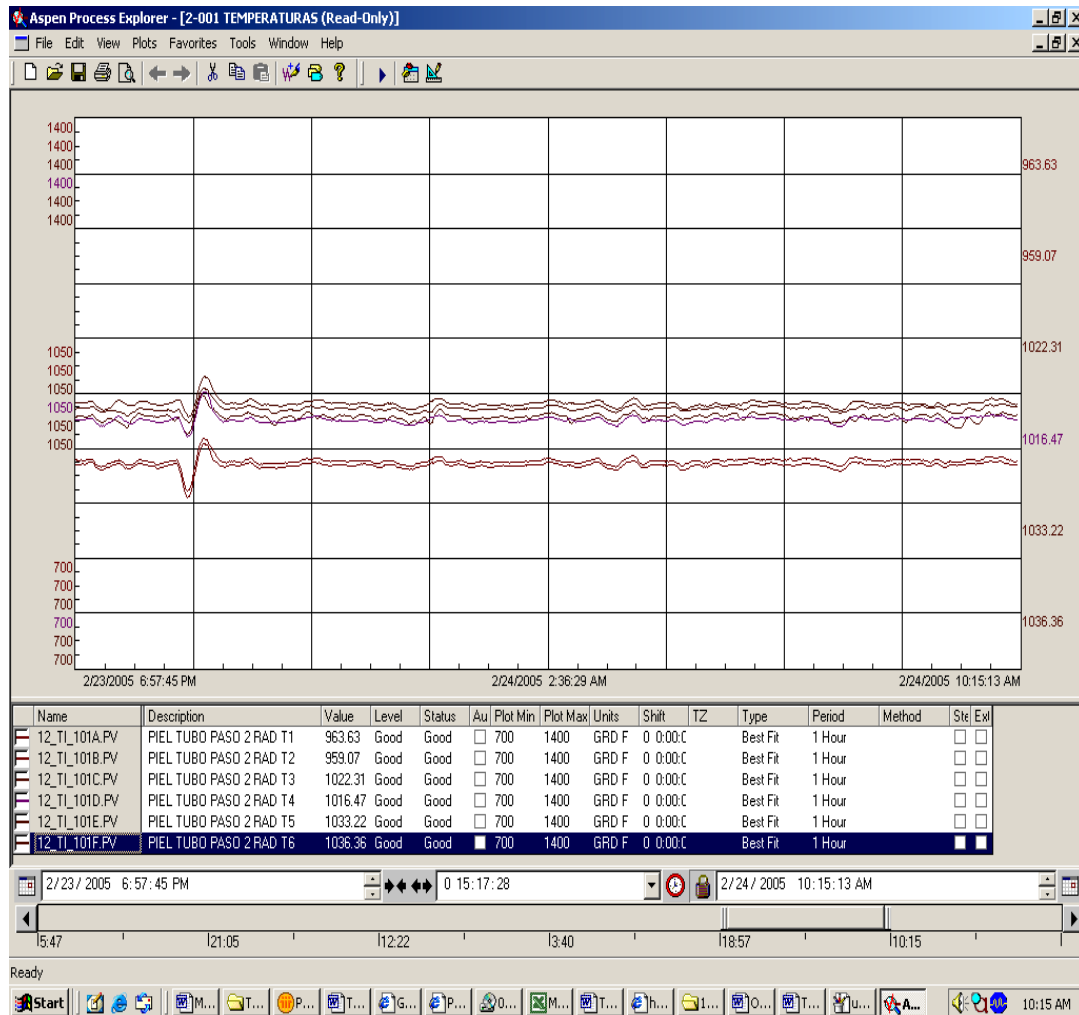


Figura N° 6. Gráfico de tendencias del ASPEN para el caso específico de la monitorización de sistema de temperaturas de la Unidad 12.

Fuente: APE Mejorador de Petrolera Ameriven, Unidad 12

Este software permite básicamente la recolección y visualización de las variables de un proceso que ha sido cargado al mismo, permitiendo desplegar la

información de una variable en específico, un equipo, una unidad o una planta entera. De lo anteriormente dicho resalta el hecho que ASPEN no permite otras funciones u operaciones con las variables que maneja, es decir, no se pueden hacer operaciones matemáticas, no se pueden cambiar condiciones que permitan ver como reacciona el sistema a ciertas perturbaciones, o ver un cierto escenario futuro, etc. Sin embargo, éste es compatible con programas especializados, como lo es el MICROSOFT EXCEL, que puede ser utilizado en conjunto mediante la activación del vínculo entre ambos programas.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos planteados, se siguió una serie de pasos relacionados en forma sistemática y organizada. Estos pasos conforman la metodología y los mismos se exponen en forma cronológica a continuación.

3.1.- Planificación

Al iniciar la investigación lo primero que se hizo fue diseñar un plan de trabajo, que se resume en cuatro secciones: *Génesis y Seguimiento Teórico*, el *Desarrollo de la Herramienta de Evaluación Hidráulica*, el *Desarrollo de la Herramienta de Proyección de consumos* y la *Presentación Final de las herramientas*. Un esquema simplificado de esa metodología planteada, se presenta a continuación en forma de flujograma en la figura N° 7.

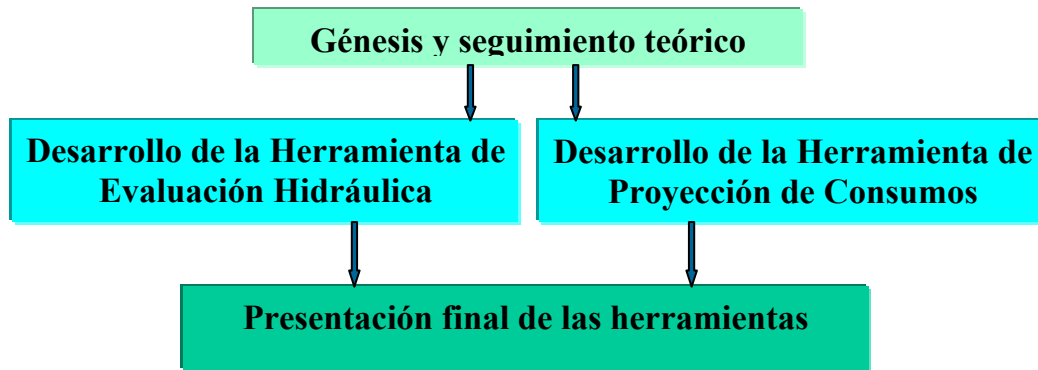


Figura N° 7. Diagrama de flujo de la metodología.

La primera parte se referiría a la documentación con el proceso y la recolección de información teórica necesaria para pasar a las siguientes dos secciones (desarrollo de las herramientas), donde se llevarían a cabo las acciones indispensables para realizar tanto la herramienta para el sistema de agua de enfriamiento, como para la del sistema de vapor y gas combustible. Finalmente, en la última sección se expondría el resultado del trabajo, las conclusiones y las recomendaciones; se introducirían los comentarios finales, se harían las correcciones sugeridas por el equipo de Ingenieros de Procesos de la planta (usuarios de las herramientas) y se redactarían los manuales operativos de las herramientas.

3.2.- Génesis y Seguimiento Teórico.

Ya con una visión de lo que se debía hacer, se empezó la investigación con la lectura de los primeros capítulos del manual de la Unidad 00, que trata los aspectos generales del Proyecto Hamaca y sus instalaciones, enfocándose básicamente en la operación del Mejorador.

Leyendo este primer manual, se comprendió la función y los objetivos de Petrolera Ameriven, así como el proceso que se llevaba a cabo en la planta refinadora, desde que llega el crudo diluido, hasta que se vende el petróleo comercial (Crudo Sintético Hamaca), que es el principal producto. También se pudo ver lo complejo del proceso, la cantidad de unidades que intervienen, la importancia de cada una de éstas y como se obtienen ciertos subproductos de importancia comercial.

Una vez que se finalizó esta lectura, se procedió a detallar cada una de las unidades involucradas en la investigación, es decir, leyendo los manuales del sistema de agua de enfriamiento, del sistema de gas combustible, y del sistema de generación y distribución de vapor.

De los manuales anteriormente nombrados, se empezó con el del sistema de agua de enfriamiento, en donde se muestra de manera específica cuál es la función de la unidad, cuáles son los equipos que componen a la Unidad, cómo trabaja cada uno de estos, sus limitaciones, sus capacidades y a quiénes sirve este servicio, es decir, quiénes son las unidades usuarias del agua de enfriamiento.

Seguidamente, se realizó la primera visita a planta, que abarcó un recorrido general por las principales Unidades, haciendo énfasis en el funcionamiento de cada una, sus alimentaciones y productos, y sobretodo en su ubicación. Durante esta visita guiada se recibió una inducción acerca de los procedimientos de registro y permiso que se deben realizar al ingresar a cada una de las áreas a inspeccionar.

Se prosiguió con la lectura del manual del sistema de gas combustible y del “Manual de Procesos Químicos en la Industria”, lo que permitió la comprensión del sistema y de la función tanto de los equipos que la componen, como de los gases que se mezclan para dar origen al gas combustible que se utiliza en el Mejorador.

El proceso inicial de documentación, se debía finalizar leyendo el último manual pendiente, que era el correspondiente a la unidad de generación y distribución de vapor; sin embargo, al leer dicho manual, se comprendió que esta unidad no era la única responsable de la generación del servicio, razón por la cual se recurrió a la revisión informes tales como el de “Monitorización del Sistema de Generación y Distribución de Vapor” para ver la integración de las diferentes unidades generadoras y a los manuales de operación de unidades como la de producción de hidrógeno, entre otras.

En este punto se podía decir que se tenía un conocimiento sólido sobre los sistemas y procesos pertinentes a la investigación, y por ende, necesarios para lograr el desarrollo de las herramientas. De esta forma se estaba preparado para proseguir con las siguientes dos secciones previstas en el plan original.

Como resultado de esta etapa de la investigación se logró condensar todo el proceso en unas descripciones que permitieran sentar las bases para la elaboración de las herramientas.

3.3.- Desarrollo de la Herramienta de Evaluación Hidráulica.

Se comenzó con el desarrollo de la herramienta de evaluación hidráulica, pues se pensaba que ésta podría ser de utilidad al momento de realizar las pruebas de desempeño que se llevarían a cabo en la torre de enfriamiento un par de meses después del comienzo de esta investigación. En las siguientes sub-secciones se presentan los pasos principales realizados para alcanzar los objetivos de esta herramienta.

3.3.1.- Concepción de la herramienta

La herramienta de evaluación hidráulica se realizaría bajo ambiente INPLANT, razón por la cual el primer paso de esta fase fue la lectura del “Tutorial Guide (PES)”, específicamente la parte relacionada al software antes mencionado, ya que este pequeño manual tutorial, contiene además secciones sobre otros softwares como lo son PRO/II, HEXTRAN, DATACON y VISUAL FLOW, programas que junto al INPLANT conforman el Process Engineering Suite (PES).

En esta guía se encontraría información primordial sobre el programa en cuestión, como lo son la categoría de trabajos que es capaz de manejar, la forma en que trabaja y las opciones que ofrece al usuario. Además, en ésta se encuentran algunos ejercicios tutoriales, que consistían en sistemas hidráulicos sencillos que debían ser simulados en el programa.

Estos ejercicios fueron realizados siguiendo el procedimiento señalado en el manual, procedimiento que se resume en: la introducción de unidades, propiedades y otros aspectos globales, la realización del diagrama de flujo (en el ambiente gráfico del programa), introducción de los detalles de las líneas (dimensiones, accesorios, etc.), introducción de los datos en las fuentes (dependiendo del caso a simular), corrida de la simulación, depuración de errores (si es necesario) y revisión de resultados. Estos pasos se pueden ver fácilmente mediante el flujograma mostrado en la figura N° 8.

Una vez que se realizaron estos ejercicios y se tenía un cierto dominio del programa se empezó a desarrollar propiamente la herramienta, siguiendo de igual forma, el procedimiento mostrado en dicho flujograma, de manera que lo principal fue introducir el sistema de unidades a utilizar, las propiedades y demás aspectos globales.

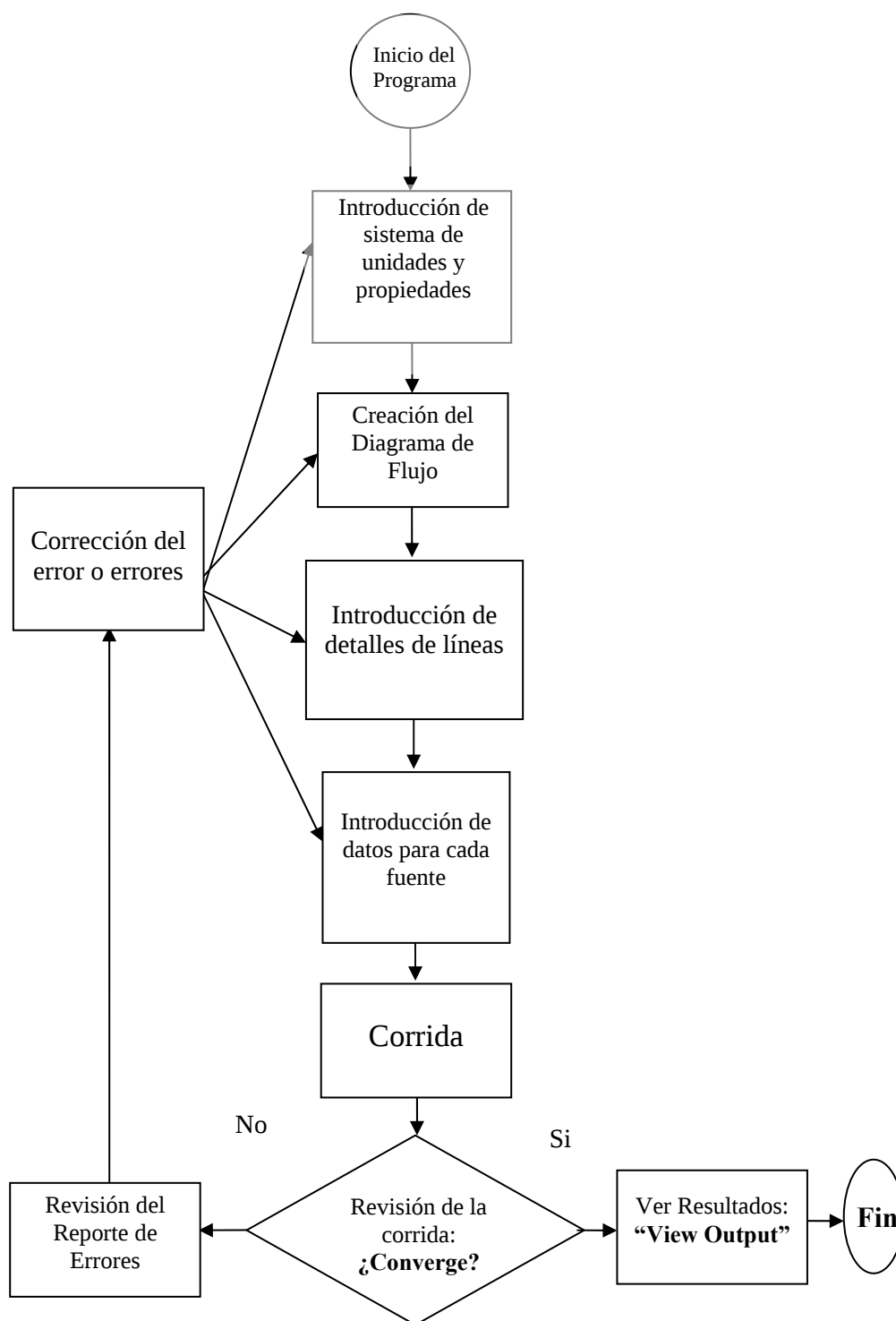


Figura N° 8. Algoritmo general del proceso de una simulación en el INPLANT.

En lo que respecta a las unidades de medición se utilizó, para las propiedades de la biblioteca del programa, el sistema inglés. Sin embargo, para ciertas variables se especificó directamente la unidad requerida, y para mostrar cuáles fueron estos casos, se expone la tabla N° 5, en donde se aprecia la variable y la unidad asignada.

Tabla N° 5. Sistema de unidades utilizado (variables principales)

Variable	Unidad
Flujo Volumétrico	gpm
Flujo Másico	KLb/h
Longitud (distancias cortas)	pulgadas
Longitud (distancias largas)	pie
Presión	psig
Temperatura	°F
Volumen	Pie ³
Densidad	Lb/pie ³
Viscosidad	cP
Conductividad	Btu/h.pie.°F

Luego que se introdujo el sistema de unidades a utilizar y se fijaron los aspectos generales, que son aquellas variables que son tomadas por el programa, como predeterminadas, es decir, a no ser que se cambien en un punto específico de forma expresa, el software tomará por defecto a las variables que se han denominado como aspectos globales. A continuación en la tabla N° 6 se presentan los principales aspectos globales predeterminados.

Tabla N° 6. Aspectos globales predeterminados para la herramienta

Aspecto	Valor predeterminado
Tipo de sistema	Red de tubería
Tipo de fluido	Fluido monofásico
Fase del fluido	Líquido
Tipo de rapidez de flujo	Base volumétrica
Alrededores de la tubería	Aire
Sistema de unidades	Inglés
Temperatura ambiente	80° F
Velocidad del aire	14,67 ^{pie} /s
Viscosidad del agua (90° F)	0.56 cP
Densidad del agua	62.428 ^{Lb} / ^{pie} ³
Rugosidad (de la tubería)	0,0018 pulgadas
Espesor de tubería	0,313 pulgadas
Conductividad (del Acero)	43 ^{Btu} /h.pie.°F

Luego se realizó el diagrama de flujo que representaría al sistema, el cual debía de constar de una unidad fuente, una cabezal principal por donde se desplazaría el servicio, las diversas ramificaciones hacia las unidades consumidoras, y finalmente dichas unidades. Para llevar a cabo este cometido se dispuso de diagramas como el que se puede apreciar en la figura N° 9, llamados interconeccting's.

Sin embargo, tal y como se puede apreciar en dicha figura, estos diagramas sólo presentan secciones del sistemas y remiten hacia otros de éstos para completar el mapa.

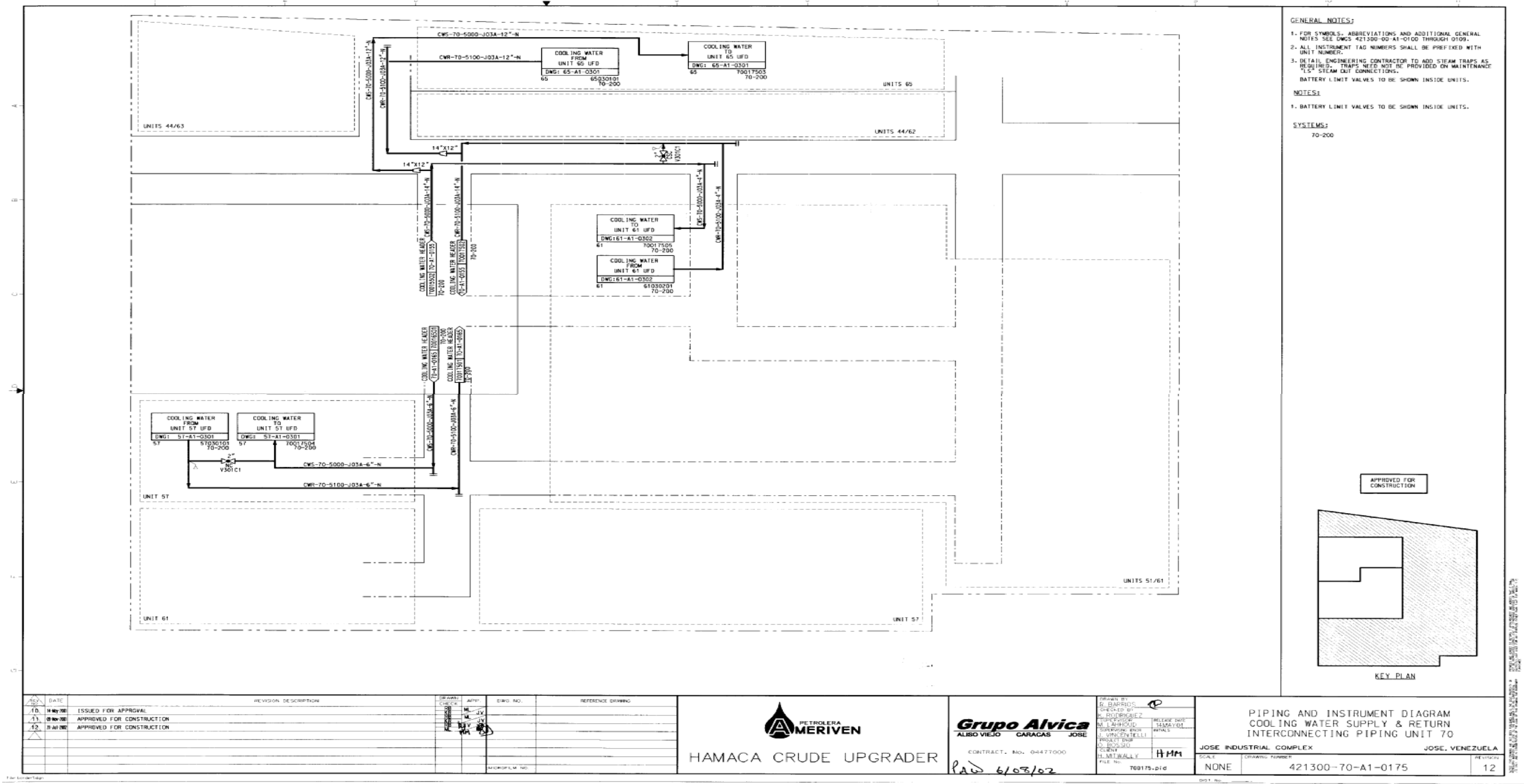


Figura N° 9. Diagrama de Interconexión de Tuberías del Sistema de Distribución y retorno de Agua de Enfriamiento. Área 70

Fuente: Piping and Instrument diagrams. Unit 70

Específicamente son tres diagramas de interconexión de tuberías, de manera que se debía primero unir las piezas del rompecabezas y así construir de forma continua un mapa que emulara al sistema real. Por esta razón, primero se realizó dicho esquema a mano, para posteriormente plasmarlo sobre el ambiente gráfico del INPLANT. La representación, en diagrama de bloques, del sistema de distribución, según lo aportado por los interconecting's, se puede apreciar en la figura N° 10.

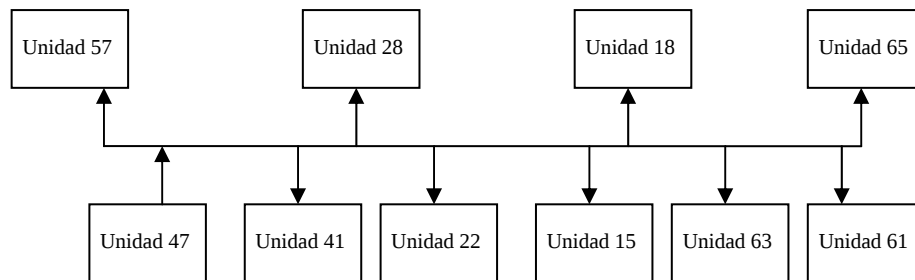


Figura N° 10. Diagrama de bloques del sistema de distribución de agua de enfriamiento.

Según lo desarrollado en la figura N° 10, están quedando por fuera muchas unidades que deberían utilizar agua de enfriamiento, es decir, que al parecer no estarían recibiendo el servicio por no disponer de tuberías que lleguen hasta las mismas. En realidad lo que sucede es que el servicio, en determinadas áreas operativas del Mejorador, no llega directamente a todas las unidades, siendo recibido por una unidad que distribuye de manera compleja el mismo hacia sus equipos y hacia las otras unidades pertenecientes a esa área.

En consecuencia, se decidió cambiar un poco el plan original, para entonces trabajar las llegadas de dos formas, las Unidades y las Áreas. Las primeras reciben directamente el flujo necesario para su consumo, mientras que las segundas reciben toda el agua necesaria para las unidades que la componen. Con todo esta base establecida se procedió a realizar el primer diagrama de flujo.

Posteriormente, surgieron ciertas dudas con respecto a la presión que debía tener el agua de enfriamiento hacia distribución en el límite de batería, existiendo discrepancias entre lo que indicaba la variable tomada por un medidor con conexión al sistema de control, y por lo tanto al ASPEN PROCESS EXPLORER; lo que estaba en el manual de operación de la Unidad, y lo que daban por sentado los Ingenieros de Procesos del área. Por esta razón, se decidió cambiar el plan original de empezar la red desde los límites de batería de la Unidad 47, para entonces añadir la red de tuberías dentro de la Unidad, y así tener un sistema de tres salidas y una cuarta salida desactivada, correspondientes a las bombas.

Se realizaron los cambios pertinentes, que incluían un nodo (junction) en el límite de batería, cuya función, además de servir como nexo entre la parte nueva y la vieja, era disponer de valores de presión simulados para de esa forma comparar con los valores reales que serían tomados en el momento de la validación y con los valores tomados del ASPEN, tomados por el medidor automático.

Finalmente, se culminó el diagrama, habiendo solucionado eficazmente el problema suscitado, y se siguió con la introducción de los detalles de las instalaciones, añadiendo a cada una de las líneas (Links) que conforman la red en el diagrama, los segmentos de tubería, su recorrido, los accesorios correspondientes (codos, ampliaciones, reducciones y válvulas) con sus respectivas especificaciones, sus dimensiones, altura a la cual se encuentran (cota), etc.

Para realizar esta tarea se dispuso de los diagramas isométricos, los cuales son unos diagramas tridimensionales que muestran los diferentes tramos de la red, con todos los detalles de la misma, incluyendo que materiales, cuántos y cuáles soportes, etc. En la figura N° 11 se puede apreciar uno de los diagramas isométricos pertenecientes a la red de distribución de agua de enfriamiento, específicamente al correspondiente al segmento de tubería inicial del cabezal de distribución, en donde se puede apreciar las cuatro ramificaciones laterales, correspondientes a las entradas de los flujos provenientes de las bombas (una por cada bomba).

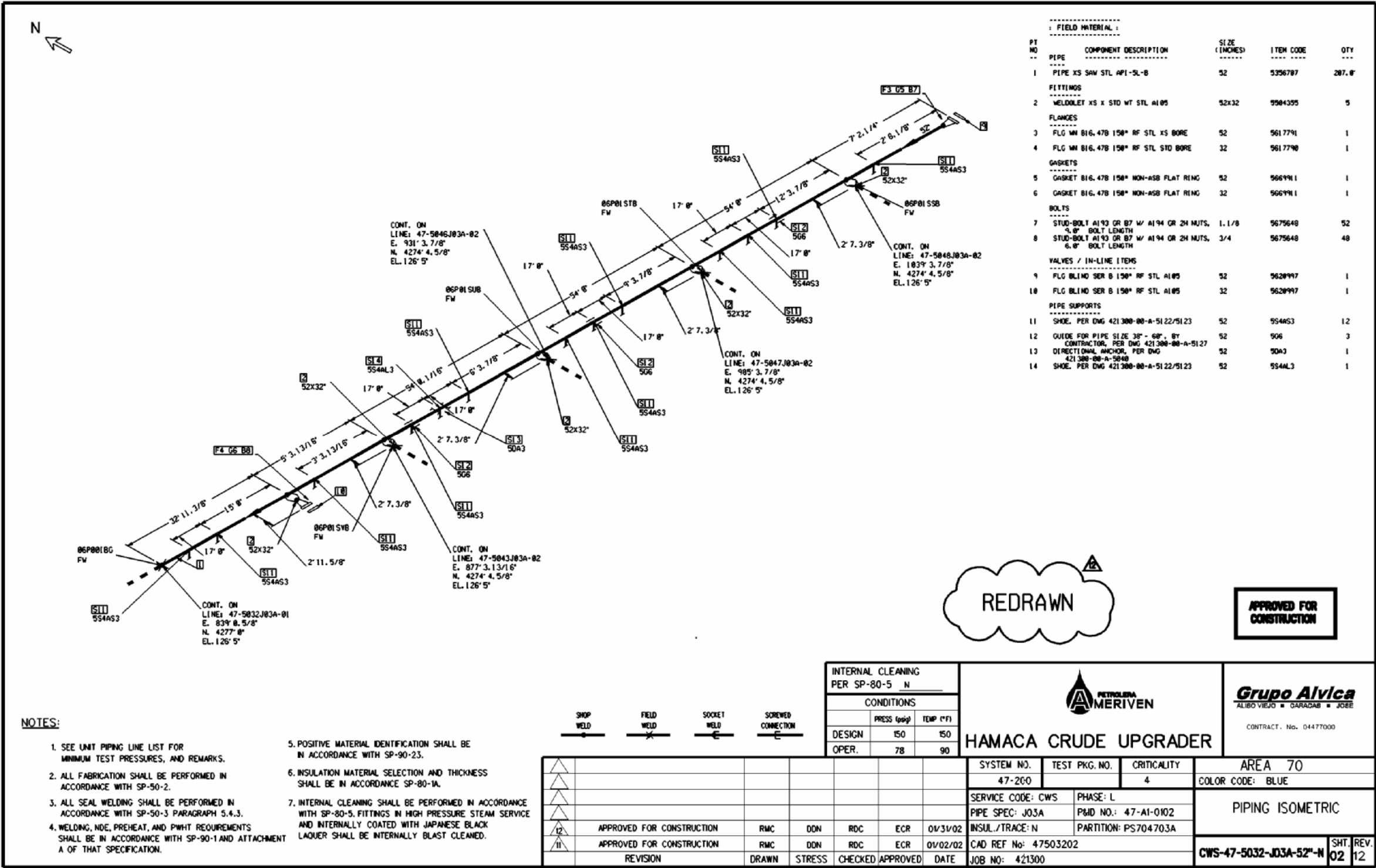


Figura N° 11 Diagrama Isométrico del Área 70, Unidad 47.

Fuente: Isometric library

Trabajar con este tipo de diagramas fue bastante tedioso y tomó cierto tiempo. Primero fue complicado hallarlos en su totalidad, así como el proceso de descarga de la información de los mismos, ya que cada uno de ellos muestra la información de ciertos segmentos de línea, de manera que había que ir digitalizando la información detallada y metódicamente, siguiendo uno tras otro todos los isométricos, con sus diversas ramificaciones, que describían al sistema. Cabe destacar que para conseguir la información de la red de tubería del sistema de agua de enfriamiento, se utilizaron más de 50 diagramas isométricos

A pesar de esto, la información debía corroborarse y para ello se hicieron varias visitas a planta, para realizar el recorrido de las líneas del sistema de distribución y así verificar cada uno de los detalles que se cargaron en el programa, así como determinar los puntos en donde se tomarían las presiones en el momento de la validación. Estas visitas conllevaron a realizar ciertas correcciones en algunos accesorios, así como en lo que se había fijado como límite de batería para cada una de las llegadas del servicio.

Una vez que el diagrama estuvo listo, se tenía a punto la base de la herramienta, la estructura principal, de manera que el próximo paso era validar la misma, proceso que se detalla en la siguiente sección.

3.3.2.- Validación de la herramienta

Para realizar la validación de la herramienta primero se debía montar el Caso Base dado por diseño, luego tomar las presiones reales del sistema y finalmente hacer la comparación. Estas etapas ordenadas cronológicamente, se explican a continuación.

- ❖ **Simulación del Caso Base:** Ya con el diagrama listo, totalmente detallado y representativo de la realidad, el próximo paso fue introducir los datos pertenecientes al caso de diseño, en cada uno de los puertos, es decir, en las

salidas (sources) y en las llegadas (sinks). Estos datos se destacan en la tabla N° 7 a continuación.

Tabla N° 7. Variables fijadas para la simulación del Caso Base

Variable	Valor
Flujo desde las bombas	23696 gpm
Presión de descarga en cada bomba	77.2 psig
Temperatura del fluido en la descarga de las bombas	90° F
Flujo hacia la Unidad 57	370 gpm
Flujo hacia el Área 70	3026 gpm
Flujo hacia el Área 30	4200 gpm
Flujo hacia la Unidad 22	2811 gpm
Flujo hacia el Área 50	20686 gpm
Flujo hacia el Área 20	13935 gpm
Flujo hacia la Unidad 10	19620 gpm
Flujo hacia la Unidad 63	400 gpm
Flujo hacia la Unidad 61	15 gpm
Flujo hacia la Unidad 65	2000 gpm
Presión estimada en todas las llegadas	60 psig

En las siguientes figuras se puede ver como es el cuadro de introducción de datos en los puertos. En la figura N° 12 se muestra el caso correspondiente a una salida, específicamente la de la bomba A (PA), mientras que en la N° 13 se observa el propio de una llegada, en este caso el del Área 70 (A70).

Non-Compositional Source

Source Name: PA

Mandatory Data

Enthalpy

Temperature: 90.00 F

Steam Quality: 0.000 %

PVT Property Set: 1

Pressure:

☒ Fixed: 77.20 psig

☐ Estimated: psig

Flow Rate:

☒ Fixed: 23696.000 gal/min

☐ Estimated: gal/min

☐ Disable Source

OK Cancel Help

Figura N° 12. Ventana de edición de valores para una salida

Sink

Sink Name: A70

Mandatory Data

Pressure:

☐ Fixed: psig

☒ Estimated: 60.00 psig

Flow Rate:

☒ Fixed: 3600.000 gal/min

☐ Estimated: gal/min

☐ Disable Sink

OK Cancel Help

Figura N° 13. Ventana de edición de valores para una llegada

Tal y como se puede apreciar en ambas figuras, el programa da la opción de estimar o fijar, el flujo y las presiones; dados los intereses que se persiguen, es decir, cumplir con el caso base, para las salidas (sources) se fijan ambas variables y para las llegadas se fijó el flujo según el caso base, mientras que, debido a que lo que se quería realizar era una evaluación hidráulica, la presión en ese punto se estimó, para que sirviese de semilla a la hora realizar el proceso iterativo de la corrida. También en las figuras se aprecia la casilla de desactivación (“Disable Sink”) usada para desactivar o activar los puertos, por

ejemplo, la unidad futura que es una llegada que se activa, o en casos como el de la bomba D (PD), que no está en operación, así como cualquier otro caso en un escenario determinado.

Con toda la información cargada en el diagrama de flujo del sistema construido en el INPLANT, se procedió a correr la simulación. Como era de esperarse se obtuvieron diversos errores y advertencias, iniciándose así un proceso en forma de ciclo, tal y como se vio en el diagrama de la figura N° 8, en donde al aparecer los errores y no llegar a una solución, se veía el reporte de errores en busca de los mismos, se hacían las modificaciones pertinentes y se volvía a correr, repitiéndose estos pasos hasta alcanzar la convergencia, cuando el reporte de errores en su última página muestra una ventana similar a la presentada en la figura N° 14. Este proceso es lo que se conoce como depuración de errores.

```

d:\SIMSCI\INPLANT\GUI\INPLANT.R02

-----
1  INTERMEDIATE PRINTOUT

CONVERGENCE TOLERANCE      0.50 PSI PRESSURE IMBALANCE AT SELECTED NODES
                             (RMS VALUE USED FOR STEP-SIZE SELECTION)

ITERATION NUMBER  0.0
MAX PRESSURE IMBALANCE =                90.928 PSI AT NODE PAP
RMS AVERAGE PRESSURE IMBALANCE =        52.497 PSI

ITERATION NUMBER  1.0
MAX PRESSURE IMBALANCE =                0.001 PSI AT NODE J077
RMS AVERAGE PRESSURE IMBALANCE =        0.001 PSI

*****
PBAL SOLUTION CONVERGED AFTER  1 ITERATIONS
*****

PAGE      CONTENTS
-----
2  SOLUTION DATA
    ***** PROBLEM SOLUTION REACHED *****
3  NETWORK REPORT
47 ERROR SUMMARY

END OF NETWORK PROCESSING --    NO ERRORS
                           --    NO WARNINGS
  
```

Figura N° 14. Ventana de INPLANT con la última página de reporte de errores

Uno de los errores principales que se encontró estaba relacionado con el número de grados de libertad que tenía el sistema para poder realizar el cálculo de las presiones, por esta razón se tuvieron que hacer ciertas modificaciones en busca de la eliminación de dicho error. Finalmente, se optó por cambiar el tipo de variables en dos de las salidas (bombas), es decir, se dejaba como variable fija la presión en las mismas, mas se colocaban como valores estimados los correspondientes al flujo, para que de esta forma el programa calculara los mismos, y así no presentar el problema de sobre-especificación del sistema.

Una vez que la corrida fue satisfactoria, se revisaron los resultados por puerto, así como también el reporte de resultados detallado, cuyo ejemplo se puede apreciar en el apéndice A, para así tener las presiones de simulación en cada uno de los usuarios, y posteriormente proceder a la validación de estos valores.

- ❖ **Recolección de datos (levantamiento del perfil de presiones):** Lo primero que se hizo para proceder con la recolección de las presiones, fue la redacción de una carta explicativa del proceso de levantamiento del perfil de presiones del sistema de agua de enfriamiento, solicitando la permisología pertinente para un sólo día en específico, un manómetro portátil con rango entre 0 y 100 psig, un adaptador (conexión de tubería) con entrada de $\frac{3}{4}$ " y salida de $1\frac{1}{2}$ ", herramientas para realizar el trabajo de montaje y desmontaje de manómetros y un operador que diese el apoyo necesario en la tarea.

Una vez que la permisología estuvo en orden y se dieron las condiciones, se llevó a cabo el levantamiento de perfil. Este proceso consistió en hacer que las unidades (todas en operación) consumieran toda el agua de enfriamiento dada por diseño y así en un mismo día ir hasta los límites de batería de las unidades o áreas involucradas con el servicio, para tomar la presión del agua de

enfriamiento en puntos determinados con anterioridad (descargas) y así obtener las presiones reales.

El primer punto en ser medido fue el correspondiente a la salida del agua de enfriamiento de la Unidad 47 a través del cabezal de suministro, luego se pasó a la Unidad 57, al resto del Área 70 y así sucesivamente hasta llegar a la Unidad 65, última en la cadena de unidades consumidoras del servicio. Cada una de las mediciones se llevó a cabo con la ayuda de un operador, siguiéndose metódicamente los siguientes pasos:

1. Cerrar la válvula de la descarga (tubería de $\frac{3}{4}$ ").
2. Remover el tapón de dicha tubería.
3. Abrir intermitentemente la válvula varias veces y cerrar. Esto para remover depósitos sólidos y demás impurezas en la tubería.
4. Conectar el manómetro en la descarga.
5. Abrir la válvula.
6. Ver la lectura del manómetro y tomar nota de la misma.
7. Cerrar la válvula.
8. Desconectar el manómetro.
9. Colocar el tapón.
10. Abrir la válvula.

Cabe destacar que el proceso de toma de presión en la unidad 65, no se pudo realizar en la descarga que se había precisado con anterioridad, debido a que al tratar de remover el tapón el mismo no cedía, inclusive poniendo en riesgo la integridad de la descarga de la tubería (parecía que se podía fracturar) y del proceso en sí. Por esta razón se decidió, en ese momento, cambiar de punto de toma de presión, tomando como nueva opción una descarga que se encontraba en el interior de la unidad. Esta decisión indujo un cambio en la información de la línea (que llegaba a la U65) en el diagrama del INPLANT, es decir, se tuvieron que introducir nuevos detalles correspondientes al tramo de tubería entre la descarga original y la nueva, para lo cual se tuvo que realizar el

levantamiento de la información en el campo, pues no se disponen de los diagramas isométricos correspondientes a esta Unidad.

- ❖ **Comparación de la simulación con los valores reales:** Una vez que se midieron todas las presiones en planta, se procedió a comparar éstas con las presiones obtenidas a través de la simulación para ver si se validaba la herramienta, utilizando un criterio de desviación por debajo del 5%, por cada una de las presiones calculadas.

Como era de esperarse, no todos los puertos cumplieron con el criterio de desviación que se había fijado, por lo que se tuvieron que realizar ciertos cambios en pro de lograr disminuir estas desviaciones. Para lograr esto, se hicieron nuevas revisiones de los manuales, ciertas mediciones en planta, etc., hasta alcanzar la validación de la herramienta

3.3.3.- Manejo de escenarios.

Una vez que se validó la simulación se siguió con la creación de diversos escenarios de operación, centrándose en cuatro casos posibles, que se enlistan a continuación:

- A: Dos bombas en operación.
- B: Aumento de rugosidad de la tubería.
- C: Incorporación de una nueva unidad.
- D: Aumento en el diámetro de la tubería de descarga de las bombas.

Para el escenario de la operación con dos bombas debido a fallas en el sistema de vapor, lo primero que se hizo fue deshabilitar la tercera de las bombas, así como las tuberías que conectan esta bomba con el cabezal principal de distribución. Posteriormente se fijaron los flujos dados por cada bomba, en 25000 gpm lo cual correspondía con lo dado en la tabla N° 2 con respecto al NPSH, y además estaba por

debajo del máximo permitido por la velocidad del fluido en descarga, que se calculó en 25067 gpm.

Luego se calculó el porcentaje que estos 50000 gpm (sumando los caudales de cada bomba) representaban ante el caso dado por diseño, para así fijar en cada una de las llegadas un flujo igual a ese tanto por ciento (72%), del flujo de diseño de esa Unidad o Área. Luego de calcular los flujos de salida y los de llegada, se corrió la simulación y se obtuvieron los resultados.

Para el segundo escenario se entró en la aplicación del programa que permite fijar los aspectos globales, en donde se cambió la rugosidad predeterminada para el caso original, aumentándola al doble, es decir, hasta 0.0036 pulgadas. Luego se corrió el escenario y se guardaron los resultados.

Para el caso de una nueva unidad futura, que es un escenario bastante posible según lo que se maneja dentro de la empresa, se habilitó la llegada destinada para ese caso, así como la tubería consignada para tal fin, para luego fijar los flujos. Se estableció el flujo máximo por bomba en 25000 gpm, dando un total de 75000 gpm, mientras que para las llegadas se mantuvieron los flujos obtenidos en el caso base y para la unidad nueva se dejó la variable abierta para que el programa lo calculara cerrando el balance de masa. Se llevó a cabo la corrida y se almacenaron los resultados.

El último escenario simulado se desarrolló para ver si existía la posibilidad de disminuir considerablemente la caída de presión existente entre la descarga de las bombas y el límite de batería de la Unidad 47, mediante el aumento del diámetro de la tubería que conecta a estos dos puntos. Para ello se tomaron en consideración dos aspectos en conjunto: uno es la velocidad mínima del flujo en la tubería de descarga, ya que a medida que se aumenta el diámetro disminuye la velocidad, y el otro es el tamaño comercial de tuberías. Tomando en cuenta estos dos aspectos, se seleccionaron tres diámetros para hacer las corridas, dimensiones que fueron

introducidas como detalles de accesorios y tuberías en cada una de las líneas correspondientes. Finalmente, se corrió la simulación para cada una de las dimensiones seleccionadas y se almacenaron los resultados con las nuevas caídas de presión, para así posteriormente realizar el análisis del último de los escenarios. De esta forma se llegó al final del desarrollo de la herramienta de evaluación hidráulica.

3.4.- Desarrollo de la herramienta de proyección de consumos.

Para realizar esta herramienta lo primero que debía hacerse era familiarizarse con el programa ASPEN PROCESS EXPLORER, aprendiendo a identificar las etiquetas, que son los identificadores de los medidores ubicados en planta y con conexión al Sistema de Control Distribuido (Distributed Control System - DCS), de algunas variables como temperatura, presión, etc. del sistema de agua de enfriamiento, utilizando el buscador de etiquetas, viendo las tendencias de estas variables y cómo se podía manejar esa información con respecto a los rangos de tiempo, etc. Este paso se realizó bajo la tutoría de Ingenieros de Procesos del área de Servicios Industriales.

Luego, se estructuró un esquema de trabajo para obtener los resultados adecuados para concretar la herramienta. Este esquema se muestra en la figura N° 15.

A partir de la planificación de los pasos a seguir, se procedió a iniciar el trabajo, empezando con la realización de una base de datos con la información de las etiquetas que identificaban a cada uno de los flujos correspondientes a las entradas o cargas a cada unidad consumidora o productora de los servicios de vapor y gas combustible, así como los flujos de los servicios que estaban siendo generados o consumidos. Para realizar esta tarea se contó en primera instancia con los balances de masa automatizados, realizados por los ingenieros Gonzáles, Istúriz y Montaña, en donde se encontraban muchas de las etiquetas necesarias, como lo son aquellas correspondientes a los servicios de vapor de baja, de media y de alta presión.

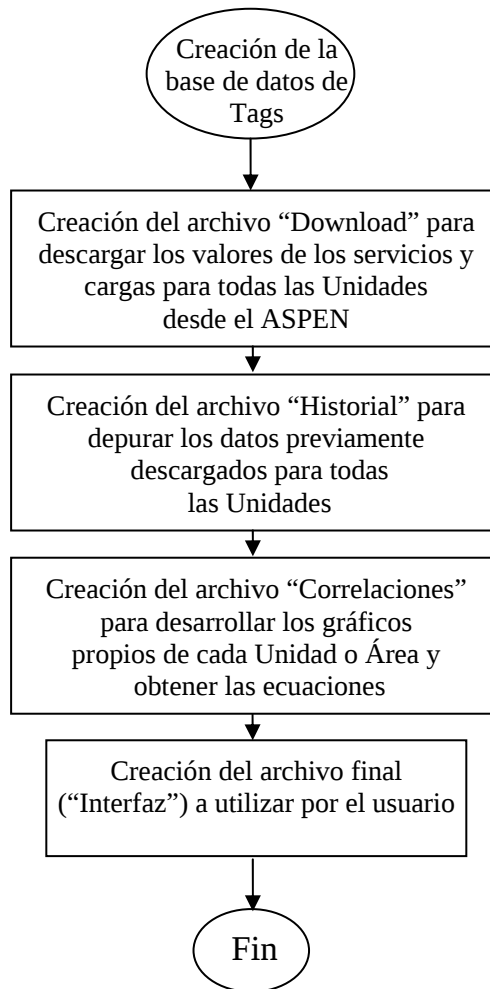


Figura N° 15. Esquema inicial para el desarrollo de la herramienta de proyección de consumos

Sin embargo, no todas las etiquetas requeridas estaban en la herramienta antes mencionada, razón por la cual se recurrió a una aplicación que tiene directamente el ASPEN llamada "Tag Browser", que permite la búsqueda de las etiquetas bien sea introduciendo un segmento de su código, o la descripción de la corriente, o una combinación de ambas alternativas, de forma similar que un buscador de sitios en Internet. Este buscador interno del programa permitió la localización de la mayoría de las etiquetas que faltaban, especialmente las referentes a la carga a las unidades involucradas; además se pudo corroborar la información obtenida de los balances de masa, así como la corrección de ciertos datos erróneos.

Para este momento, casi todas las etiquetas de los medidores de flujo requeridos se encontraban en la base de datos, sin embargo, existían ciertas corrientes que no tenían medidores automáticos para flujo. Para resolver estos inconvenientes se decidió trabajar con las señales de las válvulas que regulaban dichos caudales.

Algunas de estas señales eran de tipo binario, es decir, daban valores iguales a 0 o iguales a 1, las cuales correspondían a válvulas que podían estar completamente abiertas o cerradas. En tal sentido, éstas se estudiaron más a fondo para determinar en qué forma fallaban y así fijar los valores de flujo según la señal. Si la válvula estaba completamente abierta (señal igual a 1 para válvulas a falla cerrada, o igual a 0 para aquellas a falla abierta), el flujo era el dado por diseño; si por el contrario el accesorio estaba completamente cerrado, el flujo se fijaba en 0.

Otras señales, daban el porcentaje o la fracción de apertura de la válvula, para lo cual se tuvo que trabajar individualmente con cada una de las curvas de las mismas de manera de determinar una ecuación de flujo en función de la apertura. De esta forma se descargaría en el archivo EXCEL el porcentaje de apertura y en una celda aparte se calcularía el flujo correspondiente a dicho porcentaje.

Una vez que todas las etiquetas estuvieron identificadas, se procedió a crear un archivo en EXCEL que permitiese descargar los valores asociados a cada una de las etiquetas recolectadas con anterioridad, a este archivo se le asignó el nombre de “Download”. Para realizar este cometido se activó el vínculo con el ASPEN, luego se realizó una hoja de cálculo informativa que contenía los datos, por unidad de proceso o servicio, de las diferentes etiquetas, como lo son su código, su descripción y la unidad de medición en la que estaba reportada la variable, tal y como se muestra en el ejemplo de la tabla N° 8.

Posteriormente se realizaron diversas páginas, una por cada unidad, en donde, con las diferentes etiquetas, se descargaban los valores de los flujos de las diferentes corrientes involucradas, en forma de promedio diario. Para poder realizar esta labor

se debía especificar el día de inicio, así como el día de finalización de la toma de valores desde la base de datos del ASPEN, las etiquetas correspondientes y como se requería el valor de la variable (actual, promedio semanal, cada hora, diario, etc.)

Tabla N° 8. Extracto de hoja de etiquetas (“tags”) del archivo “Download”

Área 10		
tag	Descripción	Unidad
10_FIC_056.PV	Alimentación de Crudo Diluido a la U10	MBD
10_FI_619.PV	Alimentación de Residuo Atmosférico a Torre de Vacío	MBD
10_FI_903.PV	Consumo de Vapor de Alta Presión	Klb/h
10_FI_902.PV	Consumo de Vapor de Media Presión	Klb/h
10_FIC_233.PV	Consumo de Vapor de Baja Presión por 10C001	Klb/h
10_FIC_354.PV	Consumo de Vapor de Baja Presión por 10C004	Klb/h
10_FIC_302.PV	Consumo de vapor de Baja Presión por 10C003	Lb/h
10_FI_901.PV	Consumo de Vapor de Baja Presión (Total)	KLb/h
10_FIC_487.PV	Consumo de Gas Combustible por H001	MMSCFD
10_FIC_527.PV	Consumo de Gas Combustible por H002A	MMSCFD
10_FIC_627.PV	Consumo de Gas Combustible por H002B	MMSCFD

Con el archivo de descarga listo, se realizó el segundo archivo (“Historial”), siguiendo la planificación original, en el que se organizarían sólo los valores de flujos totales (descargados o calculados en el archivo anterior) según la fecha a la que correspondieran y según la unidad a la que pertenecieran, para así poder desarrollar más fácilmente el proceso de depuración de los datos.

Siguiendo con lo que se había previsto, se realizó un tercer archivo en donde se graficarían los diferentes servicios con respecto a la carga a la unidad en donde se estén consumiendo o generando. Este archivo se denominó “Correlaciones” ya que a partir de los gráficos realizados en éste, se obtendrían las ecuaciones que correlacionarían a las variables. Este archivo, al igual que sus predecesores, se organizó por unidades o áreas, según fuese el caso, y sólo contemplaba la carga y los servicios en su totalidad.

Sin embargo, este sistema de los tres archivos (“Download”, “Historial” y “Correlaciones”), no resultaba práctico a la hora de identificar problemas operacionales y así realizar la depuración de datos, lo cual quedó evidenciado al trabajar con unidades aguas abajo del proceso, como lo son las unidades 14, 15 y 16, o peor aún, al trabajar con unidades de apoyo como las pertenecientes al Área 30. Por esta razón, se empezó a estudiar la forma de mejorar el proceso de depuración de datos, hasta llegar a la conclusión de cambiar la metodología original que se había planteado para lograr los objetivos de esta segunda herramienta.

De esta manera se desarrolló una nueva metodología interna, tal y como se ve en el siguiente flujograma.

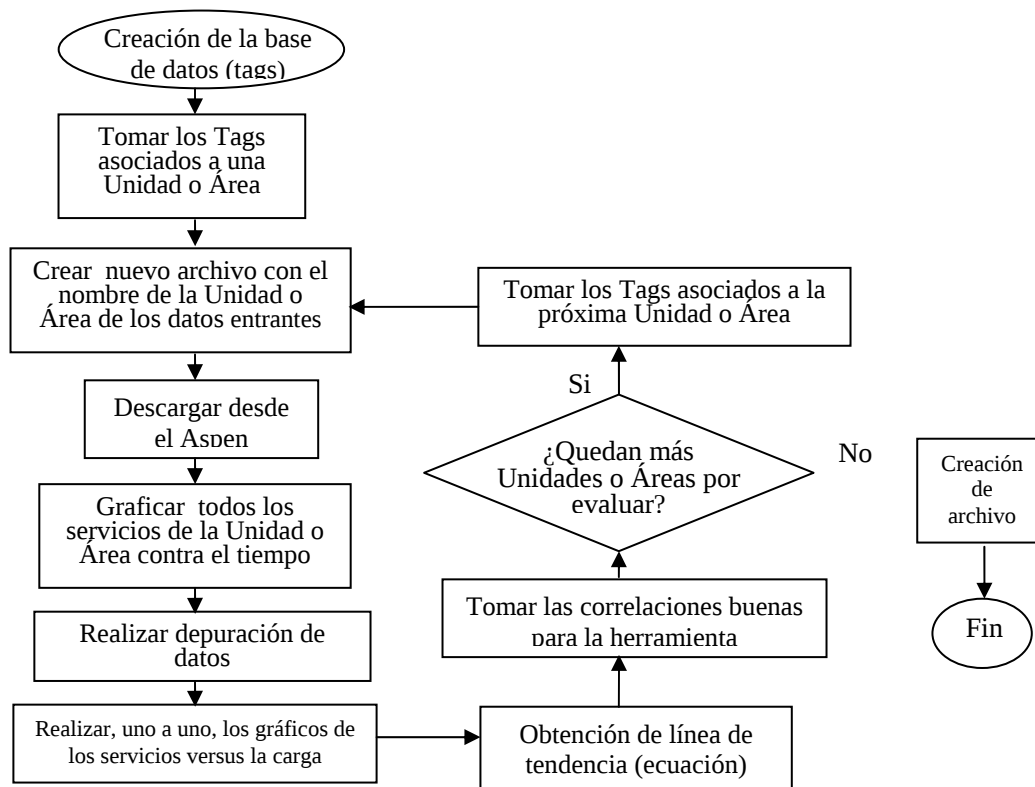


Figura N° 16. Flujograma de la segunda planificación para desarrollar la herramienta de proyección de consumos

Puesto que la base de datos estaba creada, se dejaron de acumular todos los datos de cada una de las unidades en un solo archivo, ya que al fin y al cabo estos

serían el apoyo para desarrollar las correlaciones y la herramienta final. De esta forma se crearon tantos archivos como unidades consumidoras o productoras de los servicios en estudio existieran en la planta, y cada archivo tendría su sección de descarga, de manipulación, etc.

Estos nuevos archivos contaban con la particularidad de poder desarrollar un gráfico de las variables involucradas en función del tiempo, pudiéndose visualizar irregularidades en la carga a la unidad o en alguno de los servicios, además de permitir apreciar cómo se comportaban las curvas de tendencia de cada una de las variables.

En estos gráficos se podían observar los diferentes picos o caídas en las curvas de las variables, ocurridas en el período de tiempo señalado, los cuales indicaban que en esos días la unidad o la planta no estaba operando regularmente, dando así un primer indicio de anomalía que permitiese investigar de una manera más puntual y certera. Con estas hojas y gráficos listos, se realizó el proceso de depuración, utilizando tanto los gráficos de tiempo, como el reporte de eventualidades y el soporte brindado por los Ingenieros de Proceso encargados de cada Unidad.

Una vez que se culminó la depuración, se procedió a graficar y correlacionar los diferentes servicios con respecto a la carga de cada una de las unidades. Para ello se siguió con el esquema de un archivo por cada Unidad, de manera que para realizar cada uno de estos gráficos, sólo se añadiría una hoja nueva. El proceso de graficar y obtener las ecuaciones se realizó colocando como variable independiente a la carga a la unidad, de manera que esos valores estarían en la columna correspondiente al eje “x”, mientras que los valores correspondientes al servicio, bien sea vapor en cualquiera de sus tres niveles de presión (generación y/o consumo), o gas combustible (generación y/o consumo), se graficaría en el eje “y”, tomándose como variable dependiente de la primera. Es decir, que por cada Unidad se tiene, como máximo, 8 gráficos de servicio versus carga.

Después de obtener los gráficos, hechos de tipo dispersión de puntos (por pares), se realizaron, mediante las facilidades de EXCEL, diversas líneas de tendencias (ajustes lineales y polinomiales en su mayoría) que mostrarían el grado de correlación, mediante el R^2 . De estas funciones se escogería la mejor de ellas como posible ajuste para la herramienta, ya que la selección final estaría en el criterio del mínimo valor para el R^2 , el cual se fijó inicialmente en 0,9; sin embargo, para ciertos casos se tomaron valores inferiores, excepciones que se aplicaron tomando en cuenta justificaciones lógicas y bien fundamentadas.

Finalmente, con todas las ecuaciones posibles, con las limitaciones fijadas y con los valores constantes a utilizar, se procedió a crear un último archivo en EXCEL, que sería la herramienta en sí. Este archivo se denominó “Interfaz” y en él se encuentra el resultado de todo el trabajo previo para llegar hasta aquí, labor que resulta transparente para el usuario.

Este archivo consta de cuatro páginas, una para que el usuario introduzca las cargas de las unidades, propias del escenario que desea recrear, y otra tres correspondientes a resultados, las cuales se encuentran bloqueadas para evitar que el usuario pueda cambiar las celdas programadas con las ecuaciones.

De esta forma quedaba estructurado el archivo interfaz, o lo que es lo mismo, la herramienta de proyección de consumos, quedando aún por hacer el último paso según lo planteado en el esquema y según lo esperado por Petrolera Ameriven, correspondiente a la presentación de las herramientas, procedimiento que se explicará en la próxima sección.

3.5.- Presentación final de las herramientas

Una vez que ambas herramientas estuvieron listas, se procedió a realizar las presentaciones en diapositivas (una por cada herramienta) en MICROSOFT POWER POINT, para exponer de forma general, al grupo de Ingenieros de los Servicios

Industriales, los pasos que se siguieron para realizar las herramientas, las premisas y simplificaciones que se tomaron, los resultados, las conclusiones y las recomendaciones finales.

Con estas presentaciones lo que se buscaba era obtener la opinión del equipo de ingenieros y tratar de mejorar en lo posible la herramienta, corrigiendo detalles o agregando complementos.

Además se procedió a realizar las notas técnicas, las cuales son el documento escrito que reposará en la biblioteca del Mejorador de Petrolera Ameriven, a disposición de todos los empleados que así los requieran, y será entregado a los usuarios de cada herramienta, sirviendo así como informe de lo que se hizo y a la vez actuar como manual de operación.

Para realizar estas notas técnicas primeramente se pidió un código por cada herramienta a la base de documentación, ya que éste sería el serial de identificación de dichos documentos en la biblioteca, tanto de forma escrita, como de forma electrónica, luego se redactó el cuerpo de cada una de éstas, se agregaron los anexos en función de servir como manuales de operación, se le hicieron las correcciones de redacción y presentación y finalmente fueron firmadas y entregadas al personal de documentación de la biblioteca, a los superintendentes de cada área y al resto de los usuarios de las herramientas.

De esta forma quedaba culminada la realización de las herramientas electrónicas para los servicios industriales del complejo mejorador de crudo de Petrolera Ameriven.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en la realización de las herramientas electrónicas para los Servicios Industriales del Complejo Mejorador de Petrolera Ameriven.

4.1.- Consideraciones preliminares

Indiscutiblemente el desarrollo en sí de las herramientas es el resultado más relevante de este trabajo, sin embargo, antes de poder siquiera empezar a realizarlas, ya se preparaban ciertos resultados, tal vez menos tangibles, pero de vital importancia para alcanzar los objetivos fijados. Estos resultados son los obtenidos en la etapa de “Génesis y seguimiento teórico” en términos de conocimiento de los sistemas involucrados en el estudio y descripción de los procesos asociados. A continuación se exponen los resultados emanados de las primeras actividades dentro del Mejorador de Petrolera Ameriven.

4.1.1.- Descripción del sistema de agua de enfriamiento

El sistema de agua de enfriamiento es de modalidad cíclica, debido a que el servicio es llevado hacia los equipos en donde se lleva a cabo el proceso de enfriamiento de las corrientes de proceso, y luego que el agua ha retirado calor, es devuelta a la unidad de enfriamiento, en donde el agua se pone en contacto con aire para reducir de nuevo su temperatura y transformarla nuevamente en agua lista para enfriar. Este ciclo se puede visualizar de forma muy simplificada en la figura N° 17.

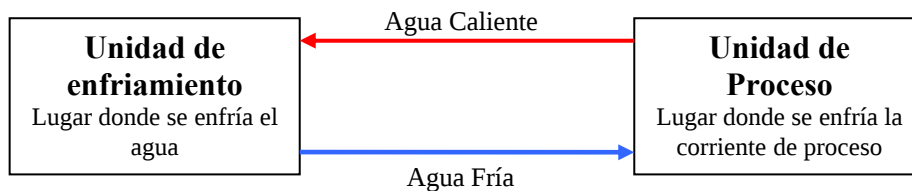


Figura N° 17. Esquema simplificado del ciclo del agua de enfriamiento

No obstante el sistema es mucho más complejo, debido a que la unidad de enfriamiento es un conjunto de equipos que relacionados cumplen con el objetivo de enfriar el agua y enviarla hacia varias Unidades de Proceso. Un esquema más completo y descriptivo de todo sistema de agua de enfriamiento, excluyendo el detalle del consumo del servicio, se puede observar en la figura N° 18.

El agua caliente, con un máximo de temperatura igual a 120° F, es recibida en los límites de la Unidad 47 a través del cabezal de agua de enfriamiento de retorno, (identificado por la línea gruesa de color rojo en la figura N° 18), y luego es enviado hacia la torre de enfriamiento, en donde se distribuye entre las celdas que estén en operación (por lo general, 5), ahí se pone en contacto con el aire que asciende al ser succionado por los ventiladores, logrando un descenso en la temperatura del agua hasta llegar a 90° F. Luego, pasa a una piscina de recolección en donde se le inyectan los químicos necesarios para mantener su calidad y el agua de reposición de ser necesario. El agua de reposición se agrega para compensar las pérdidas de fluido en el proceso.

Posteriormente, el agua se envía a la succión de las bombas, que impulsan el agua hacia el cabezal de distribución (línea gruesa de color azul en el diagrama de la figura N° 18). Aún en la Unidad 47, de ese cabezal de distribución salen tres ramificaciones, la primera es la correspondiente al flujo que va a los filtros multimedio de corriente lateral, en donde se retiran del agua los sólidos suspendidos presentes en el agua; la segunda es la corriente que se consume internamente en la Unidad y la última es la que se desecha de ser necesario, conocida como purga.

El resto del agua de enfriamiento es conducida hacia las diferentes Unidades consumidoras a través de diversos ramales que salen desde el cabezal de distribución. Luego que el agua de enfriamiento ha realizado su cometido de disminuir la temperatura a diferentes corrientes de proceso, en los intercambiadores de calor de cada Unidad usuaria, es enviada mediante tuberías, hacia el cabezal de retorno, con flujo hacia la Unidad 47 para ser enfriada nuevamente y comenzar de nuevo el ciclo.

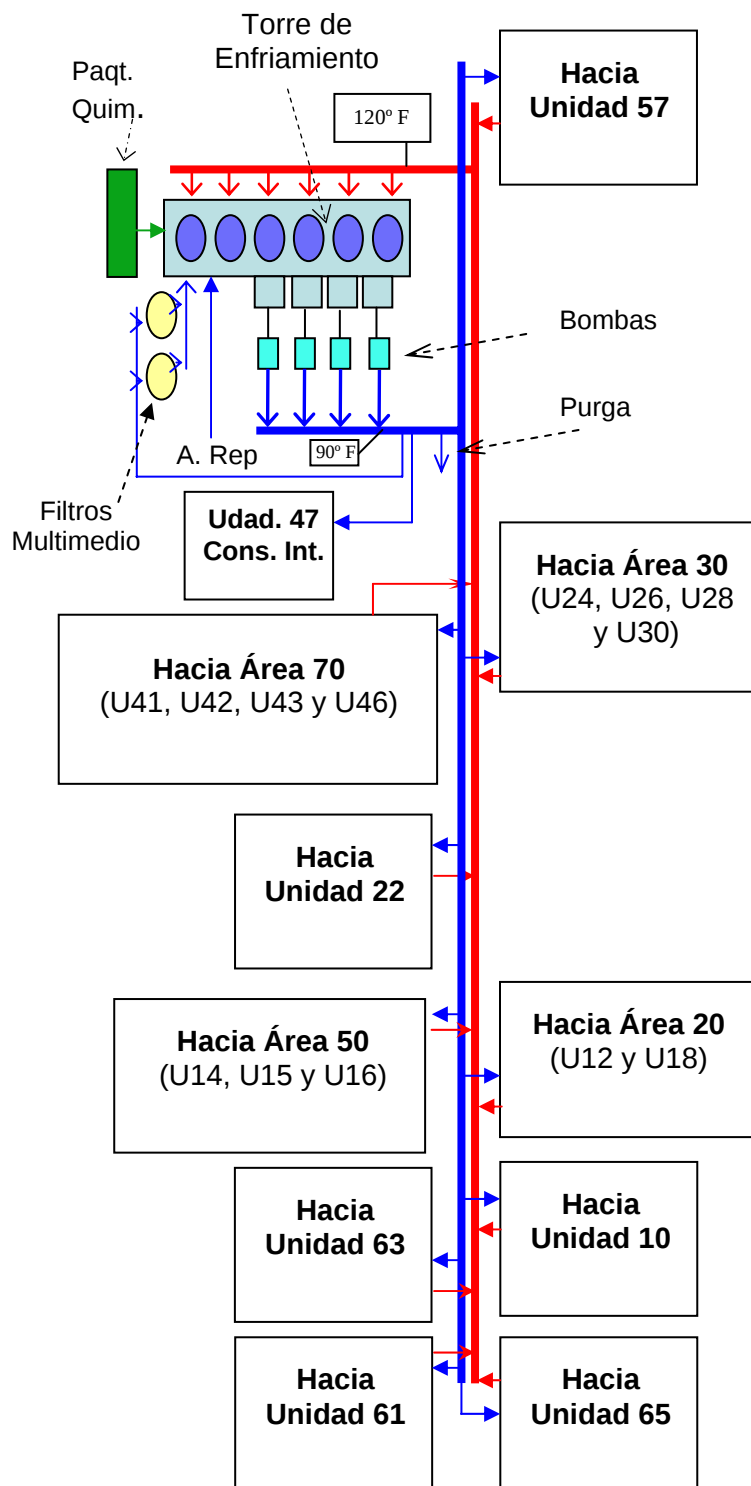


Figura N° 18. Esquema detallado del sistema de agua de enfriamiento

Así mismo, para poder realizar lo que sería el Caso base, se determinó el consumo requerido por cada Unidad de acuerdo a las condiciones de diseño, resultado que se muestra en la tabla N° 9.

Tabla N° 9. Consumos Típicos de Agua de Enfriamiento

No. Unidad	Unidad	Agua de Enfriamiento (gpm)	
		Normal	Máximo
10	Unidad de Crudo	19620	19620
12	Coque	8663	9089
14	Hidrotratadora de Aceite Liviano	4614	4614
15	Soporte de Hidroprocesamiento	12618	12618
16	Hidrocraqueador de Gasóleo	3454	3454
18	Planta de Gas	5272	5272
22	Unidad de Producción de Hidrógeno	2811	2811
24	Unidad de Regeneración de Aminas	1584	1584
26	Despojador de Agua Agria	32	32
28	Unidad de Recuperación de Azufre	227	227
30	Unidad de Tratamiento de Gas de Cola	2357	2357
41	Generación de Vapor	7	162
42	Sistema de Osmosis Inversa	20	20
43	Agua de Alimentación a Calderas (BFW) y Recuperación de Condensado	1783	1783
46	Sistema de Aire de Planta/Instrumentos	1216	1216
57	Sistema de Alivio	370	370
61	Sistema de Patio de Tanques	10	15
63	Sistema de Aceite de Desecho	400	400
65	Tratamiento de Aguas Residuales	2000	2000
47	Consumo Interno	60	60
	Filtro de Agua de	2250	2250
	Purga	480	700
	Total Consumo/(Producción)	69848	70654
	Diseño	-	75000

Fuente: Manual de Operaciones del Mejorador de Crudo Hamaca, Unidad 47.

4.1.2.- Descripción del sistema de generación y distribución de vapor.

El sistema de generación y distribución de vapor es una organización muy compleja, compuesta de varias Unidades con diversos roles. Este sistema no cumple el mismo patrón del sistema de agua de enfriamiento, en donde una Unidad generaba el servicio y lo enviaba hacia los usuarios, éste tiene varias Unidades que generan alguno o varios de los niveles de vapor necesario (son tres niveles diferentes), pudiendo además ser consumidoras, es decir, existen tres cabezales con varias entradas y varias salidas.

Un esquema representativo del sistema de generación y distribución de vapor se puede apreciar en la figura N° 19, donde aparecen todas las unidades que consumen y producen vapor, y los cabezales de vapor de alta, de media y de baja presión.

La Unidad principal es la de “generación y distribución de vapor” o Unidad 41, que cumple las funciones de administrador del servicio en sus tres niveles de presión. Ésta se encarga de controlar la presión requerida en los tres cabezales bien sea extrayendo vapor sobrante o introduciendo vapor en déficit.

El vapor de alta presión se produce principalmente en la Unidad 22, más del 90% de lo requerido, de manera que la Unidad 41 aporta el resto, gracias a dos calderas generadoras de vapor de alta presión.

Con el cabezal de vapor de alta presión recibiendo continuamente lo que se está generando, el servicio se entrega a los consumidores (Unidades 22,10, 43, 46, 47 y Áreas 20, 30 y 50), no obstante, existe una cierta cantidad de este servicio que está sobrando, que tiende a aumentar la presión en el cabezal, por lo que nuevamente la Unidad 41 vuelve a entrar en acción, recibiendo la cantidad sobrante en la estación de

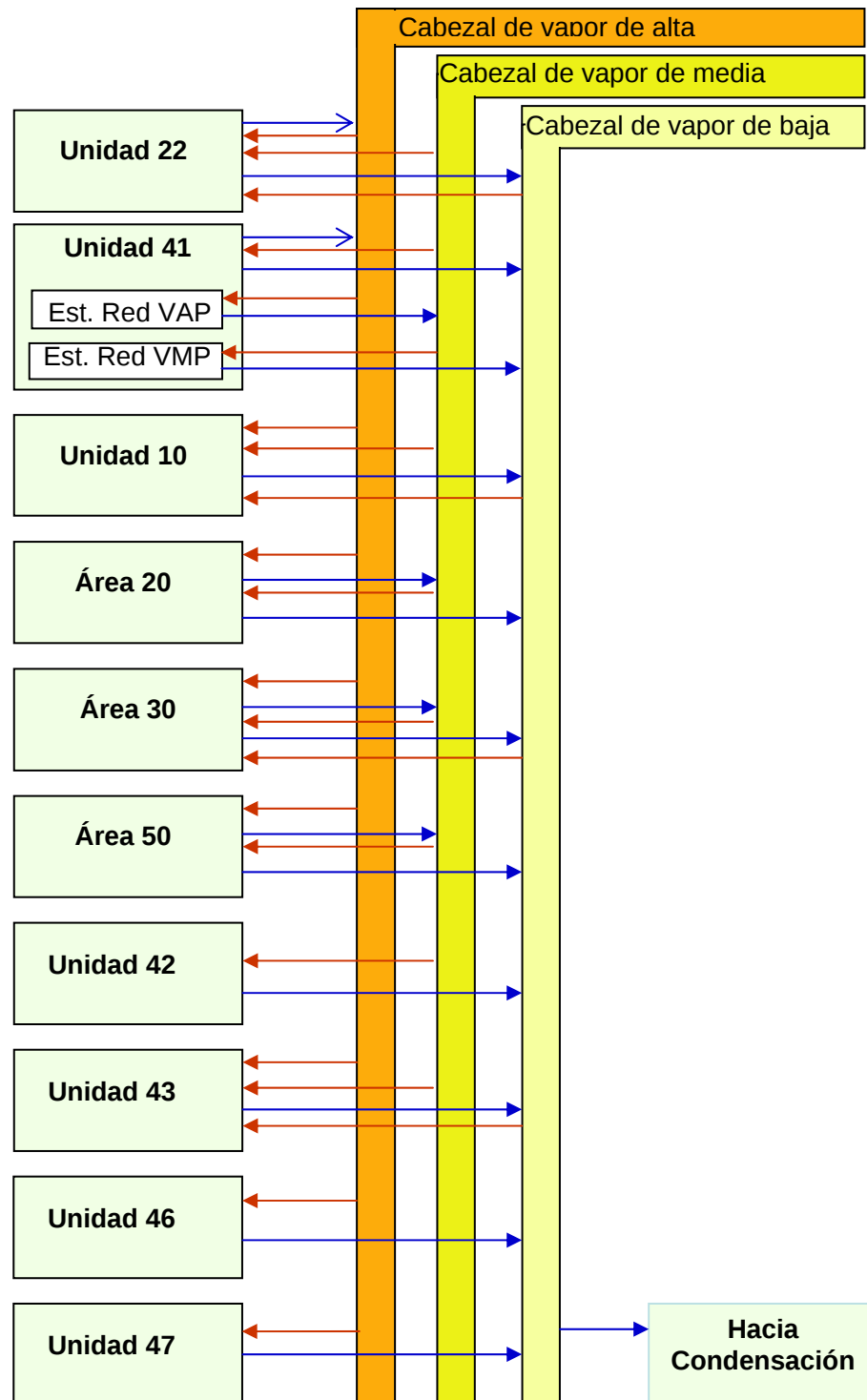


Figura N° 19. Esquema del sistema de generación y distribución de vapor en sus tres niveles de presión

reducción de vapor de alta, logrando mantener el nivel de presión requerido. La cantidad de vapor de alta recibida por la estación reductora, es degradada en su nivel de presión hasta convertirlo en vapor de media presión para luego ser enviado directamente al cabezal de media.

Luego están las productoras de vapor de media presión, que son las Áreas 20, 30 y 50, quienes también envían todo el servicio generado al cabezal de media, el cual distribuya el servicio hacia los consumidores (Unidades 22, 41, 10, 42, 43 y Áreas 20, 30 y 50). Ocurre aquí el mismo fenómeno que en el cabezal de alta, razón por la cual el vapor sobrante se envía a otra estación reductora ubicada en la Unidad 41, que mantiene el nivel de presión convirtiendo el vapor de media en vapor de baja presión y enviándolo al cabezal de baja.

El resto de vapor de baja es introducido al cabezal desde Unidades generadoras (22, 41, 10, 42, 43, 46 47 y las Áreas 20, 30 y 50), para desde ahí ser distribuido a las Unidades 10 y 43 y hacia el Área 30, consumidoras de este servicio. El vapor de baja presión en exceso se envía a condensación para recuperar agua a ser reutilizada en Unidades como la 12, la 15 e incluso en la 41 para generar vapor en las calderas, lo que cerraría un proceso cíclico para una parte de la masa manejada.

Tal y como se puede apreciar en la figura N° 19, como en la narrativa asociada, la Unidad 41 aparece como consumidor de vapor de media y productor de vapor de baja, esto se debe a que en esta Unidad existe una turbina que utiliza el vapor de media presión, toma energía de éste y lo degrada a vapor de baja, cantidad de vapor que no tiene nada que ver con lo que se envía a la estación reductora de vapor de media de la misma Unidad, ya que es una cantidad independiente.

Los tres niveles de vapor tienen características específicas fijadas por Petrolera Ameriven, tal y como se muestra a continuación en la tabla N° 10.

Tabla N° 10. Características de los distintos niveles de presión para el vapor de servicio en el Mejorador de Petrolera Ameriven.

Servicio	Rango de Presión (psig)	Temperatura (°F)	Estado
Vapor de Alta Presión	575<p<600	730	Sobrecalentado
Vapor de Media Presión	140<p<160	371	Saturado
Vapor de Baja Presión	50<p<70	308	Saturado

Fuente: Manual de Operaciones del Mejorador de Crudo Hamaca, Unidad 41.

4.1.3.- Descripción del sistema de generación y distribución de gas combustible

En el sistema de generación y distribución de gas combustible, interactúan varias Unidades con el fin de producir el servicio en varias etapas. Se pudiese decir que primero está la producción y recepción de los componentes para formar el gas combustible que va a distribución, y luego está la generación en sí y la distribución del mismo.

En un comienzo, las Unidades 15 (en el Área 50) y 18 (en el Área 20), producen cierto tipo de gases que al mezclarse conforman lo que se conoce como gas de refinería, el cual es enviado a la Unidad principal de este sistema, que es la 45 o Unidad de Generación y Distribución de Gas Combustible.

La Unidad 45 recibe el gas natural de alta presión (a través de una tubería de alta presión que sale de los límites del Mejorador, proveniente de otra de las empresas del complejo Jose), para reducir su presión desde 290 psig hasta 90 psig. Las trazas de líquido en la corriente gaseosa son eliminadas en el tambor 45-V-001, del cual sale un gas natural sin impurezas líquidas y de baja presión.

El gas natural de baja presión se divide en dos corrientes, una que va al cabezal de gas natural de baja presión para ser distribuido a todo el Mejorador para el uso como

gas piloto, como gas inerte o de manta, y una cierta porción es utilizada en el Área 30. La otra corriente de gas natural es reducida en su nivel de presión hasta 70 psig y conducida al tambor de mezclado de gas combustible 45-V-002, en donde se mezcla con el gas de refinería proveniente desde las Unidades 15 y 18, para producir el gas combustible que consumen los calentadores a fuego en toda la planta.

A continuación se presenta un diagrama de bloque de la unidad que ayuda a explicar el funcionamiento de la misma, operación que fue enunciada en los párrafos anteriores.

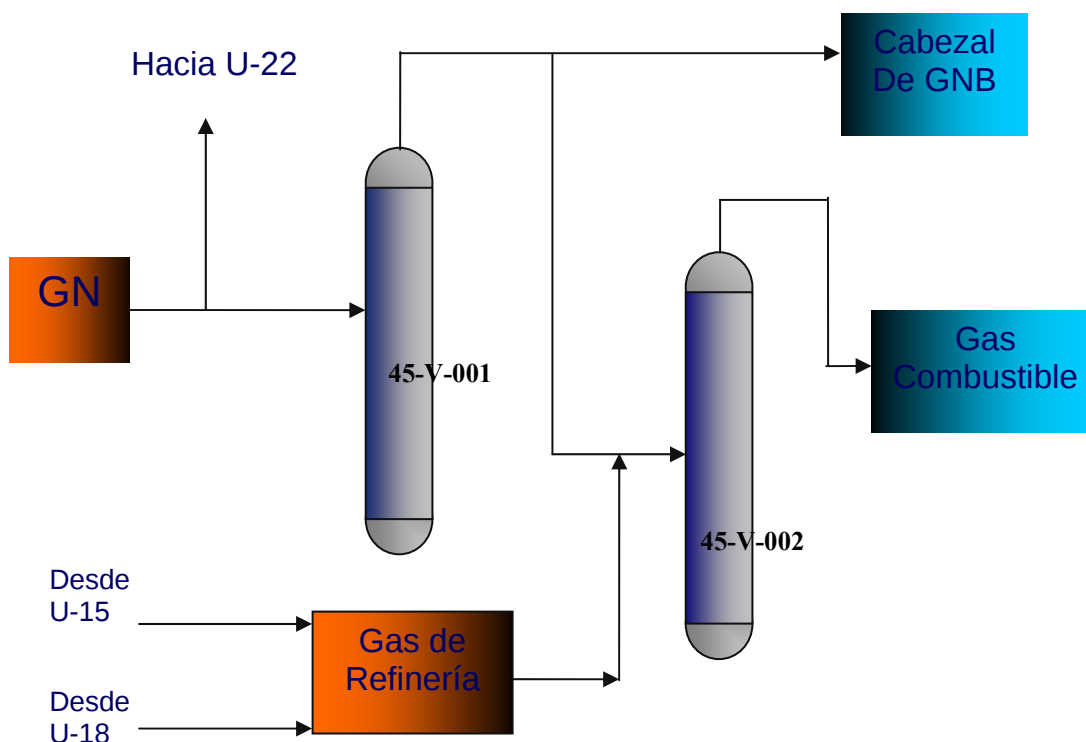


Figura N° 20. Diagrama de bloque simplificado de la Unidad 45

De lo anteriormente expuesto se deriva que se debe estandarizar de alguna forma los flujos, es decir, la herramienta debe hacer un balance de masa en un escenario determinado, para proyectar el consumo de gas combustible, la generación de gas de refinería o la compra de gas natural, pero no se puede hacer un balance de elementos diferentes.

Por esta razón se decidió trabajar con cantidades equivalentes de gas natural, ya que es el componente que se está comprando y por lo tanto, el que importa a la hora de hacer el balance de masa.

4.2.- Resultados de la herramienta de evaluación hidráulica

En esta sección se exhiben los resultados obtenidos con relación a la herramienta del sistema de agua de enfriamiento, dividiendo los mismos en las tres etapas de trabajo, que son la elaboración en sí de la herramienta, su validación y el uso de la misma a través de ciertos escenarios.

4.2.1.- Concepción de la herramienta

Primeramente se obtuvo un diagrama de flujo para la simulación, el cual mostraba las salidas y las llegadas desde el límite de batería de todas las Unidades o Áreas involucradas, lo cual se puede ver en la figura N° 21.

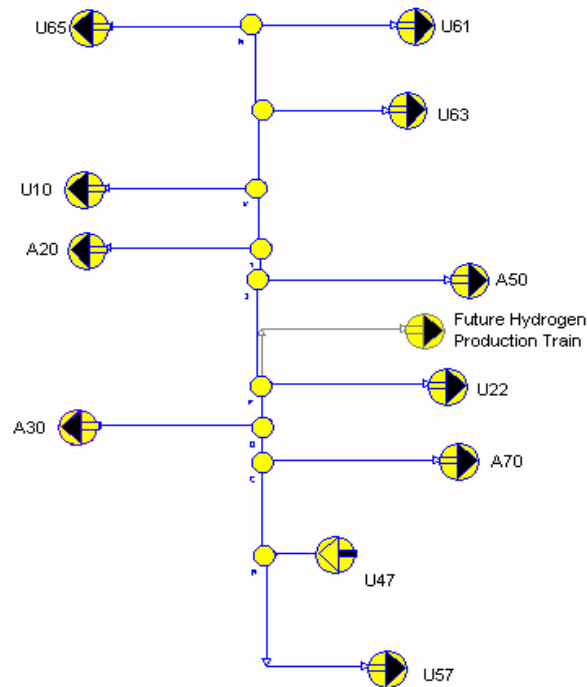


Figura N° 21. Primer diagrama de flujo del sistema, en ambiente INPLANT.

Sin embargo, debido a las discrepancias encontradas con respecto a la presión en el límite de batería de la Unidad 47, tal y como se explicó en la metodología se decidió cambiar el plan original, trabajando entonces con cuatro salidas o “sources”, de las cuales tres estarían activas. Con este cambio se podría tener información certera con respecto a la presión, pues en cada una de las descargas de las bombas se encuentra un manómetro, que, en cada caso, muestra una presión que armoniza con lo encontrado en el manual de operación.

Finalmente, se concluyó el diagrama quedando tal y como se muestra en la figura N° 22, habiendo solucionado eficazmente el problema, con un total de 14 consumidores y 4 proveedores, según se presenta en la tabla N° 11.

Tabla N° 11. Lenguaje INPLANT vs. Proceso. (Detalle de Sinks y Sources)

<i>INPLANT</i>	<i>REALIDAD</i>
PA, PB, PC y PD	Bombas A, B, C y D respectivamente
PURG	Purga de agua
CONS	Consumo Interno en la Unidad 47
FILT	Filtros Multimedia
U57	Unidad 47
A70	Área 70
A30	Área 30
U22	Unidad 22
FUTH	Unidad Futura (posible nuevo tren de hidrógeno)
A50	Área 50
A20	Área 20
U10	Unidad 10
U63	Unidad 63
U61	Unidad 61
U65	Unidad 65

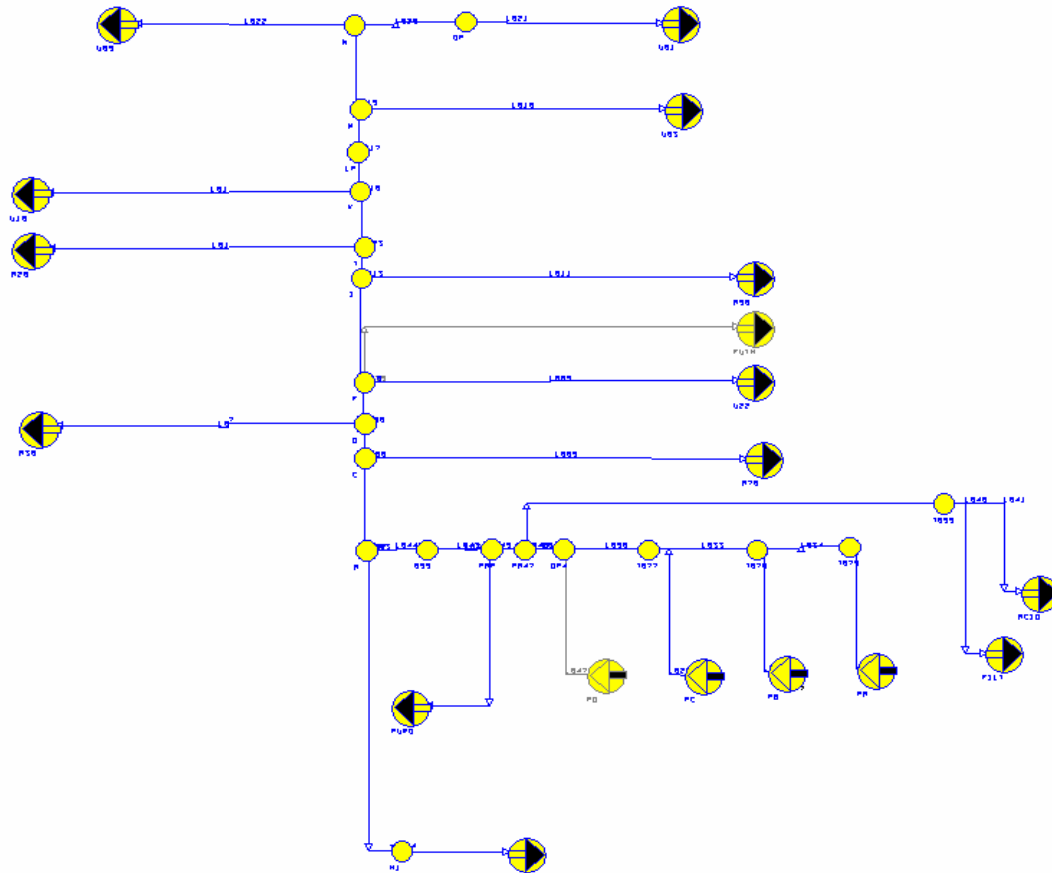


Figura N° 22. Diagrama de flujo del sistema (definitivo), en ambiente INPLANT.

De esta forma quedaba constituida la herramienta hidráulica, lista para albergar diversos cambios que constituyesen en sí casos particulares de evaluación.

4.2.2.- Validación de la herramienta

A continuación se presentan los resultados que desembocaron en la validación de la herramienta para el sistema de distribución de agua de enfriamiento.

- ❖ **Simulación del Caso Base:** Introduciendo los datos para el caso dado por diseño, se obtuvieron las presiones y flujos expuestos en la tabla N° 12.

Tabla N° 12. Presiones y flujos de simulación del Caso Base.

	Flujo (gpm)	Presión (Psig)
Bomba A	23284	77,7
Bomba B	23681	77,7
Bomba C	24131	77,7
Límite de batería (U47)	67063	68,4
Unidad 57	370,01	64,6
Área 70	3026	62,4
Área 30	4200	62,4
Unidad 22	2811	64,3
Área 50	20686	63,1
Área 20	13935	57,0
Unidad 10	19620	59,1
Unidad 63	400	66,9
Unidad 61	15	75,7
Unidad 65	2000	76,7

Lo primero que salta a la vista es la presión registrada en el límite de batería de la Unidad 47, pues presenta una caída de presión de prácticamente 10 psi, lo cual resulta bastante grande. Este valor no era el esperado por los ingenieros de planta, pues pensaban que el agua de enfriamiento partía desde la Unidad 47 con mayor presión. Sin embargo, esta gran pérdida resulta razonable, pues no se debe en su mayoría al efecto fricción, si no a la columna hidráulica que debe superarse para llegar desde las bombas al límite de batería, recordando que el cabezal es aéreo. De igual forma se observan grandes caídas de presión para la Unidad 10 y el Área 20, lo cual sucede debido a dos factores conjugados, el primero es el gran flujo que manejan y el otro es la misma razón antes explicada, ya que los límites de batería de éstas están ubicados en un nivel más alto que el mismo cabezal de distribución de agua de enfriamiento.

También se observa un fenómeno que destaca del resto de las llegadas, y es el caso presentado en las Unidades 61 y 65, en donde se aprecia una presión mayor al resto de las Unidades e incluso mayor a la del límite de batería de la Unidad 47. Nuevamente la variable cambio de altura vuelve a influir, sólo que en este caso de forma contraria, pues el límite de batería de la Unidad 61 se encuentra por debajo de las bombas, lo cual hace que el fluido gane presión al descender.

- ❖ **Perfil de presiones:** A continuación se presentan, en la tabla N° 13, los valores obtenidos en el levantamiento del perfil de presiones en el sistema de distribución de agua de enfriamiento del Mejorador, hecho acaecido el día primero de febrero de 2005, en el tiempo comprendido entre las 10:10 a.m. y las 4:40 p.m.

Tabla N° 13. Presiones reales del sistema de distribución de agua de enfriamiento

	Presión (psig) ± 0.1
Bomba A	78,0*
Bomba B	78,0*
Bomba C	78,0*
Límite de batería (Unidad 47)	68,0
Unidad 57	64,0
Área 70	56,0
Área 30	61,0
Unidad 22	62,0
Área 50	61,0
Área 20	55,0
Unidad 10	60,0
Unidad 63	63,0
Unidad 61	70,0
Unidad 65	62,0

Principalmente se ve que los valores de presión en las descargas de las bombas, es constante e igual para cada una de éstas, lo cual se debe a que en realidad ese día no se instaló el manómetro portátil en estos lugares, y se

utilizó a manera de referencia la presión reportada por unos manómetros fijos, cuya lectura oscilaba entre 77 y 80 psig. En cuanto al resto de las presiones reportadas se puede apreciar que el comportamiento es similar al mostrado en la simulación y por lo tanto, se explica por las mismas razones que en los casos anteriores.

También se puede ver, que la presión en el límite de batería es de 68 psig, y no de 75 psig (más de 10% por encima), como mostraba un medidor (47-FI-006) con conexión al sistema de control, lo que constituyó una de las principales causas de la disyuntiva en cuanto al valor a fijar en el puerto de salida del plan original a simular. Este valor además se correspondía con la fuerte caída de presión registrada en la simulación, demostrando que ciertamente la caída de presión si está próxima a los 10 psi.

De esta manera se puede deducir que el sistema real está funcionando sin mayores problemas hidráulicos y que se corresponde con lo esperado.

- ❖ **Comparación:** A continuación se presenta la tabla comparativa resultante, entre los valores arrojados por la simulación y aquellos tomados en el perfil de presiones, cabe recordar que tal y como se mencionó en la metodología, el criterio para hacer válida la herramienta y llegar a los resultados definitivos, fue un porcentaje de desviación inferior al 5% en todos los casos.

En la tabla N° 14, se muestran las presiones de ambos casos (simulación y realidad) y así mismo el porcentaje de desviación, porcentaje que fue calculado como error relativo, tomando como valor de referencia la presión real (perfil de presiones) en cada caso.

Tal y como se puede apreciar en dicha tabla, los resultados no fueron del todo satisfactorios; a pesar que la mayoría de las desviaciones presentadas están por debajo del 5%, existen valores que no permiten la validación. En cierta forma esto se esperaba, para desviaciones menores como las de las Unidades

63 o 61, pero la diferencia entre los valores reales y los simulados, para el Área 70 y para la Unidad 65 es mucho mayor a lo estipulado como límite.

Tabla N° 14. Presiones reales vs. Presiones de simulación (tabla preliminar)

	Presión de Simulación (psig)	Presión Real (psig) ± 0.1	Desviación (%)
Bomba A	77,7	78,0	<1
Bomba B	77,7	78,0	<1
Bomba C	77,7	78,0	<1
Límite de batería (U47)	68,4	68,0	<1
Unidad 57	64,6	64,0	<1
Área 70	62,4	56,0	11
Área 30	62,4	61,0	2
Unidad 22	64,3	62,0	4
Área 50	63,1	61,0	4
Área 20	57,0	55,0	4
Unidad 10	59,1	60,0	2
Unidad 63	66,9	63,0	6
Unidad 61	75,7	70,0	8
Unidad 65	76,7	62,0	24

En busca de mejorar este resultado, se empezó una búsqueda de los posibles errores cometidos. Se inició con el Área 70, examinando en todos los manuales de operación involucrados, en la hoja de especificación de la válvula correspondiente, así como en otros documentos dados por el Grupo Alvica (en donde se pudo notar una disyuntiva en cuanto al flujo que circulaba por esa tubería). Se decidió hacer una medida del flujo real a ver que tan desviado estaba del caso expuesto en el diseño y efectivamente, allí se encontraba la falla, pues se hizo el levantamiento del perfil con un exceso de más de 500 gpm al Área 70.

Puesto que el perfil estaba levantado, lo que se hizo fue cambiar el Caso Base en la herramienta, aumentando el flujo que entraba al Área 70, colocando aproximadamente el flujo real y no el dado por diseño.

Para solucionar las otras fallas, se trató de hacer lo mismo, buscando el flujo real a cada una de ellas, para posteriormente realizar el cambio en la herramienta, sin embargo, esto no fue posible debido a que para estas unidades no existen medidores de flujo, por lo que resulta imposible saber qué cantidad de agua de enfriamiento consumen en un momento dado. En ese instante se empezó la búsqueda de argumentos que soportaran el posible exceso, con respecto al diseño, en el consumo del servicio en estas unidades.

Se buscó detalladamente en los consumos de cada equipo, de donde se encontró que sí existía capacidad de recibir mayor cantidad de agua, sobre todo en la Unidad 65. De igual manera se evaluó el caudal dado por diseño tomando en cuenta la velocidad recomendada de un líquido que fluye por una tubería, en donde se pudo evidenciar que dadas las dimensiones de las tuberías, los caudales correspondientes eran muy pequeños, dando velocidades inferiores a la mínima (4 pie/s) [Crane, 1989]. De esta forma se procedió a aumentar el flujo tanto hacia la Unidad 61 como a la 65, tomando como limitante la máxima cantidad de líquido que podían recibir los equipos en cada una de estas unidades.

Para la Unidad 61 se aumentó al caudal en un 100%, mientras que para la Unidad 65, lo que se hizo fue dejar la variable libre para que la herramienta calculara el valor cerrando el balance de masa, valor que sería mayor pues el flujo desde las bombas también habría de aumentar. Este último tópico parecía ser de vital importancia, ya que anteriormente se dejaba libre el flujo hacia la purga, obteniéndose una gran cantidad, ilógica, que para nada se correspondía con el proceso real.

Una vez realizados los cambios mencionados anteriormente, se procedió a simularlo de nuevo obteniendo los valores mostrados en la tabla N° 15, que se presenta a continuación.

Tabla N° 15. Presiones y flujos de simulación de Caso Base (adaptación).

	Flujo (GPM)	Presión (Psig)
Bomba A	23696	77,2
Bomba B	23881	77,2
Bomba C	24513	77,2
Límite de batería (U47)	69300	68,0
Unidad 57	370	64,2
Área 70	3600	58,6
Área 30	4200	62,1
Unidad 22	2811	63,8
Área 50	20686	62,7
Área 20	13935	56,5
Unidad 10	19620	61,9
Unidad 63	400	65,5
Unidad 61	30	73,5
Unidad 65	3648	61,8

En la tabla se puede notar como el flujo aumentó tal y como se tenía previsto, así como también se puede ver una disminución en la presión de descarga de las bombas, descuento hecho directamente introduciendo el valor de 77,2 psig, buscando mantener la presión en el límite de batería lo más cercana a 68 psig.

Además se puede apreciar que el comportamiento en general se mantiene, pero se logra el objetivo buscado, que era disminuir considerablemente la presión en las unidades que anteriormente presentaron desviaciones mayores al máximo establecido para el proceso de comparación.

Se tomaron los resultados de la nueva simulación y se volvieron a comparar con los valores reales obtenidos en el perfil de presiones, obteniendo la tabla N° 16.

Tabla N° 16. Segunda comparación de presiones. Simulación vs. Realidad

	Presión de Simulación (psig)	Presión Real (psig) ± 0.1	Desviación (%)
Bomba A	77,2	78,0	1
Bomba B	77,2	78,0	1
Bomba C	77,2	78,0	1
Límite de batería (U47)	68,0	68,0	<1
Unidad 57	64,2	64,0	<1
Área 70	58,6	56,0	5
Área 30	62,1	61,0	2
Unidad 22	63,8	62,0	3
Área 50	62,7	61,0	3
Área 20	56,5	55,0	3
Unidad 10	61,9	60,0	3
Unidad 63	65,5	63,0	4
Unidad 61	73,5	70,0	5
Unidad 65	61,8	62,0	<1

Como se observa, todos los porcentajes de desviación son menores al 5%, salvo los encontrados en la Unidad 61 y en el Área 70 (iguales al 5%), lo cual es un indicio de que se pudiese deber por una pequeña obstrucción, sin embargo, este estudio deberá ser realizado posteriormente.

Una de las cosas peculiares que se puede apreciar mediante la comparación, es que en la mayoría de las llegadas (luego del límite de batería de la Unidad 47), la presión dada por la simulación es mayor a la del caso real. Esto se debió a que por más que se intentó, no se lograron conseguir las condiciones de flujo dado por diseño, trabajándose con un flujo mayor al esperado, y por ende, al simulado.

Las bombas, en conjunto, están enviando un exceso de agua de enfriamiento de aproximadamente unos 1000 gpm, según lo revelado en mediciones de caudal en las descargas de las bombas. Este flujo más grande provoca una mayor caída de presión a lo largo de las tuberías por las que fluye, lo cual se puede apreciar en la caída de presión entre las bombas y el límite de batería,

que para el caso real fue de 10 psi, mientras que para el caso simulado fue de 9,2 psi, o en el resto de las unidades de llegada, o áreas, en donde la caída de presión real es mayor a la simulada.

Sólo existen ciertos puntos en que la presión de simulación es menor a la real, como lo son en las presiones de descarga de cada bomba, pues la idea fue igualar las presiones en el límite de batería; en el propio límite de batería, debido a restricciones del programa (aunque en realidad la diferencia de presión no es considerable), y finalmente en la Unidad 65, que fue la Unidad que se dejó libre para la iteración y por lo tanto es la que está recibiendo toda la cantidad restante de las otras unidades.

Después de haber hecho el análisis se puede decir, que la herramienta está validada, pues aún en un caso desfavorable se lograron obtener desviaciones dentro del rango permitido para tal fin. De igual forma se expresa que debe hacerse un nuevo estudio que incluya en un mismo día, el levantamiento del perfil de presiones así como el de flujos, y a partir de éstos fijar un nuevo escenario sobre la misma simulación de esta herramienta, pues de seguro así se obtendrán mejores y más confiables resultados.

4.2.3.- Manejo de escenarios

A continuación se presentan los resultados obtenidos para los diferentes escenarios planteados, en pro de visualizar cambios en la planta, es decir, ver si son posibles o no y cómo actuar ante éstos. Cada uno de los escenarios se comparará con la simulación del Caso Base, para así tener un patrón y facilitar la visualización y el análisis.

- ❖ **A: Dos bombas en operación:** Para este caso, tal y como se mencionó en la metodología, se supone una falla en el sistema de vapor, de manera que sólo hay vapor disponible para impulsar completamente, la turbina de una de las

bombas. De suceder esto se activaría inmediatamente la cuarta bomba, que es de motor eléctrico y está en espera para estos casos, quedando el sistema hidráulico con el caudal dado por las dos bombas trabajando al máximo.

Los resultados se muestran en la tabla N° 17, exponiendo tanto la presión como el flujo. Tal y como se puede apreciar, existe primeramente una reducción en la presión de descarga de las bombas, debido al tipo de bombas (centrífugas) y las curvas asociadas a éstas, en donde al trabajar con mayor flujo (25000 gpm aproximadamente), se reduce el cabezal y en consecuencia la presión se reduce.

Tabla N° 17. Resultados para el caso en que operan dos bombas.

	Presión Caso Base(psig)	Flujo Caso Base(gpm)	Presión Escenario(psig)	Flujo Escenario(gpm)
Bomba A	77,2	23696	75,0	24850
Bomba B	77,2	23881	75,0	25175
Bomba C	77,2	24513		
Límite de batería (Unidad 47)	68,0	69300	65,6	48016
Unidad 57	64,2	370	63,6	266
Área 70	58,6	3600	60,0	2176
Área 30	62,1	4200	61,0	3024
Unidad 22	63,8	2811	63,3	2024
Área 50	62,7	20686	62,5	14894
Área 20	56,5	13935	57,0	9560
Unidad 10	61,9	19620	62,1	14126
Unidad 63	65,5	400	66,5	288
Unidad 61	73,5	30	75,1	7
Unidad 65	61,8	3648	72,0	1651

De igual forma, se observa que las presiones en las llegadas no sólo se mantienen en un valor aproximado al Caso Base, en algunos casos aumenta, y esto se debe a la reducción en el caudal de agua de enfriamiento, que al mismo tiempo provoca una disminución notable en las pérdidas de presión por fricción, hecho que compensa la baja presión de descarga en las bombas y por ende la baja presión en el límite de batería de la Unidad 47.

De este análisis se deriva que de suceder esta emergencia de trabajar sólo con dos bombas, la limitante no es la presión, pues los niveles que se alcanzarían serían buenos y en algunos casos hasta provechosos, es decir, que efectivamente el sistema puede operar de esta forma y ser eficiente en cuanto a su hidráulica. Sin embargo, lo que sí pudiese ser un inconveniente mayor, es la cantidad de flujo que debe llegar a los distintos consumidores del servicio, ya que para este caso sólo es posible entregar, aproximadamente, un 72% del flujo necesario, lo cual afectaría el desempeño de los equipos de transferencia de calor.

Por esta razón, se debe hacer un estudio más profundo sobre los flujos mínimos que deben circular hacia las áreas o unidades usuarias, desde el punto de vista hidráulico, así como desde el punto de vista de la transferencia de calor, para así complementar este trabajo y para determinar, realmente, como actuar ante una situación como la planteada en este escenario.

- ❖ **B: Aumento de la rugosidad de la tubería:** Este escenario es muy posible que suceda, pues por efectos de incrustación, deposición y otros fenómenos que ocurren con el pasar del tiempo, las tuberías se ven afectadas con el aumento de rugosidad, irremediablemente, es decir, al agua de enfriamiento se le inyectan químicos y se purga cierta cantidad de agua, sin embargo, estos mecanismos disminuyen estos fenómenos, mas no los eliminan.

Específicamente se fijó un aumento del 100% en la rugosidad utilizada (de 0,0018 pulgadas a 0,0036 pulgadas) y se realizó la corrida en el programa, en donde se obtuvieron los resultados expuestos en la tabla N° 18.

En la tabla se puede apreciar en primera instancia, que a pesar que se dejó el mismo valor de flujo para la bomba A, los flujos de las otras bombas aumentan. Esto se debe al aumento de la rugosidad, pues esto implica una mayor caída de presión en el fluido que parte desde la bomba A, de manera

que para igualar las presiones, más bajas, en los puntos de confluencia, se aumenta el caudal.

Tabla N° 18. Resultados para una rugosidad del doble de la original

	Presión Caso Base(psig)	Flujo Caso Base(gpm)	Presión Escenario(psig)	Flujo Escenario(gpm)
Bomba A	77,2	23696	77,2	23696
Bomba B	77,2	23881	77,2	23888
Bomba C	77,2	24513	77,2	24554
Límite de batería (U47)	68,0	69300	67,9	69347
Unidad 57	64,2	370	64,0	370
Área 70	58,6	3600	58,2	3600
Área 30	62,1	4200	61,9	4200
Unidad 22	63,8	2811	63,6	2811
Área 50	62,7	20686	62,5	20686
Área 20	56,5	13935	56,2	13934
Unidad 10	61,9	19620	615	19620
Unidad 63	65,5	400	65,1	400
Unidad 61	73,5	30	73,0	30
Unidad 65	61,8	3648	60,3	3695

Además se puede ver como el nivel de presión no se ve afectado considerablemente en las llegadas; en todas se presentan disminuciones menores al 1%, a excepción de la presión en la Unidad 65, la cual disminuye en más de un 2%. Con respecto a esta excepción hay dos efectos que se deben tomar en cuenta: uno es el aumento de flujo que a su vez provoca una mayor caída de presión, se debe recordar que esta Unidad es la que toma el programa como variable libre para el cálculo, de manera que al aumentar el flujo en las bombas B y C, y dejar los demás consumos iguales, se aumenta directamente el flujo en esta última Unidad. El otro efecto a tomar en cuenta es que el flujo a esta Unidad es el más sensible a la pérdida de presión por fricción.

- ❖ **C: Incorporación de una nueva Unidad:** Una de las posibilidades de ampliación del Mejorador, se enfoca en la adición de una nueva Unidad de

producción de hidrógeno, razón por la cual se decidió simular este escenario obteniendo los resultados que se exponen en la tabla N° 19.

Tabla N° 19. Resultados para el caso de la incorporación de una Unidad nueva

	Presión Caso Base(psig)	Flujo Caso Base(gpm)	Presión Escenario (psig)	Flujo Escenario(gpm)
Bomba A	77,2	23696	75,0	24665
Bomba B	77,2	23881	75,0	24840
Bomba C	77,2	24513	75,0	25497
Límite de batería (Unidad 47)	68,0	69300	65,7	72212
Unidad 57	64,2	370	61,8	370
Área 70	58,6	3600	56,2	3600
Área 30	62,1	4200	59,6	4200
Unidad 22	63,8	2811	61,4	2811
Unidad Futura			57,9	2914
Área 50	62,7	20686	60,3	20686
Área 20	56,5	13935	54,1	13935
Unidad 10	61,9	19620	59,4	19620
Unidad 63	65,5	400	63,0	400
Unidad 61	73,5	30	71,0	30
Unidad 65	61,8	3648	59,3	3648

En la tabla N° 19 se puede notar como se aumenta el flujo de descarga de las bombas, para dar un total aproximado de 75000 gpm, que sería el máximo posible si cada una de las bombas opera en su límite superior (25000 gpm). Este aumento del flujo se realizó para ver que cantidad de agua de enfriamiento quedaría disponible y como afectaría al resto de las unidades, para lo cual se fijó la cantidad de agua en todas las llegadas, incluyendo a la Unidad 65, y se dejó libre para el cálculo a la nueva unidad, obteniendo una disponibilidad de 2913,6 gpm, lo cual daría posibilidad a construir y operar

una Unidad tan grande como la Unidad 22, que es la que actualmente produce el hidrógeno de todo el Mejorador, así como la mayoría del vapor de alta presión.

En relación con el aspecto de la presión, se observa un claro descenso en las presiones de llegada de todos los usuarios, debido al aumento de las pérdidas por fricción ocasionado por el mayor caudal que circula por la misma red de tuberías y al descenso en la presión de descarga de las bombas.

Es posible que esta disminución en las presiones de llegada no sea significativa, pues son disminuciones de menos del 4% en el peor de los casos, sin embargo, debe hacerse un estudio más profundo sobre la presión mínima a la cual debe llegar el servicio a cada Unidad o al menos cuales son los equipos más críticos del Mejorador, en términos de presión de llegada.

❖ **D: Aumento del diámetro de tubería en la descarga de las bombas:**

Debido a que para alcanzar el nivel del cabezal de distribución de agua de enfriamiento se ocasiona una gran caída de presión entre la descarga de las bombas y el límite de batería de la Unidad 47, se quiso ver que tanto se podía reducir esa caída, mediante el aumento del diámetro de tuberías, obteniendo los resultados mostrados en la tabla N° 20.

En dicha tabla se muestran tres variables relacionadas, para cuatro diferentes casos. La primera de las variables es el diámetro de las tuberías que van desde la descarga de las bombas hasta el cabezal de distribución, variable independiente en este caso y la cual se cambió respetando los diámetros de tuberías comerciales; la segunda variable es la que se requiere como resultado, correspondiente a la diferencia de presiones entre los puntos antes mencionados; y por último, una variable restrictiva, pues no se debía estar por debajo de la velocidad mínima de flujo en tuberías cerradas.

Tabla N° 20. Caída de presión entre las descargas de las bombas y el límite de batería de la Unidad 47, para cuatro distintos diámetros de tubería

Diámetro, D (Pulgadas)	Caída de presión, ΔP (psi)	Velocidad, v (pie/s)
32	9,2	9,37
36	8,7	7,41
42	8.3	5,44
48	8.2	4,16

El primero de los casos presentados, es el de una tubería de 32 pulgadas, lo cual representa el caso actual y por lo tanto viene siendo el correspondiente a la simulación del Caso Base. Posteriormente se hicieron tres nuevas simulaciones una para 36, otra para 42 y finalmente una para 48 pulgadas. No se realizaron otras simulaciones con diámetros mayores, pues ya se había alcanzado el máximo diámetro comercial, tomando en cuenta que para el flujo manejado y para una velocidad mínima de 4 pie/s, el máximo diámetro calculado fue de 48,97 pulgadas.

Según lo obtenido y mostrado en la tabla N° 20, se puede afirmar que un aumento en el diámetro de tubería de descarga de las bombas, no reduce significativamente la caída de presión y por lo tanto sería una inversión innecesaria, la caída de presión ocasionada por la columna hidráulica a vencer es mucho más importante que la que se da por fricción.

4.3.- Herramienta de proyección de consumos

En esta sección se presentará el producto del trabajo realizado para poder desarrollar la herramienta en su forma final de archivo EXCEL (“Interfaz”), así como la forma final de la herramienta en sí.

4.3.1.- Depuración de datos

Para hacer la depuración de los datos se realizó, por cada Unidad o Área consumidora, una gráfica de todos los servicios y la alimentación (carga) con respecto al tiempo en que se desarrolló. En la figura N° 23 se muestra un ejemplo de dichos gráficos, con la indicación de los días descartados de la investigación.

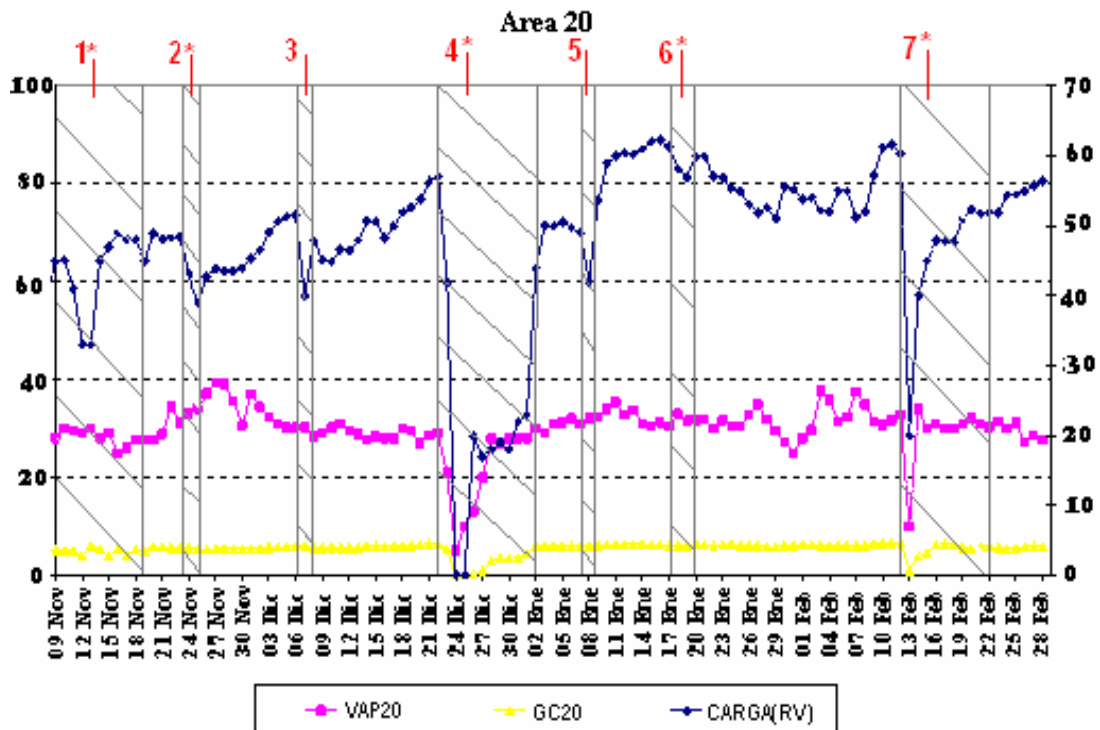


Figura N° 23. Gráfico de tendencias en el Área 20 con períodos eliminados

En la gráfica anterior se puede ver una pequeña leyenda correspondiente al consumo de vapor de alta presión (VAP20), consumo de gas combustible (GC20) y la carga de residuo de vacío (CARGA(RV)), correspondientes al Área 20.

También en la figura N° 23 se pueden observar zonas marcadas con rayas transversales, que son los períodos que fueron excluidos y los números corresponden a cada una de las fallas presentadas a continuación:

1. Proceso de inestabilidad post-arranque.
2. Mala operación debido a caída de la unidad 22 (Producción de Hidrógeno).
3. Problemas con el corte en los tambores de coque.
4. Caída general de la planta debido a un corte de electricidad.
5. Problemas en la Unidad 10, específicamente en la bomba que envía el residuo de vacío desde la torre de destilación al vacío.
6. Fallas en la Unidad 22 y por ende en la producción de vapor.
7. Caída de la planta debido a la paralización de la Unidad 22.

Los números que están acompañados de un asterisco, son los que corresponden a lo que se ha denominado “exclusiones generales”, que son fallas que afectan el desempeño de todas las unidades que conforman la planta, y por lo tanto los días en que ocurrieron, fueron eliminados de todo el estudio. Los que no, son fallas propias del Área 20, y por lo tanto descartadas sólo en ésta.

Lo que se puede apreciar en la figura N° 23, se presenta de forma similar en las gráficas correspondientes a las demás Unidades y Áreas, es decir, se eliminaron muchos días del estudio por operaciones irregulares en la planta, lo cual da una muestra en días que resulta pequeña, y en cierta forma poco representativa de lo que debe ser la operación normal.

El estudio se realizó en el período de tiempo fijado buscando el aprovechamiento de lo nuevo de la planta, que se traduce en funcionamiento óptimo de los equipos, sin embargo, este mismo escenario de novedad indujo operaciones inconsistentes, cambiantes. Es por ello que se recomienda realizar de nuevo este mismo estudio una vez que el Mejorador tenga cierto tiempo de operación estable.

4.3.2.- Obtención de correlaciones

Una vez que se culminó la depuración, se procedió a graficar y correlacionar los diferentes servicios con respecto a la carga de cada una de las unidades.

A continuación se mostrarán las gráficas con las líneas de tendencias que mejor se ajustaban a los datos, así como las ecuaciones que corresponden a dichas líneas. Los resultados se expondrán para todos los servicios pero se separarán por cada una de las unidades consumidoras de los servicios.

Unidad 10. Crudo:

- a) **Consumo de vapor de alta presión:** En ambos diagramas (figuras N° 24 y N° 25), se observa como se grafican por pares de datos (cada punto) el servicio de vapor de alta presión versus la carga a la Unidad. En el eje de las abscisas se presentan los valores correspondientes a la carga, que, para este caso en particular, recibe el nombre de corrida, pues es lo que esta llegando de alimentación al Mejorador, es decir, en base a ella se realiza todo el proceso. En el otro eje (ordenadas), están los valores correspondientes al servicio, denotado como HPS por sus siglas en inglés (High Pressure Steam) Como se puede apreciar en la figura N° 26, al limitar el estudio a los valores mayores a 210 MBD, se obtienen mejores resultados en cuanto a la correlación, logrando un R^2 mayor a 0,9; es decir, que la cantidad de servicio a consumir vendrá dado por la ecuación N° 18

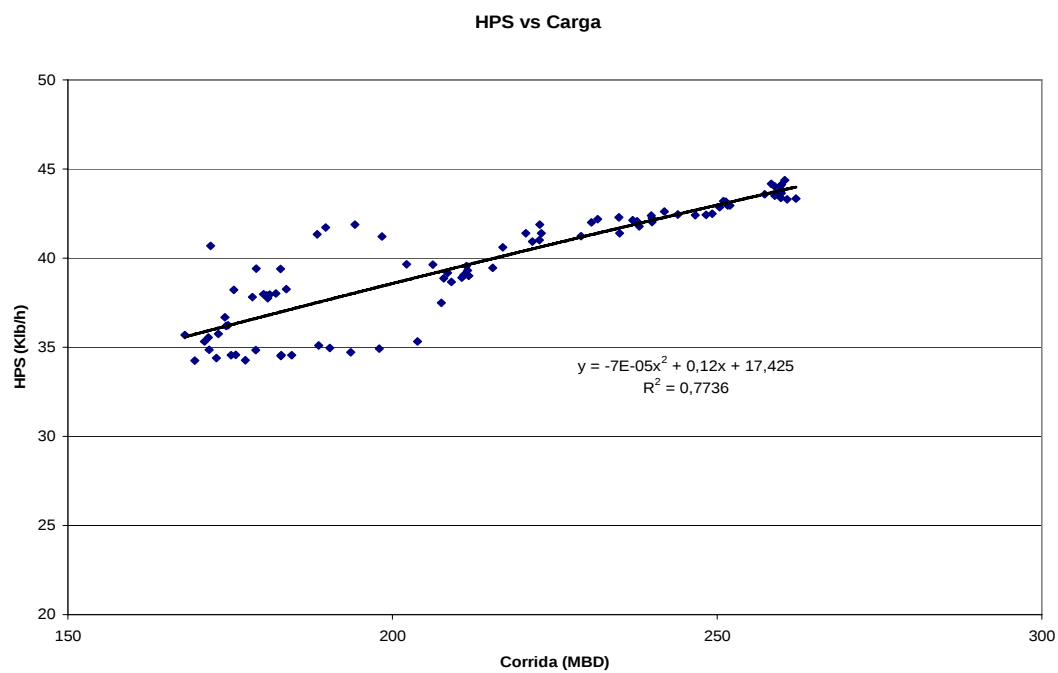


Figura N° 24. Consumo de vapor de alta con respecto a la carga a la Unidad 10.

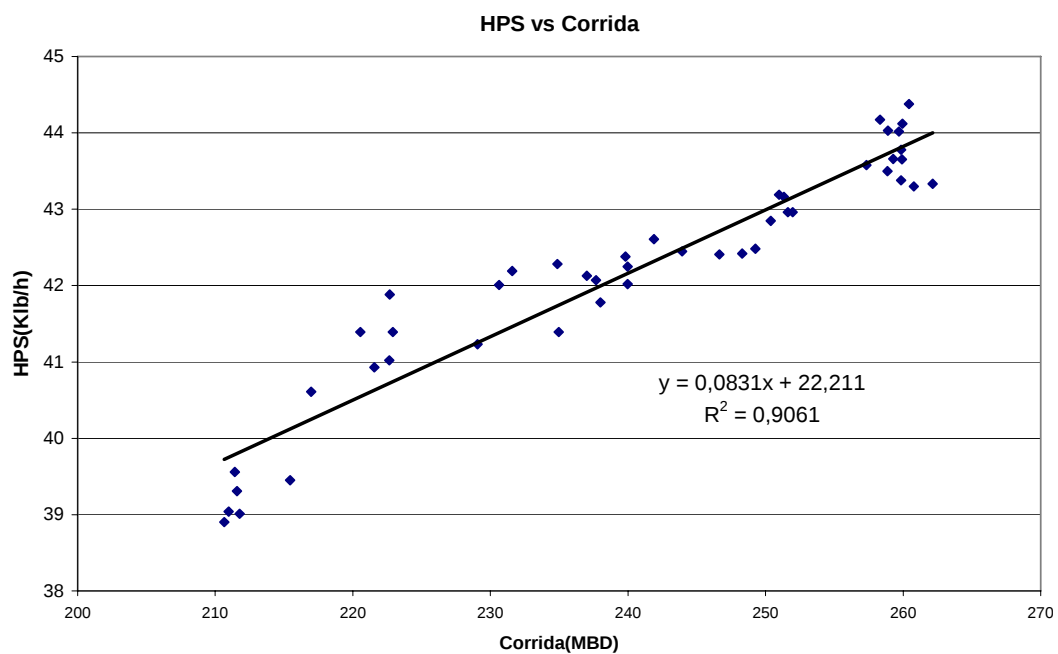


Figura N° 25. Consumo de vapor de alta con respecto a la carga a la Unidad 10. Rango limitado para valores entre 210 y 280 MBD

$$VAP_{U10} = 0,0831 \frac{Klb}{MBD \cdot h} * C_{U10} + 22,211 \frac{Klb}{h} \quad (18)$$

Donde,

VAP_{U10} : Cantidad de vapor de alta que se ha de consumir en la Unidad 10 (Klb/h)

C_{U10} : Carga a la Unidad 10 o corrida del Mejorador (MBD)

De esta forma cuando el usuario introduzca en el archivo “interfaz” valores de cargas mayores a 200 MBD, el consumo del servicio se calculará mediante la ecuación N° 18, mientras que para valores menores, exceptuando el cero, se colocaría un valor constante de 37 Klb/h, correspondiente al valor promedio de los valores excluidos.

b) **Consumo de vapor de media presión:** El vapor de media presión (MPS por sus siglas en inglés) se consume en mayor cantidad que el de alta, sin embargo, este consumo es independiente de la cantidad de crudo diluido que esté entrando a la Unidad, y esto se puede ver en la figura N° 26, que muestra el diagrama propio del servicio con respecto a la carga.

En ese diagrama se puede apreciar como tanto para cargas bajas como altas, se presentan valores oscilantes en el consumo del servicio, dejando en evidencia que entre las dos variables en estudio no existe correlación alguna.

Para la herramienta final se colocó entonces un valor constante correspondiente al promedio de todos los valores de consumo de vapor de baja registrados en el período de estudio, igual a 86,72 Klb/h, de tal forma que se tuviese como máximo, si se tomaran los valores extremos como válidos, un 9% de error en cuanto a la cantidad de

vapor de media presión a utilizar en un determinado escenario, lo que en términos absolutos representaría menos de 8 Klb/h.

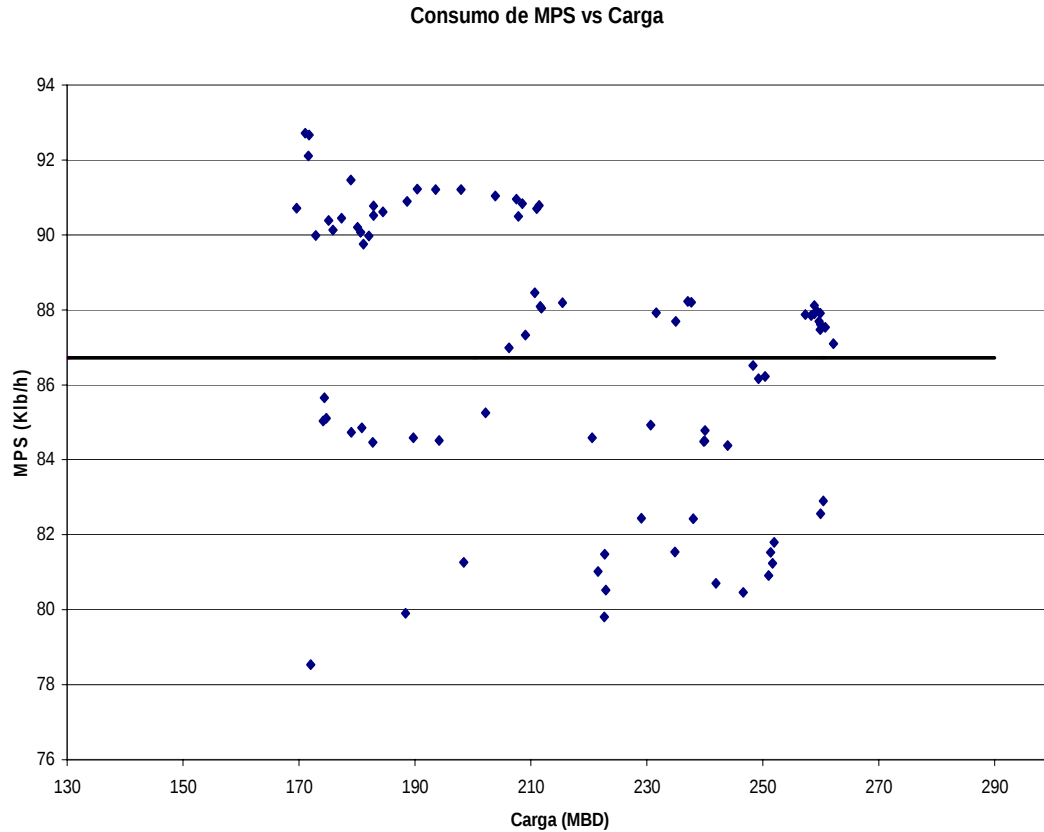


Figura N° 26. Consumo de vapor de media presión con respecto a la carga de la Unidad 10

- c) **Consumo de vapor de baja presión:** En la Figura N° 27 se observa como quedó finalmente el diagrama para este servicio (LPS por sus siglas en inglés), el cual se puede ver a simple vista como los datos se ajustan casi de manera perfecta a una recta, lo cual queda comprobado con el valor de R^2 mayor a 0,9.

La ecuación de la recta que correlaciona a las variables, en términos de las mismas, es la siguiente:

$$VBP_{U10} = 0,0553 \frac{Klb}{MBD \cdot h} * C_{U10} + 49,737 \frac{Klb}{h} \quad (19)$$

Donde,

$VB_{P_{U10}}$: Cantidad de vapor de baja que se ha de consumir en la Unidad 10 (Klb/h)

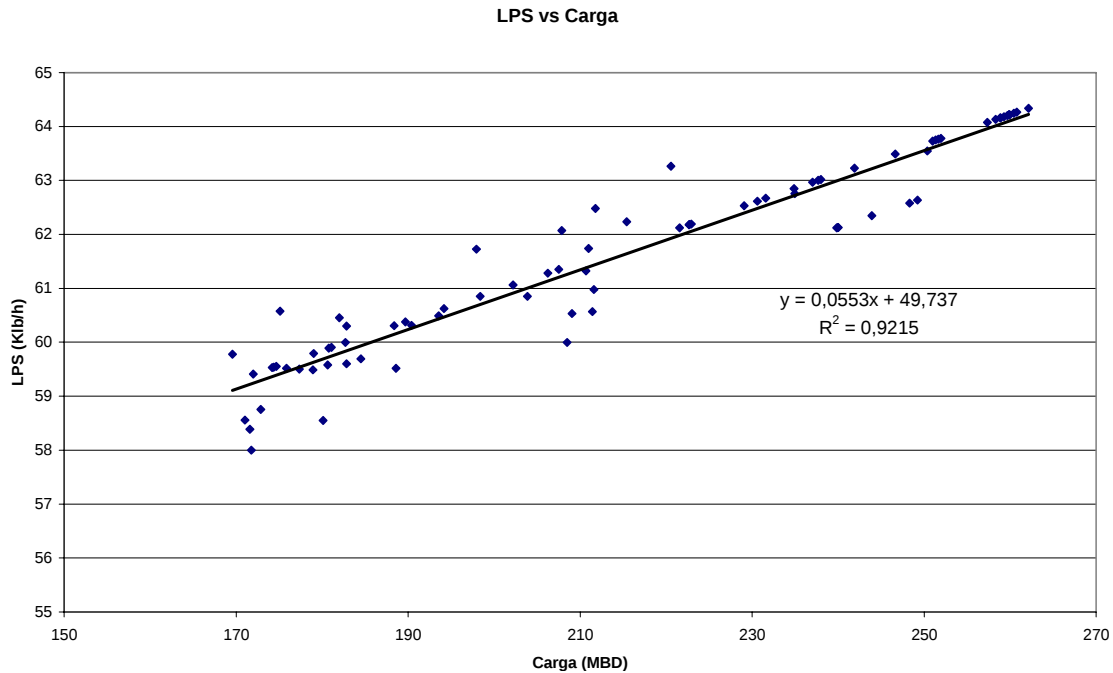


Figura N° 27. Consumo de vapor de baja con respecto a la carga de la Unidad 10

Esta ecuación no tiene restricciones con respecto al rango, el único cambio se ve cuando la planta no esta recibiendo carga, pues el valor de consumo del servicio no es 49,737 Klb/h, si no que toma automáticamente el valor de cero (0 Klb/h).

- d) **Generación de vapor de baja:** Al realizar el diagrama para este servicio se pudo notar la gran dispersión que existía, encontrando diferentes valores de generación para un mismo, o prácticamente el mismo valor de carga, particularidad que se puede ver claramente en la gráfica de la figura N° 28. Sin embargo, también se pudo percatar de que los valores estaban bastantes cercanos en todo el rango de alimentaciones, razón que hizo pensar en la posibilidad de utilizar el

valor promedio, tal y como se había realizado para el consumo de vapor de media de esta Unidad.

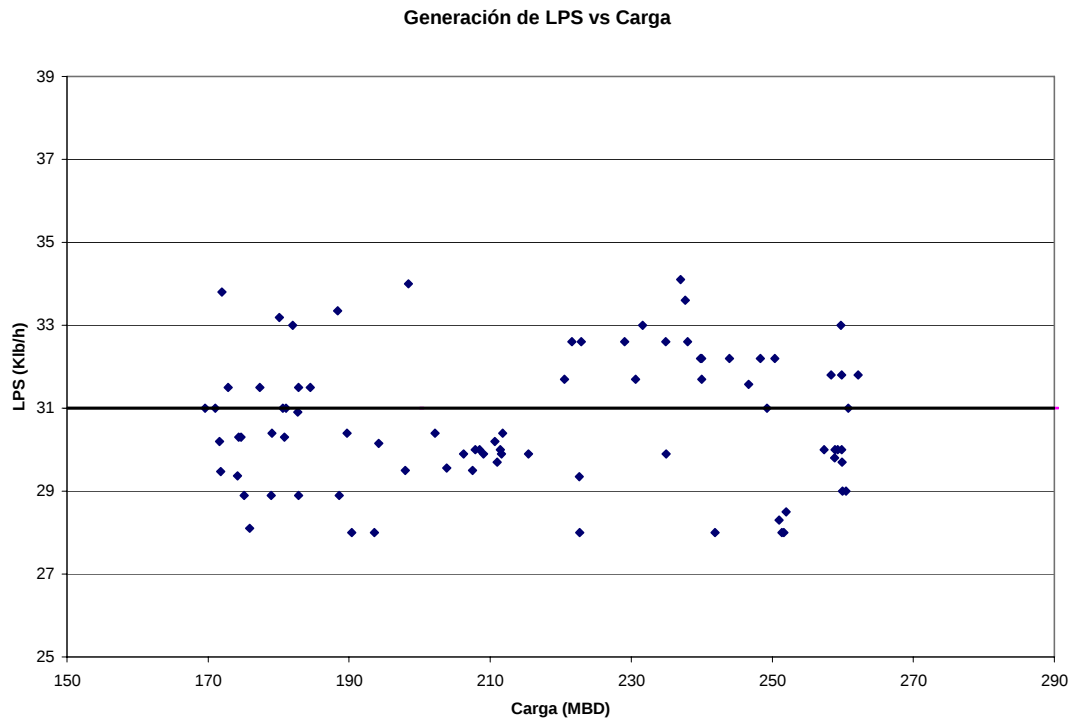


Figura N° 28. Generación de vapor de baja presión con respecto a la carga de la Unidad 10

El valor promedio resultó en 30,7 Klb/h, sin embargo, se decidió utilizar un valor de 31 Klb/h, valor que, además de ser muy cercano al promedio, correspondía con el caso descrito en el diseño, presentando un error máximo posible menor al 10% y en términos absolutos menor a 4 Klb/h. Cuando no entra carga al Mejorador, se toma cero (0 Klb/h) como valor para la generación del servicio.

- e) **Consumo de gas combustible:** Para este caso se obtuvo el diagrama de la figura N° 29, en donde el gas de combustible se presenta como FG (Fuel Gas) en el eje de las ordenadas al igual que el resto de los servicios. Tal y como se puede observar en el mencionado diagrama, la cantidad de gas consumido con respecto a la carga a la Unidad se

correlaciona muy bien mediante una recta, hecho que se comprueba al observar el R^2 de la mencionada curva, que da un valor mayor a 0,9.

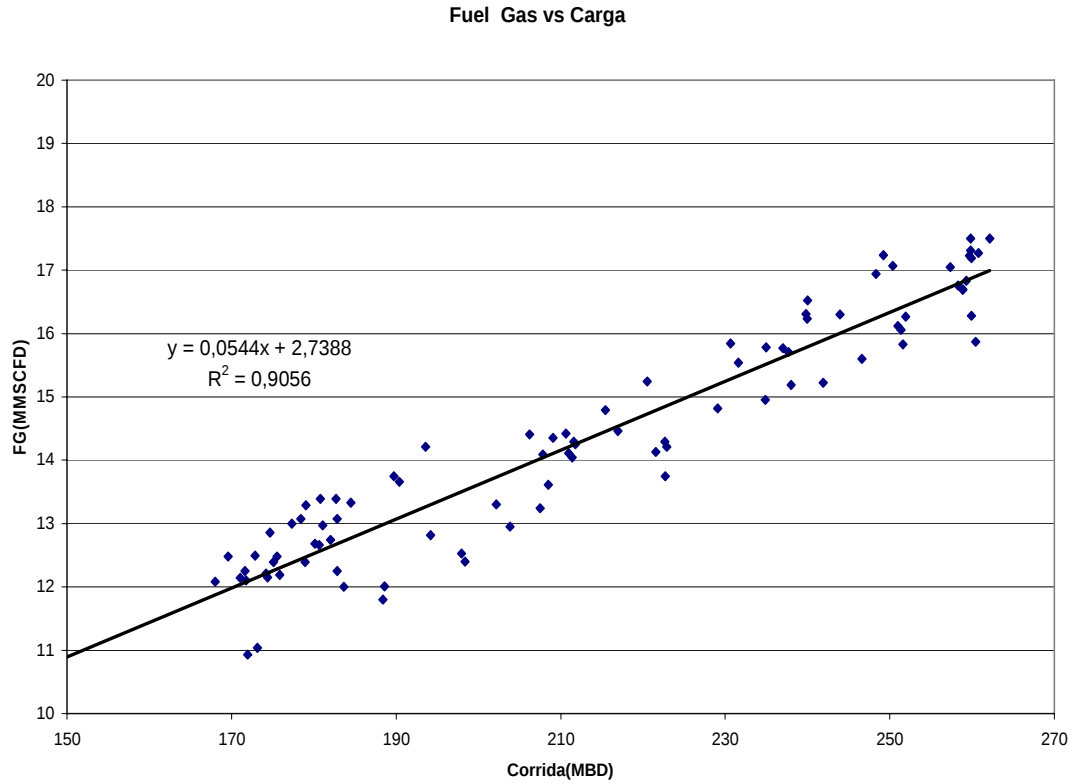


Figura N° 29. Consumo de gas combustible con respecto a la carga de la Unidad 10

De esta forma para la herramienta final se utiliza una ecuación en términos de las variables en estudio, la cual se presenta a continuación en la ecuación N° 20.

$$GC_{U10} = 0,0544 \frac{MMSCFD}{MBD} * C_{U10} + 2,7388 MMSCFD \quad (20)$$

Donde,

GC_{U10} : Cantidad de gas combustible a consumir en la Unidad 10 (MMSCFD)

Área 20. Coquificación:

- a) **Consumo de vapor de alta presión:** Para esta Área se obtuvo una gráfica igual a la mostrada en la figura N° 30, en el cual se observa una fuerte dispersión, razón por la cual se puede afirmar que no existe correlación entre las variables. Debido a esta deducción se tomaron acciones para poder finiquitar esta sección de la herramienta, pues la proyección es global para toda la planta.

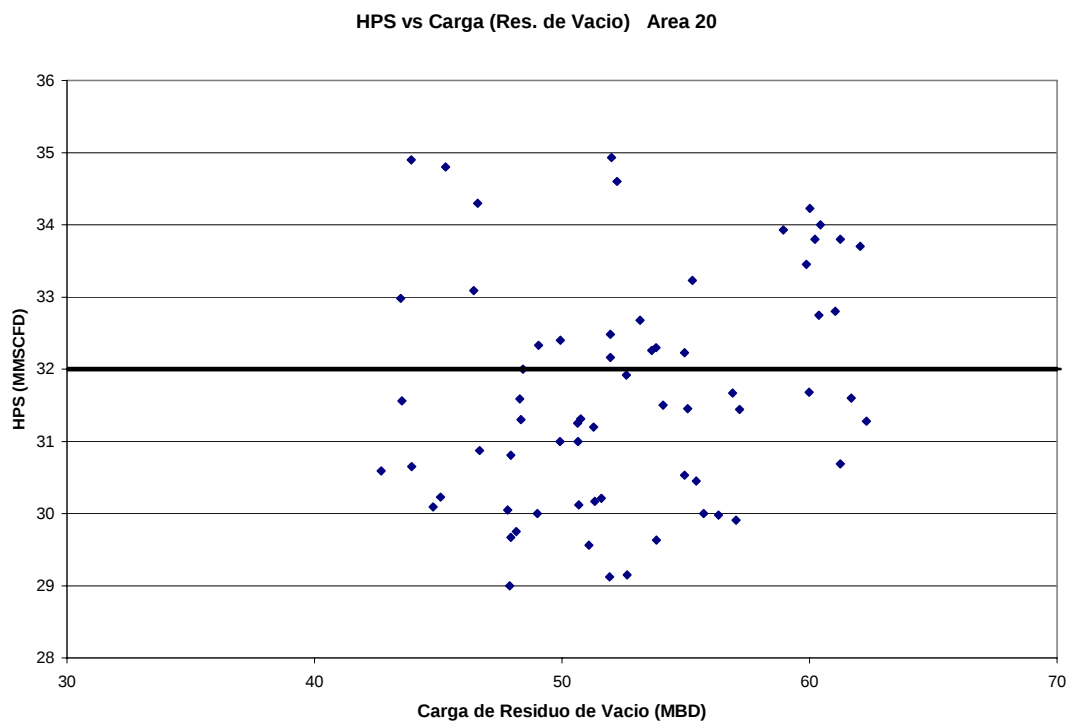


Figura N° 30. Consumo de vapor de alta con respecto a la carga hacia el Área 20

Como en casos anteriores, se fijó un valor constante, o lo que es lo mismo, una recta paralela al eje x que será el valor invariable para cualquier valor de carga a la unidad, exceptuando cuando no hay carga, pues para este caso se fijó un consumo de cero (0 Klb/h). El valor constante seleccionado fue el valor dado por el diseño, es decir 32 Klb/h, ya que es un caso que ya ha sido estudiado y además se aproxima mucho al valor promedio de los consumos mostrados en el

diagrama. En el peor de los casos se obtendría un error que no llega al 10%.

- b) **Consumo de vapor de media presión:** He aquí uno de los casos que presentan un ligero cambio en la manera de ser aceptado como forma final hacia la herramienta. Hasta el momento se habían aceptado ecuaciones que correlacionaran bien a las variables, con un R^2 mayor a 0,9 o, en caso contrario, en donde no se correlacionara, se había colocado un valor fijo que no excediese un porcentaje de error relativo del 10% para el peor de los casos. Sin embargo, en esta oportunidad se presentó un caso particular expuesto en la figura N° 31.

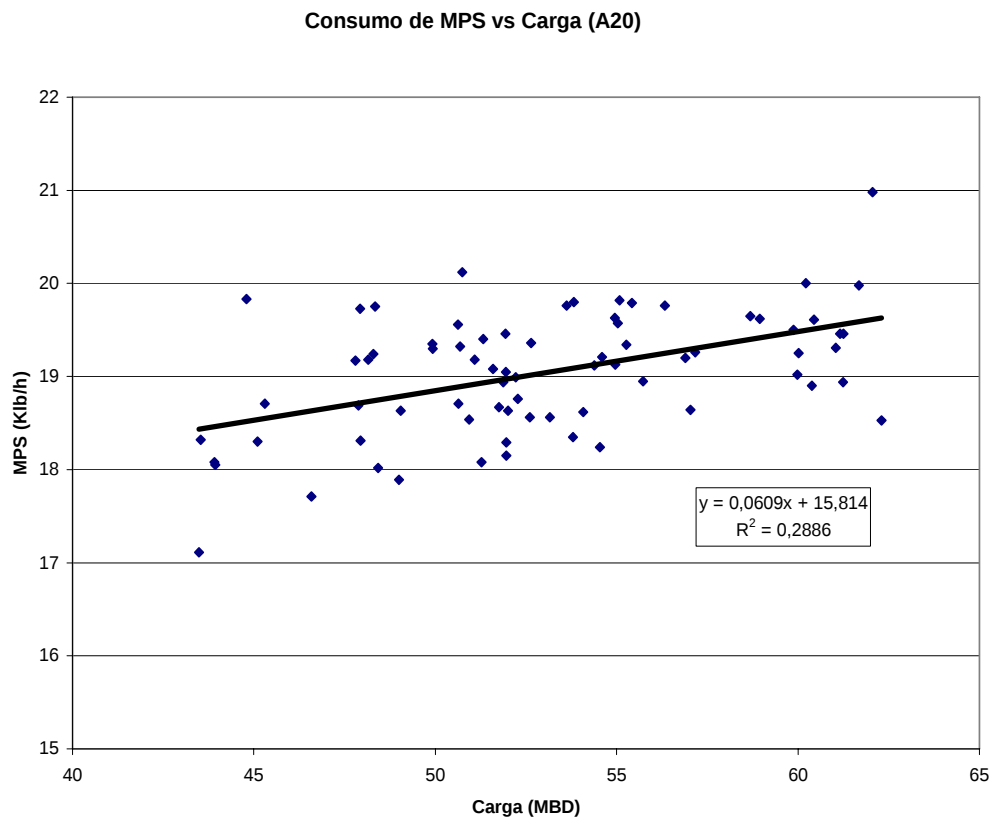


Figura N° 31. Consumo de vapor de media con respecto a la carga del Área 20

Tal y como se puede apreciar en el diagrama, la correlación es realmente pobre, un R^2 de aproximadamente 0,3 no es una buena

referencia; no obstante se puede observar, como en realidad existe una tendencia de los valores de consumo de vapor de media, a ir aumentando a medida que la carga también lo hace en cantidad, tendencia que estaría siendo representada por la recta en color negro.

En primera instancia se pensó en seguir con la metodología común de fijar un valor constante, pero de haber hecho esto, se habría tenido, si el valor fijo fuese el promedio (19,04 Klb/h), el error máximo, en el peor de los casos, hubiese sido ligeramente mayor al 10%, razón por la cual se pensó en aprovechar que en realidad si había tendencia mas no correlación, para utilizar la ecuación de la recta, obteniendo una reducción notable en el error relativo, con un porcentaje máximo de casi 7,3%,

De esta forma se amalgaman las dos técnicas utilizadas antes y se tiene un resultado híbrido, con una ecuación en términos de las variables, dada a continuación:

$$VMP_{A20} = 0,0609 \frac{Klb}{MBD \cdot h} * C_{A20} + 15,814 \frac{Klb}{h} \quad (21)$$

Donde,

VMP_{A20} : Cantidad de vapor de media a consumir en el Área 20 (Klb/h)

C_{A20} : Carga al Área 20 (MBD)

- c) **Generación de vapor de media presión:** Para este servicio se obtuvo la gráfica expuesta en la figura N° 32, en donde se puede observar además de los puntos dispersos, el mejor ajuste de tendencia para ellos, obteniendo un polinomio de tercer grado y un R^2 de 0,85. En realidad, se había fijado un R^2 como mínimo para aceptar arreglos de correlación, sin embargo, luego de varias reuniones con los ingenieros

del Área se determinó que se podía tomar este arreglo como el más óptimo, debido a que representaba bastante bien la tendencia de los datos y porque además el R^2 estaba muy próximo al mínimo fijado.

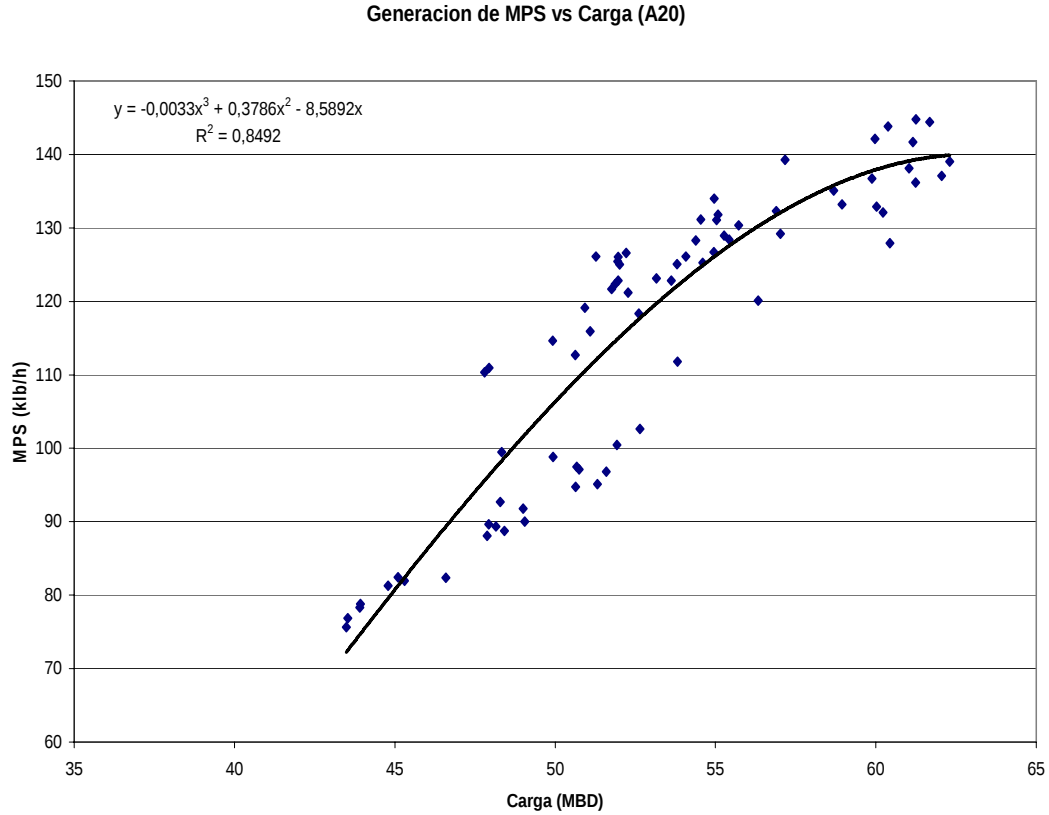


Figura N° 32. Generación de vapor de media con respecto a la carga del Área 20

De esta forma se coloca en la celda de cálculo de la herramienta, la ecuación N° 22, la cual describe una curva que parte desde el origen; sin embargo, para los primeros valores de carga, ésta se encuentra en el cuarto cuadrante, es decir, que arroja valores negativos de generación del servicio. Por esta razón se hizo una restricción en cuanto al rango.

$$VMPg_{A20} = -0,0033 \frac{Klb}{MBD^3 \cdot h} * C_{A20}^3 + 0,3786 \frac{Klb}{MBD^2 \cdot h} * C_{A20}^2 - 8,5892 \frac{Klb}{MBD \cdot h} * C_{A20} \quad (22)$$

Donde,

$VMP_{g_{A20}}$: Cantidad de vapor de media generada en el Área 20 (Klb/h)

La herramienta funciona, con escenarios en donde la carga al Área 20 sea superior a 34 MBD. Para esos casos en donde se coloquen cargas menores a este valor límite, se colocará automáticamente un valor de cero (0 Klb/h).

- d) **Generación de vapor de baja presión:** Está Área (20) genera una pequeña cantidad de vapor de baja presión, sin embargo, esta poca cantidad de vapor es el producto del vapor de extracción de una de las turbinas en servicio (de extracción total), y por lo tanto, es un valor constante, estipulado en el diseño.

Por esta razón, para este servicio, en esta Área, no se desarrolló una gráfica, simplemente se colocó el valor de diseño (4 Klb/h) directamente en la herramienta, fijando como limitación la parada del área, es decir, que de no recibir carga se colocará un valor de generación de vapor de baja presión igual a cero (0 Klb/h).

- e) **Consumo de Gas Combustible:** En pro de mejorar la correlación, se limitó el rango entre 40 MBD y 60 MBD, logrando así una gráfica como la de la figura N° 33.

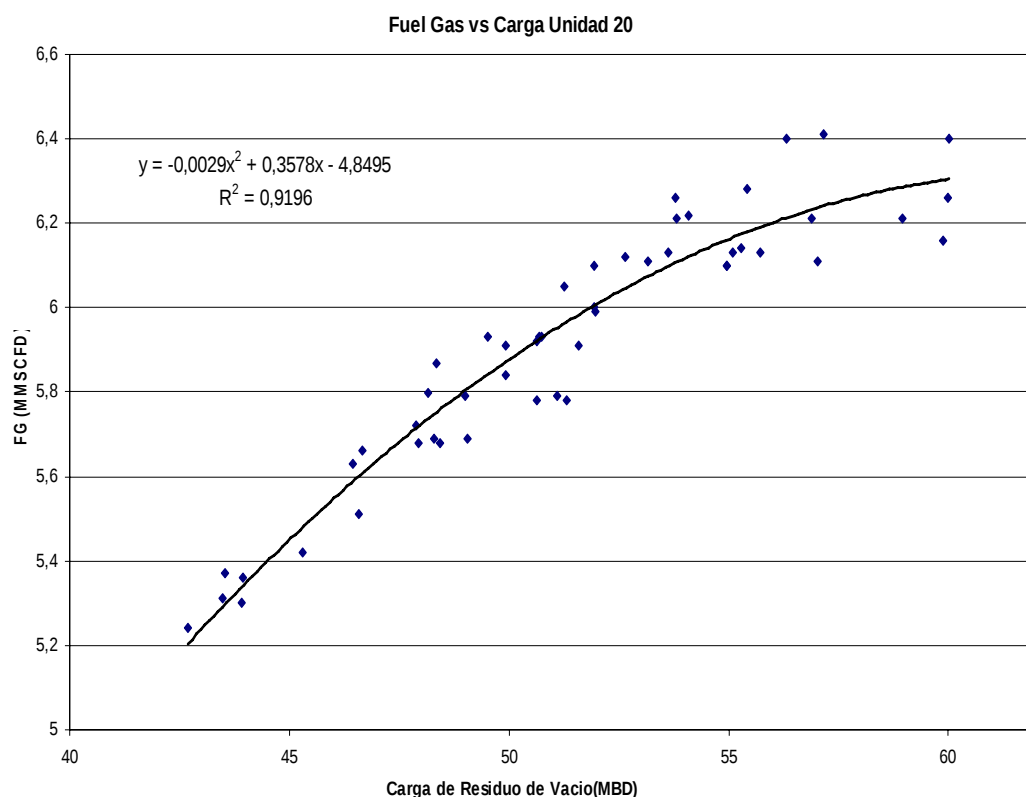


Figura N° 33. Consumo de gas combustible con respecto a la carga del Área 20

En esta gráfica se puede apreciar como se correlacionan ambas variables mediante la línea curva cuya ecuación cuadrática está ubicada en la esquina superior derecha de la misma. El buen grado de correlación queda demostrado con el valor de R^2 , por lo cual se acepta el ajuste y se toma para la herramienta en la forma de la ecuación N° 23.

$$GC_{A20} = -0,0029 \frac{MMSCFD}{MBD^2} * C_{A20}^2 + 0,3578 \frac{MMSCFD}{MBD} * C_{A20} - 4,8495 MMSCFD$$

(23)

Donde,

GC_{A20} : Cantidad de gas combustible a consumir en la Unidad 20 (MMSCFD)

Para valores ubicados en el rango entre 16,5 MBD y 60 MBD, la herramienta utilizará la ecuación N° 23; para valores inferiores (lo cual no constituye un problema pues está por debajo del límite fijado anteriormente en la generación de vapor de media presión y además está por debajo de la mínima carga posible al Área), la herramienta tomará el valor de cero (0 MMSCFD); y para valores mayores se estableció un valor de 6,3 MMSCFD, ya que el consumo de gas para valores de carga mayores a 60 MBD tiende a estabilizarse en un rango entre 6,17 y 6,5 (mínimo y máximo respectivamente), dando un error relativo máximo del 3,2%.

- f) **Generación de gas combustible:** Para este servicio se obtuvo una gráfica muy parecida a la correspondiente al consumo, en donde los datos se correlacionaban muy bien mediante una ecuación cuadrática. A continuación se presenta la ecuación N° 24, que expresa en términos de las variables, la misma ecuación que se puede observar en la figura N° 34, la cual correlaciona los datos.

$$GCg_{A20} = -0,0097 \frac{MMSCFD}{MBD^2} * C_{A20}^2 + 1,34 \frac{MMSCFD}{MBD} * C_{A20} - 24,17 MMSCFD \quad (24)$$

Donde,

GCg_{A20} : Cantidad de gas combustible generada en la Unidad 20 (MMSCFD)

En la herramienta se tomará esta ecuación para el rango comprendido entre los 22 MBD y los 65 MBD, para las cargas por debajo de este rango se tomará un valor de cero (0 MMSCFD), presentándose un caso similar al que se presentó para el consumo del servicio en esta área, y para cargas superiores (cargas entre 65 MBD y 70 MBD) se utilizará un valor fijo de 22 MMSCFD.

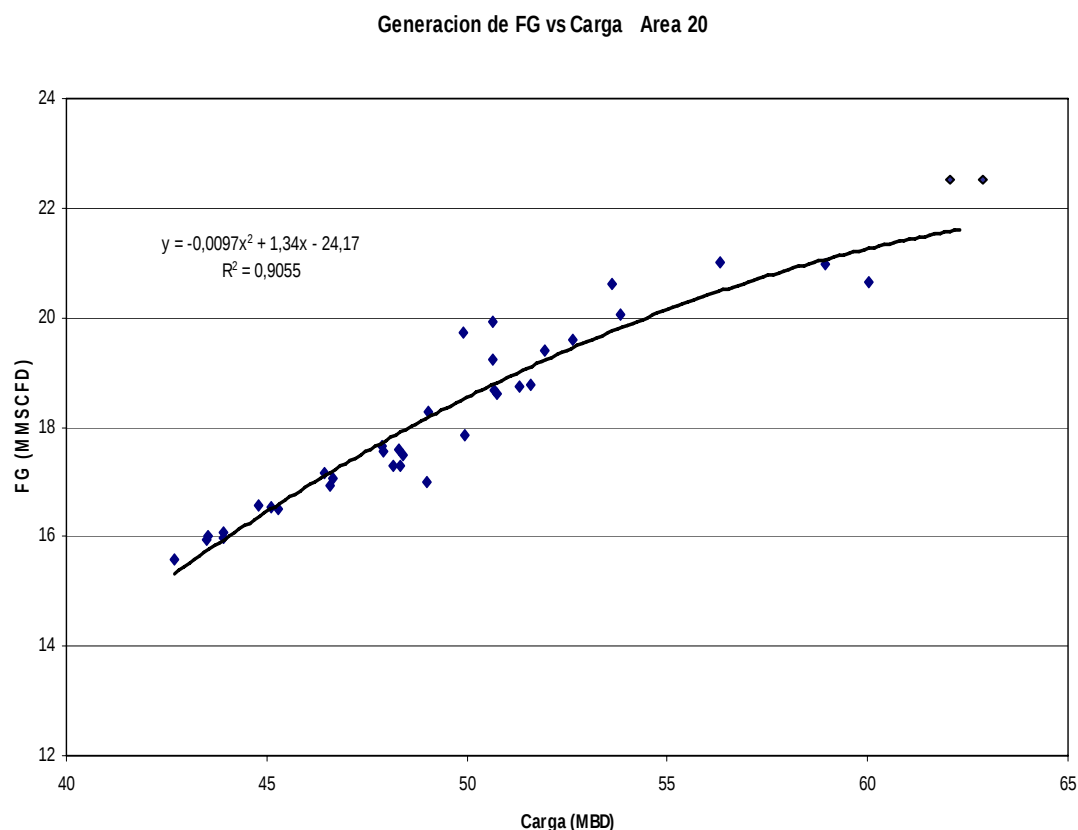


Figura N° 34. Diagrama de la generación de gas combustible con respecto a la carga del Área 20

Unidad 28. Recuperación de Azufre: Todos los servicios de esta Unidad serán nulos (iguales a cero) únicamente para el caso en que no está entrando alimentación a la Unidad, es decir, cuando la carga sea igualmente cero (0 MBD).

- a) **Consumo de vapor de alta presión:** El consumo de vapor de alta presión se relaciona con la carga a esta Unidad, tal y como se muestra en la figura N° 35, presentada a continuación.

Según lo que se puede apreciar en dicha figura y el valor de R^2 , se puede asegurar que estas variables se correlacionan mediante la línea de tendencia de ecuación cuadrática; ecuación que se muestra, en término de las variables en estudio, en la ecuación N° 25.

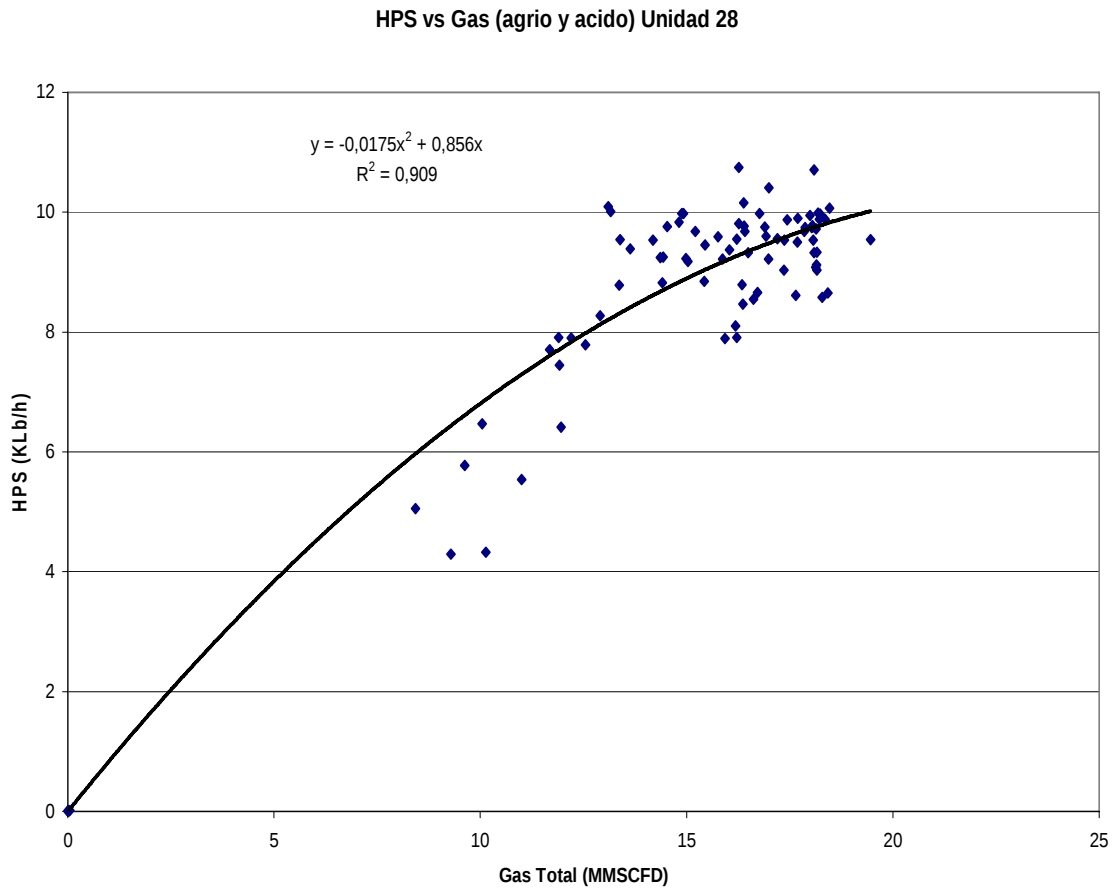


Figura N° 35. Consumo de vapor de alta presión con respecto a la carga de la Unidad 28

$$VAP_{U28} = -0,0175 \frac{Klb}{MMSCFD^2 \cdot h} * C_{U28}^2 + 0,856 \frac{Klb}{MMSCFD \cdot h} * C_{U28} \quad (25)$$

Donde,

VAP_{U28} : Cantidad de vapor de alta que se ha de consumir en la Unidad 28 (KLb/h)

C_{U28} : Carga a la Unidad 28 (MMSCFD)

- b) **Generación de vapor de media presión:** Relacionando la cantidad de vapor de media que se generó en el período de estudio con la carga a la Unidad, se obtuvo el diagrama mostrado en la figura N° 36.

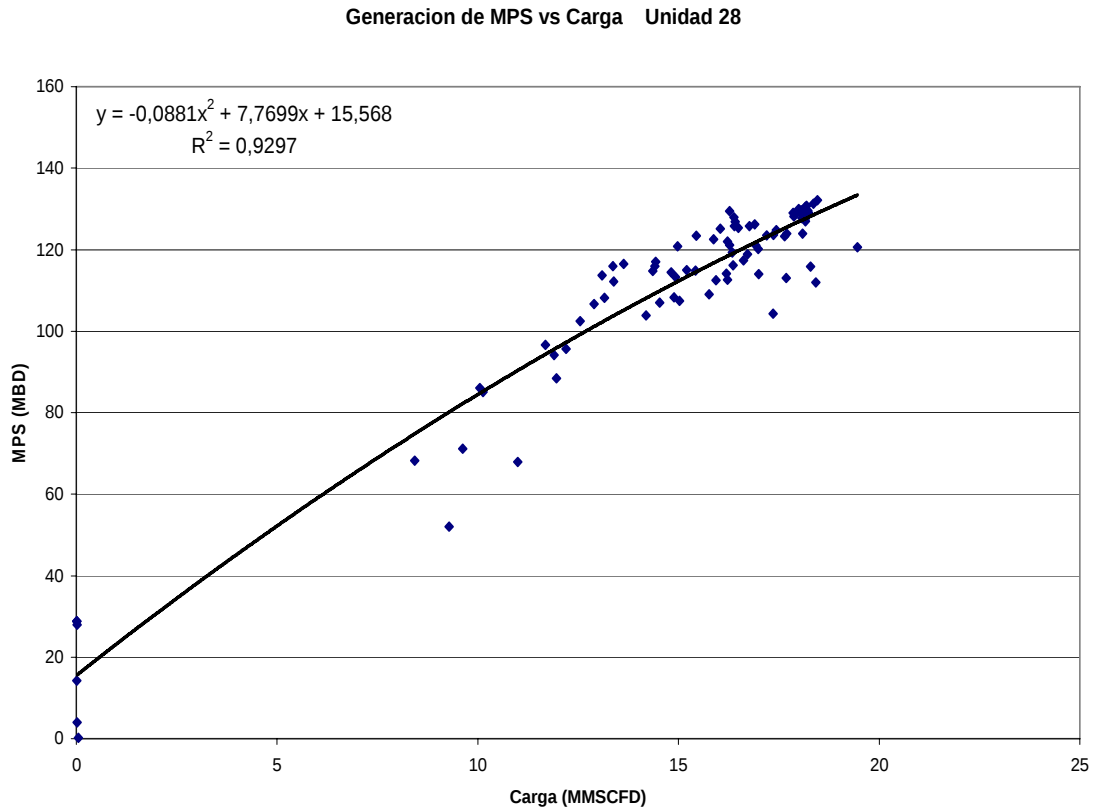


Figura N° 36. Generación de vapor de media presión con respecto a la carga de la Unidad 28

Dados los datos, se encontró una línea de tendencia que correlaciona muy bien a las dos variables, con una R^2 de prácticamente 0,93. La ecuación dada en términos de la generación de vapor y la carga de gases a la Unidad, se presenta a continuación como la ecuación N° 26.

$$VMPg_{U28} = -0,0881 \frac{Klb}{MMSCFD^2 \cdot h} * C_{U28}^2 + 7,7699 \frac{Klb}{MMSCFD \cdot h} * C_{U28} + 15,568 \frac{Klb}{h} \quad (26)$$

Donde,

$VMPg_{U28}$: Cantidad de vapor de media generada en la Unidad 28 (Klb/h)

De manera que esta ecuación N° 26 es la que se utiliza directamente en la herramienta, sin ninguna otra restricción en el rango.

- c) **Consumo de vapor de baja presión:** Para el consumo de vapor de baja se obtuvo el diagrama N° 37, donde se puede apreciar, tanto en el diagrama en si, como en el valor del R^2 , que las variables se correlacionan muy bien a través de la línea de tendencia mostrada, cuya ecuación se expresa en términos de la cantidad de servicio y la carga a la Unidad, tal y como se ve en la ecuación N° 27, la cual es utilizada directamente en la herramienta, sin más restricciones adicionales que la mencionada al comienzo de esta sección (Unidad 28).

$$VBP_{U28} = -1,23 \frac{Klb}{MMSCFD^2 \cdot h} * C_{U28}^2 + 34,06 \frac{Klb}{MMSCFD \cdot h} * C_{U28} + 129,55 \frac{Klb}{h} \quad (27)$$

Donde,

VMP_{U28} : Cantidad de vapor de baja consumida en la Unidad 28 (Klb/h)

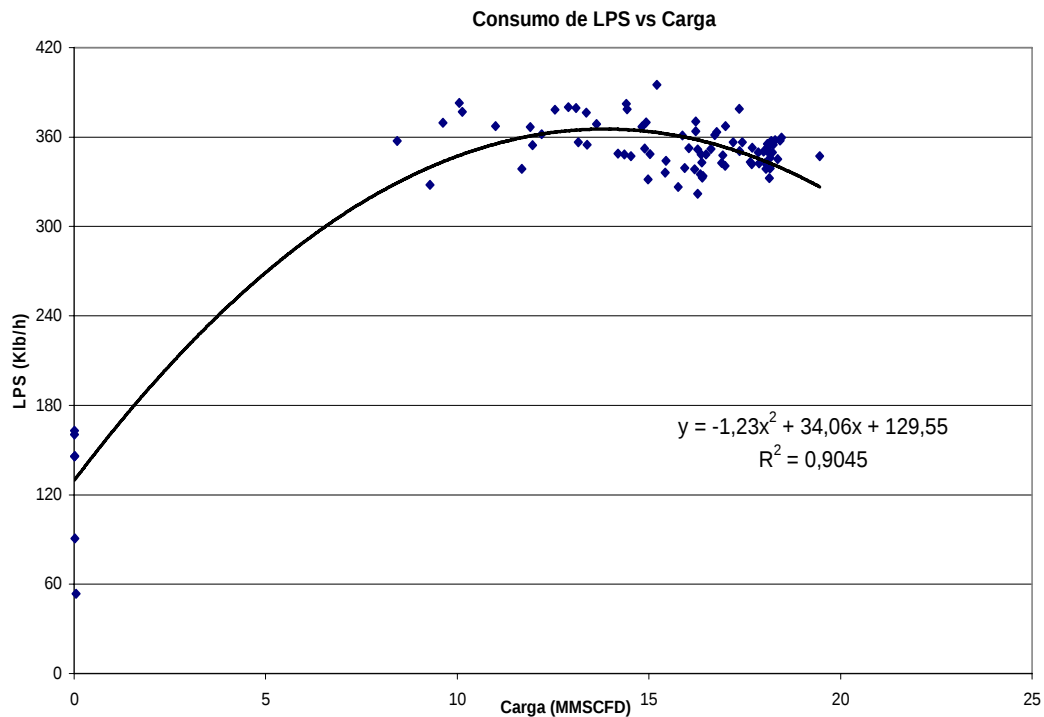


Figura N° 37. Consumo de vapor de baja presión con respecto a la carga de la Unidad 28

- d) **Generación de vapor de baja presión:** Para la generación de este servicio se obtuvo una grafica como la que se puede apreciar en la figura N° 38, cuyos datos están bien correlacionados por la línea de tendencia curva y de ajuste cuadrático.

Proporcionado el diagrama, pareciese que los datos se ajustaran a una recta, y de hecho, al realizar un ajuste lineal se obtiene un buen valor de R^2 , sin embargo, al hacer el ajuste polinomial de segundo grado se obtiene un mejor resultado, imperceptible a simple vista, pero superior.

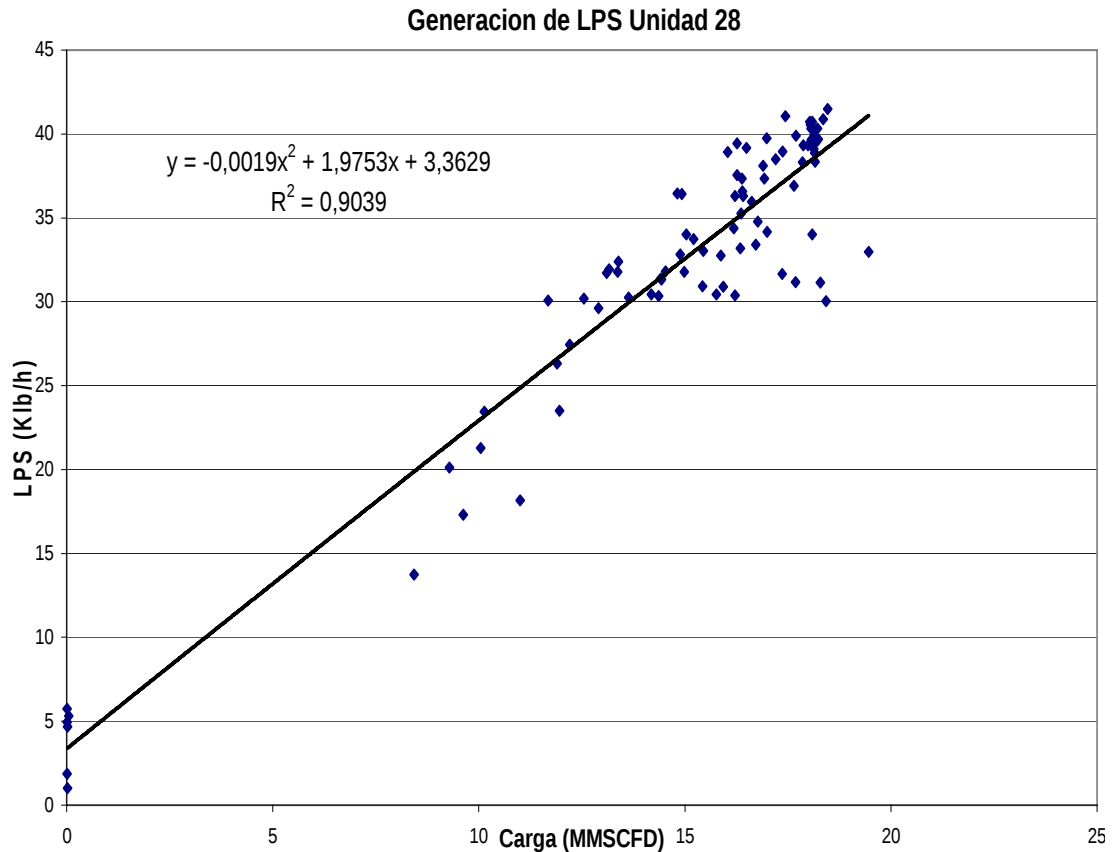


Figura N° 38. Diagrama de la generación de vapor de baja presión con respecto a la carga de la Unidad 28

A continuación se expone la ecuación (N° 28) correspondiente a la línea de tendencia, en términos de las variables en estudio.

$$VBPg_{U28} = -0,0019 \frac{Klb}{MMSCFD^2 \cdot h} * C_{U28}^2 + 1,9753 \frac{Klb}{MMSCFD \cdot h} * C_{U28} + 3,3629 \frac{Klb}{h} \quad (28)$$

Donde,

$VBPg_{U28}$: Cantidad de vapor de media generada en la Unidad 28 (Klb/h)

- e) **Condición especial de arranque:** Para el caso en que esta Unidad está en proceso de arranque se halló la gráfica N° 39 con la cual se obtuvo una ecuación que correlaciona de muy buena manera, el vapor de alta utilizado para esa condición, con respecto a la carga de gas que se está introduciendo en la Unidad.

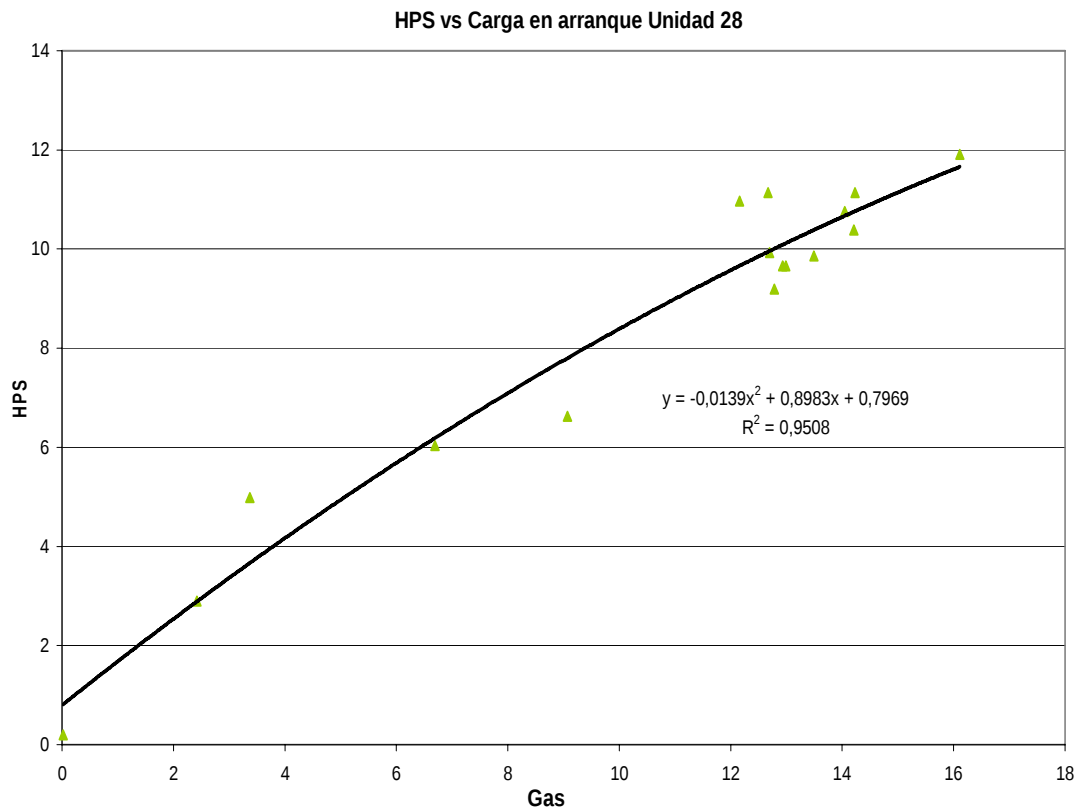


Figura N° 39. Consumo de vapor de alta presión con respecto a la carga de gas a la unidad, durante una situación de arranque

A continuación se presenta dicha ecuación en términos de las variables en estudio:

$$VAP_{U28} = -0,0139 \frac{Klb}{MMSCFD^2 \cdot h} * C_{U28}^2 + 0,8983 \frac{Klb}{MMSCFD \cdot h} * C_{U28} + 0,7969 \frac{Klb}{h} \quad (29)$$

Esta ecuación pudiese ser utilizada por los ingenieros de esta Unidad, o de los servicios industriales, en caso de ser requerida durante el arranque de planta, después de paradas de plantas accidentales o programadas. Es un caso excepcional que se dio sólo para este servicio y para esta Unidad, sin embargo, la ecuación no formaría parte de la herramienta.

Área 50. Hidroprocesos: Tal y como se ha mencionado anteriormente esta área operativa de la planta está compuesta por tres Unidades íntimamente relacionadas, como lo son la Unidad 14, 15 y 16. A continuación se presentarán los resultados y sus respectivos análisis por para cada servicio.

- a) **Consumo de vapor de alta presión:** Las Unidades de esta Área, se caracterizan por tener un consumo de vapor de alta presión, así como de otros servicios, que no depende de la cantidad de destilados que se estén alimentando, por el contrario, depende de ciertos factores que se resumen en la severidad del proceso, factor que es controlado por los Ingenieros de Planta según los requerimientos en el Mejorador.

Para el consumo de vapor de alta presión, de las Unidades 14 y 16, se obtuvieron los diagramas expuestos en las figuras N° 40 y 41, en donde se aprecian los puntos dispersos y la línea de tendencia y ecuación, correspondientes al mejor de los arreglos. Obviamente, no hay correlación entre las variables y esto en cierta forma es la conducta esperada.

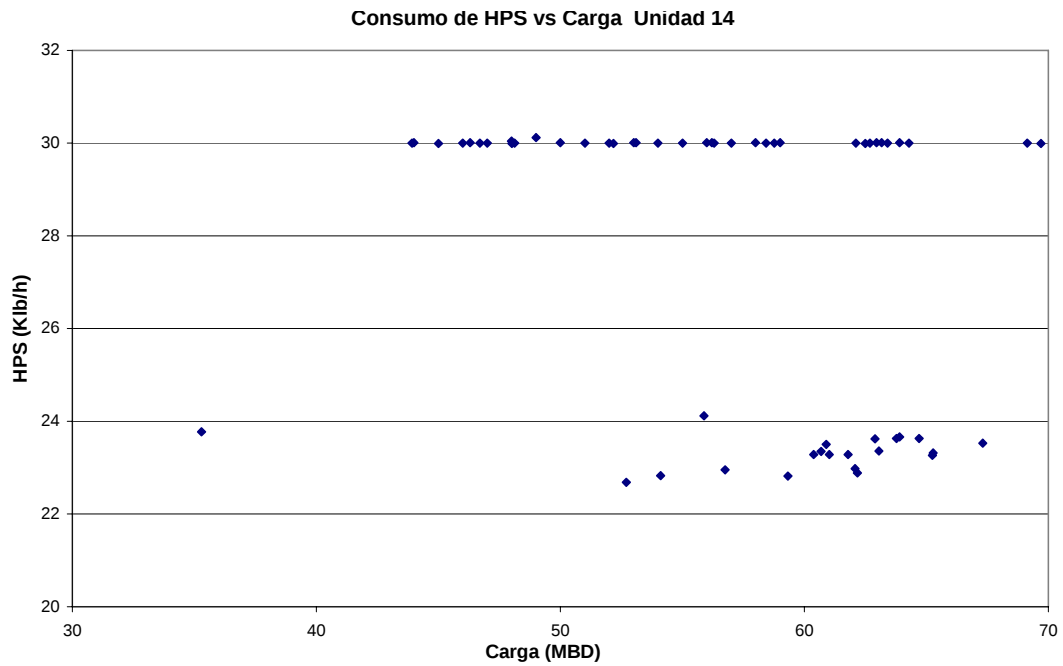


Figura N° 40. Consumo de vapor de alta con respecto a la carga de la Unidad 14

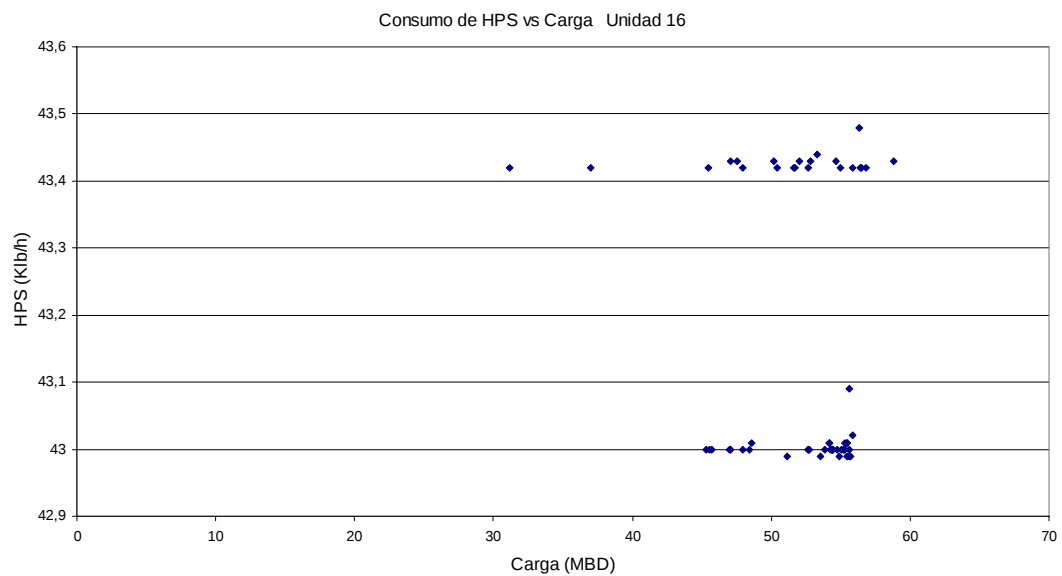


Figura N° 41. Consumo de vapor de alta con respecto a la carga de la Unidad 16

Tal y como se mencionó en el párrafo anterior, ninguna de estas gráficas muestra correlación entre la variables, sin embargo, se observa como los valores de consumo del servicio parecen estar entre

un valor mínimo y uno máximo, lo cual hizo dudar a que valor se debía asumir para estos casos. Por esta razón se decidió ver por separado el comportamiento del servicio en cada unidad con respecto al tiempo, obteniendo los siguientes dos diagramas (figuras N° 42 y N° 43).

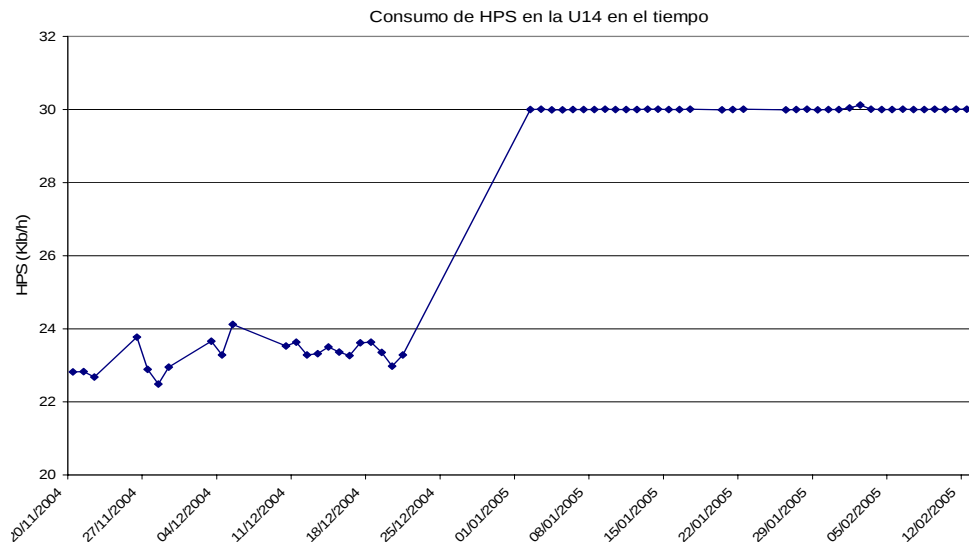


Figura N° 42. Consumo de vapor de alta presión de la Unidad 14 con respecto al tiempo

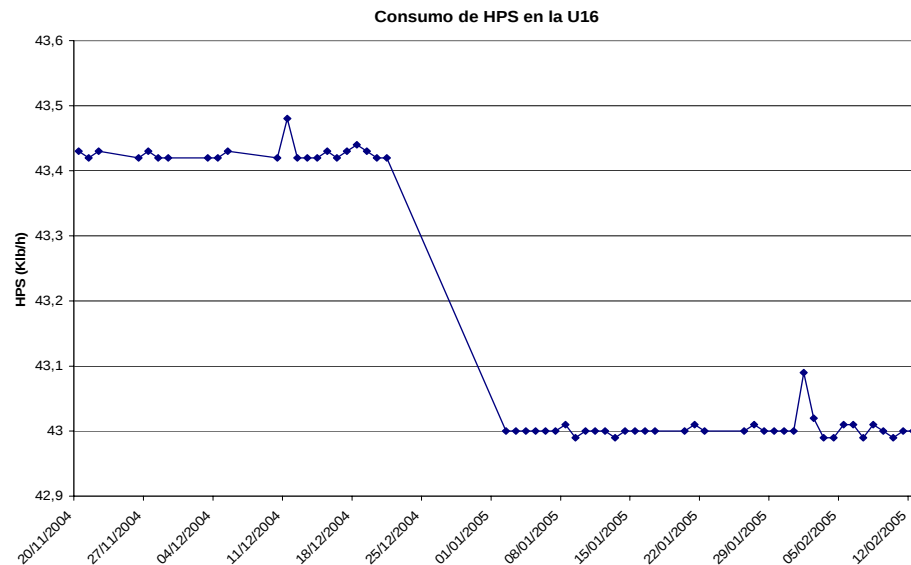


Figura N° 43. Consumo de vapor de alta presión de la Unidad 16 con respecto al tiempo

En estos diagramas se puede apreciar, como en ambas unidades existe un cambio radical en el consumo de vapor de alta presión después de los últimos días de diciembre. Para el caso de la Unidad 14 se aumenta hasta un valor prácticamente fijo de 30 Klb/h, mientras que para la Unidad 16 se disminuye hasta un valor prácticamente constante de unos 43 Klb/h.

Este fenómeno se debió al cambio de severidad que se realizó en la planta después de la caída de la planta, cuando los ingenieros del Área fijaron estos valores como el punto de control o “set point”. Por esta razón se decidió colocar en la herramienta de proyección, para los consumos de vapor de alta presión de las Unidades 14 y 16, valores fijos de 30 Klb/h y 43 Klb/h, respectivamente, y cero (0 Klb/h) en caso de que no entre carga a cada Unidad.

Para el caso de la Unidad 15, se obtuvo la figura N° 44, en donde se observa, al igual que las correspondientes a las unidades 14 y 16, que no hay correlación entre las variables. Ésta se muestra a continuación:

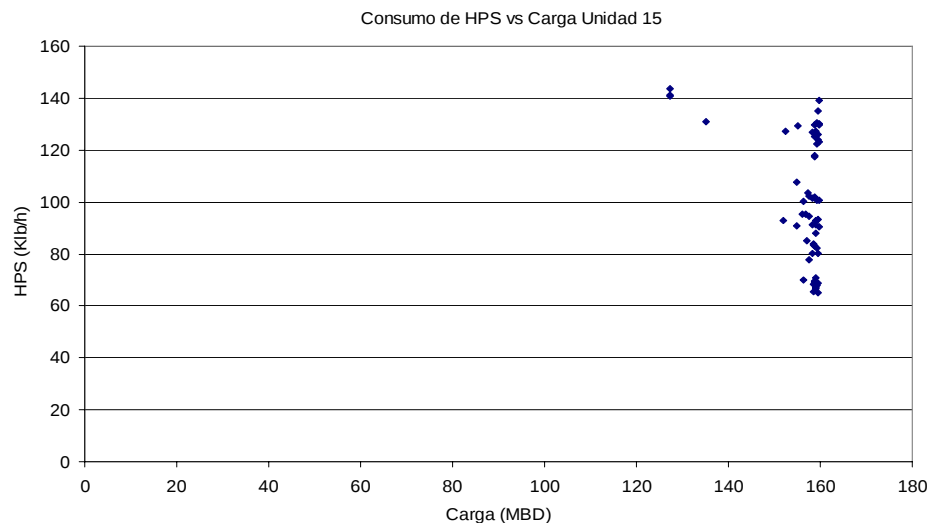


Figura N° 44. Consumo de vapor de alta con respecto a la carga de la Unidad 15

Para este caso la decisión fue mucho más compleja, pues no se tenía el mismo tipo de comportamiento y sus valores resultaban demasiado diferentes y casi para un solo nivel de cargas comprendidas entre 150 MBD y 160 MBD. Por esta razón se realizaron una serie de reuniones en donde se determinó que por razones operacionales se fijaría un consumo de 44 Klb/h, que es lo estipulado por el diseño, para la operación normal, mientras que las condiciones especiales vendrían dadas por la disminución en la alimentación a las Unidades 14 y 16, de manera que si alguna de estas cargas disminuye de 30 MBD, la Unidad 15 tendrá un consumo de 84 Klb/h.

b) **Vapor de media presión:** Para este servicio no se realizaron gráficas, ya que al igual que el caso presentado en la generación de vapor de baja presión del Área 20, se manejan pequeñas cantidades consumidas o generadas en turbinas que pueden o no estar en operación. Por esta razón se fijaron las siguientes cantidades según lo estipulado en el diseño:

- 6,9 Klb/h para el consumo de vapor de media en la Unidad 14.
- 3,6 Klb/h para el consumo de vapor de media en la Unidad 15.
- 6,8 Klb/h para el consumo de vapor de media en la Unidad 16.
- 4,1 Klb/h para la generación de vapor de media en la Unidad 15.

c) **Vapor de baja presión:** El Vapor de baja presión no se consume en esta Área, sólo se genera en las Unidades 14 y 16 como vapor de extracción de unas turbinas en una cantidad dada por diseño de 5,7 Klb/h y 5,6 Klb/h, respectivamente. Para los casos en que no exista carga en las Unidades la generación será de cero (0 Klb/h), al igual que para todos los casos de carga nula.

- d) **Consumo de gas combustible:** Las Unidades consumidoras de este servicio, en esta Área, son la 14 y la 16, para las cuales se obtuvieron los siguientes diagramas (figuras N° 45 y N° 46 respectivamente)

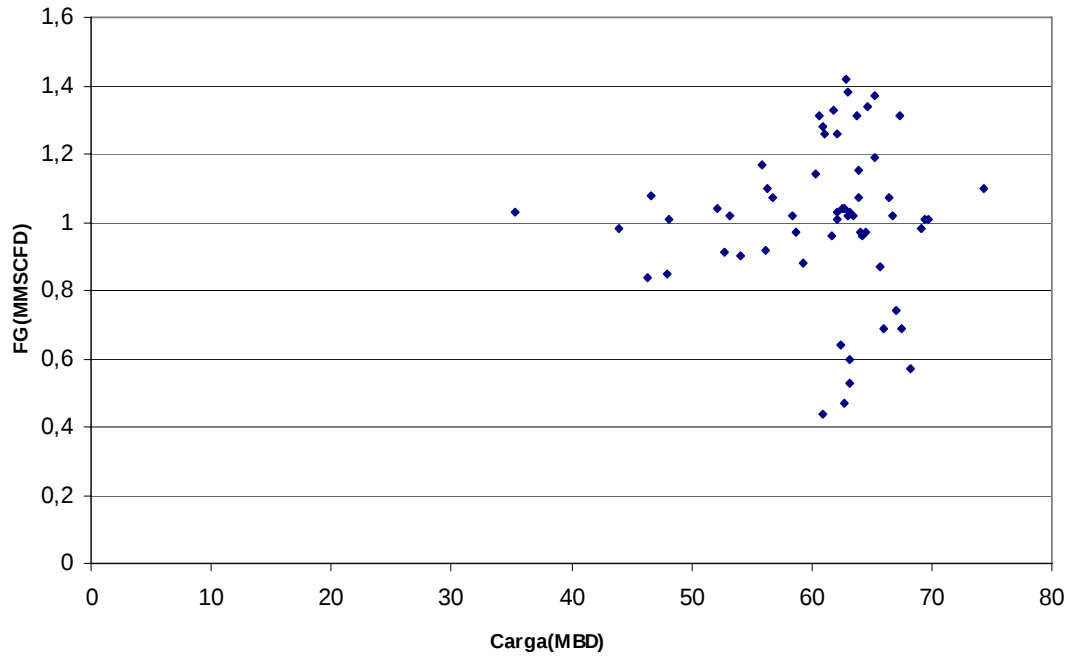


Figura N° 45. Consumo de gas combustible con respecto a la carga de la Unidad 14

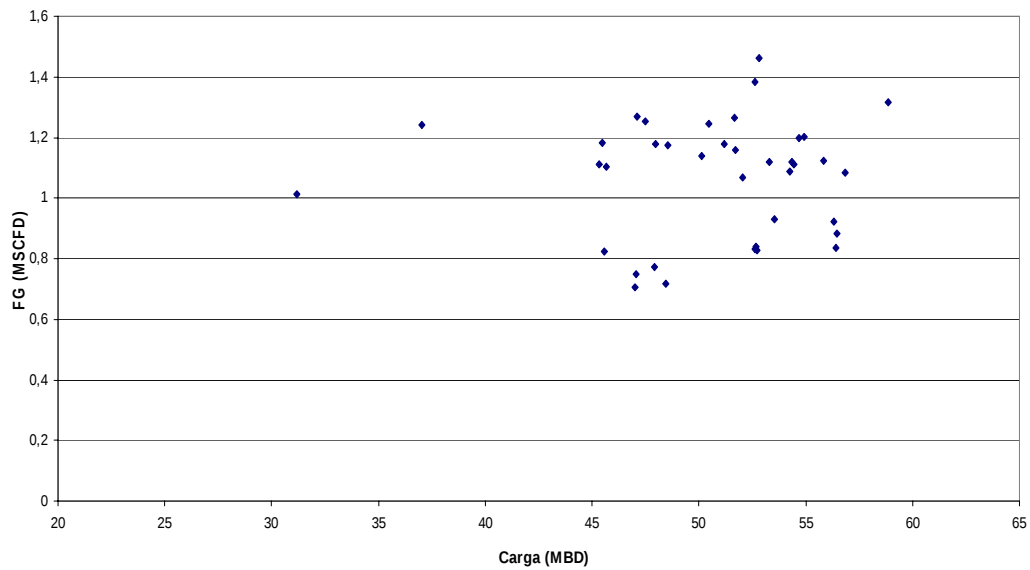


Figura N° 46. Consumo de gas combustible con respecto a la carga a la Unidad 16

En ambas figuras, se puede apreciar como no existe una buena correlación, sin embargo, se puede ver también como los valores tienden a estar en un rango bastante aproximado. Esta característica permite fijar un consumo para cualquier carga a las Unidades, valor que se asignó a través del promedio de los datos recogidos, siendo estos 1 MMSCFD, para Unidad 14, y 0,8 MMSCFD para la Unidad 16.

- e) **Generación de gas combustible:** Para los datos de producción de gas en esta Área, es decir, los correspondientes a la Unidad 15 (única Unidad generadora del servicio en esta Área). Los resultados obtenidos se presentan en la figura N° 47.

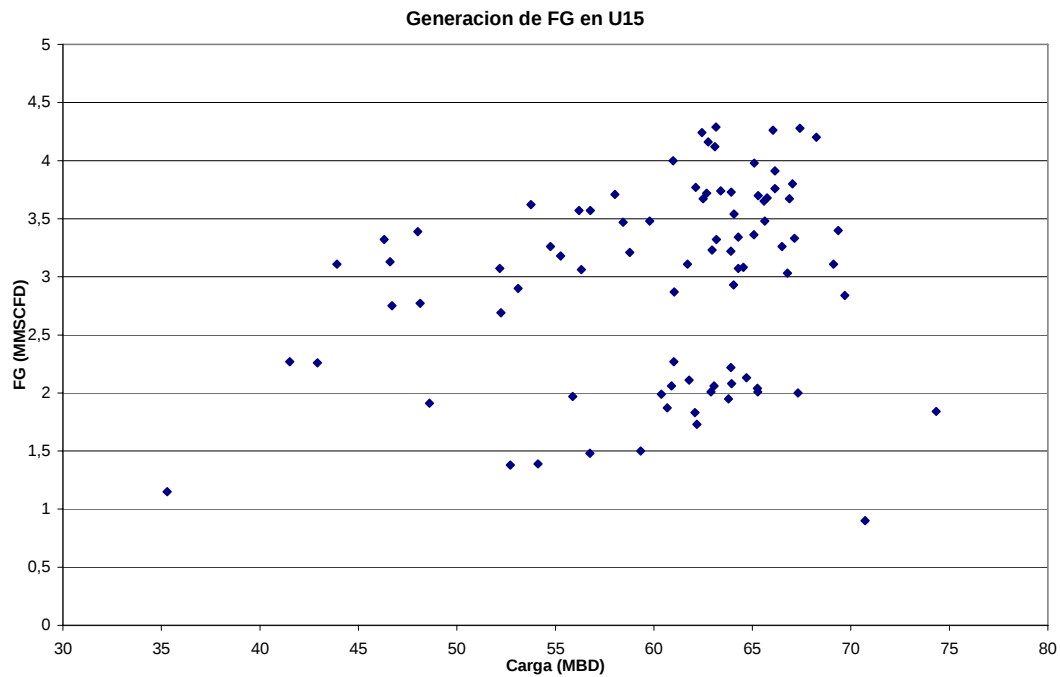


Figura N° 47. Generación de gas combustible con respecto a la carga la Unidad 15

Tal y como se puede apreciar en esta figura N° 48, no hay correlación adecuada para los datos, razón por la cual se decidió utilizar un valor de generación constante, igual que en el caso anterior (consumo de gas

combustible), lo cual resultaba posible debido a la poca cantidad que genera la Unidad.

Específicamente se fijó una cantidad constante de 3,5 MMSCFD de gas para todos los casos en que la Unidad esté en operación. En caso contrario el valor de generación del servicio será nulo.

Unidad 22. Producción de Hidrógeno: Para la unidad productora de hidrógeno y vapor de alta presión, se obtuvieron dos resultados por cada ítem de cada servicio, debido a que esta Unidad se divide en dos trenes de producción. A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada caso.

a) **Consumo de vapor de alta presión:** Para el primer tren se obtuvo la figura N° 48, la cual se muestra a continuación.

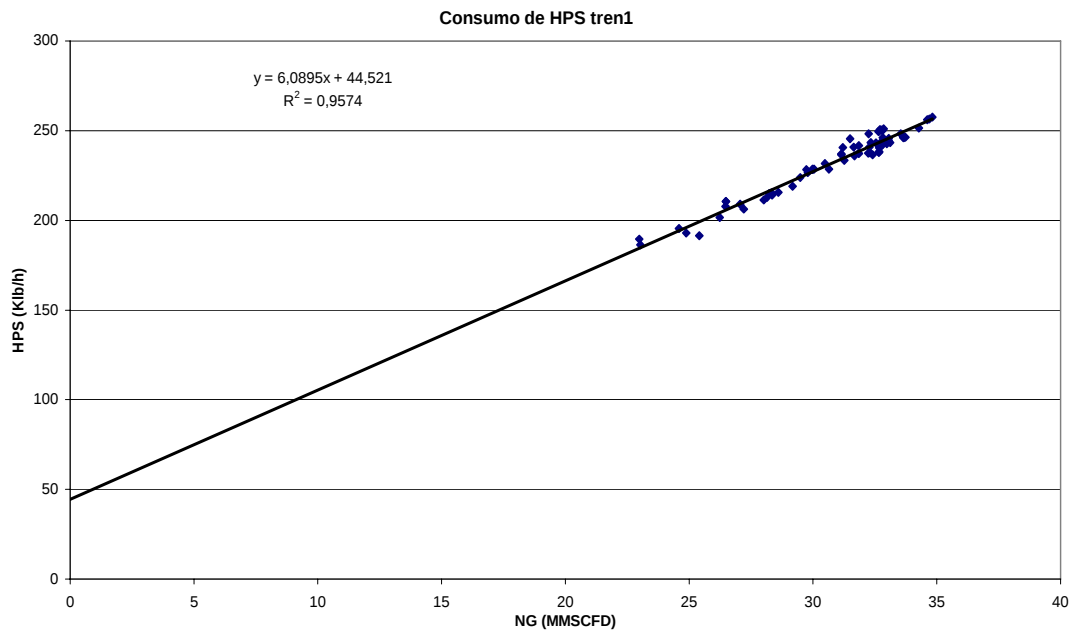


Figura N° 48. Consumo de vapor de alta presión con respecto a la carga al tren 1 de la Unidad 22

En esta figura queda demostrada la muy buena correlación que existe entre las variables, ajustada a una recta con una ecuación como la que

se muestra en la ecuación N° 12, utilizada en la herramienta de proyección para todo el rango.

$$VAP_{U22T1} = 6,0895 \frac{Klb}{MMSCFD \cdot h} * C_{U22T1} + 44,521 \frac{Klb}{h} \quad (30)$$

Donde,

VAP_{U22T1} : Cantidad de vapor de alta a consumir en el tren 1 de la Unidad 22 (Klb/h)

C_{U22T1} : Carga de gas natural al tren 1 de la Unidad 22 (MMSCFD)

Para el segundo tren se obtuvo la grafica expuesta en la figura N° 49, en la que se muestra una excelente correlación, dada por una recta.

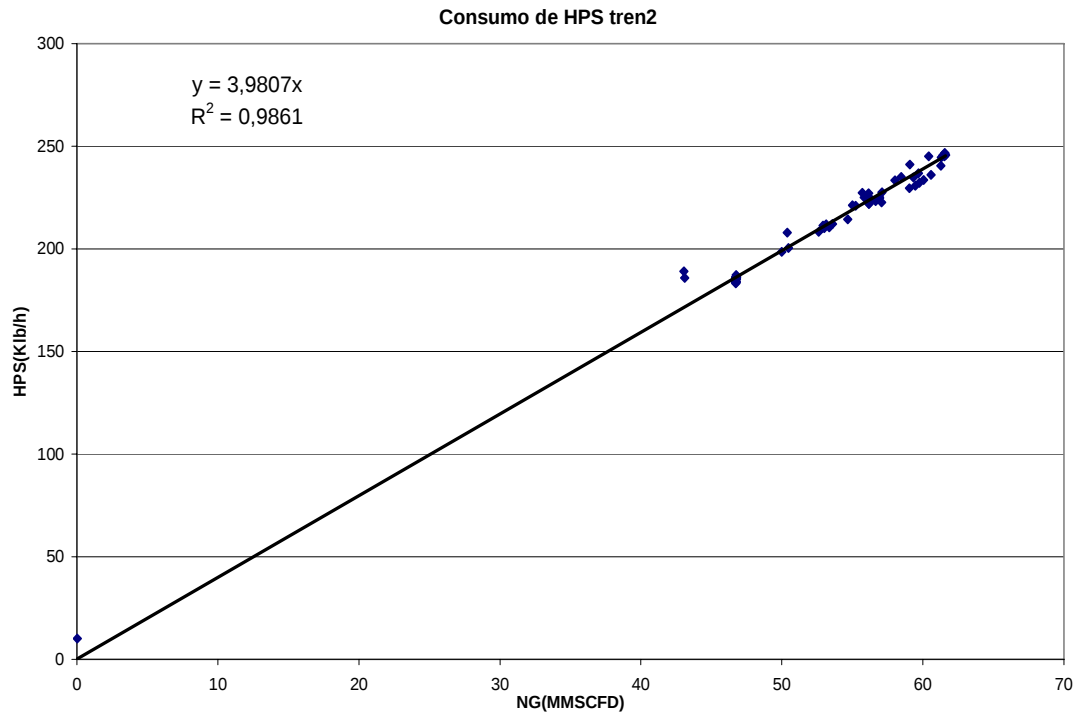


Figura N° 49. Consumo de vapor de alta presión con respecto a la carga del tren 2 de la Unidad 22

En la ecuación N° 31 se muestra la función matemática que correlaciona al servicio consumido en este tren con la carga al mismo.

$$VAP_{U22T2} = 3,9807 \frac{Klb}{MMSCFD \cdot h} * C_{U22T2} \quad (31)$$

Donde,

VAP_{U22T2} : Cantidad de vapor de alta a consumir en el tren 2 de la Unidad 22 (Klb/h)

C_{U22T2} : Carga de gas natural al tren 2 de la Unidad 22 (MMSCFD)

- b) **Generación de vapor de alta presión:** Por lo que se observa en el siguiente diagrama (figura N° 50) las variables se correlacionan bien con el ajuste cuadrático mostrado en la esquina del mismo, cuya forma en términos de las variables de estudio, se presenta a continuación en la ecuación N° 32.

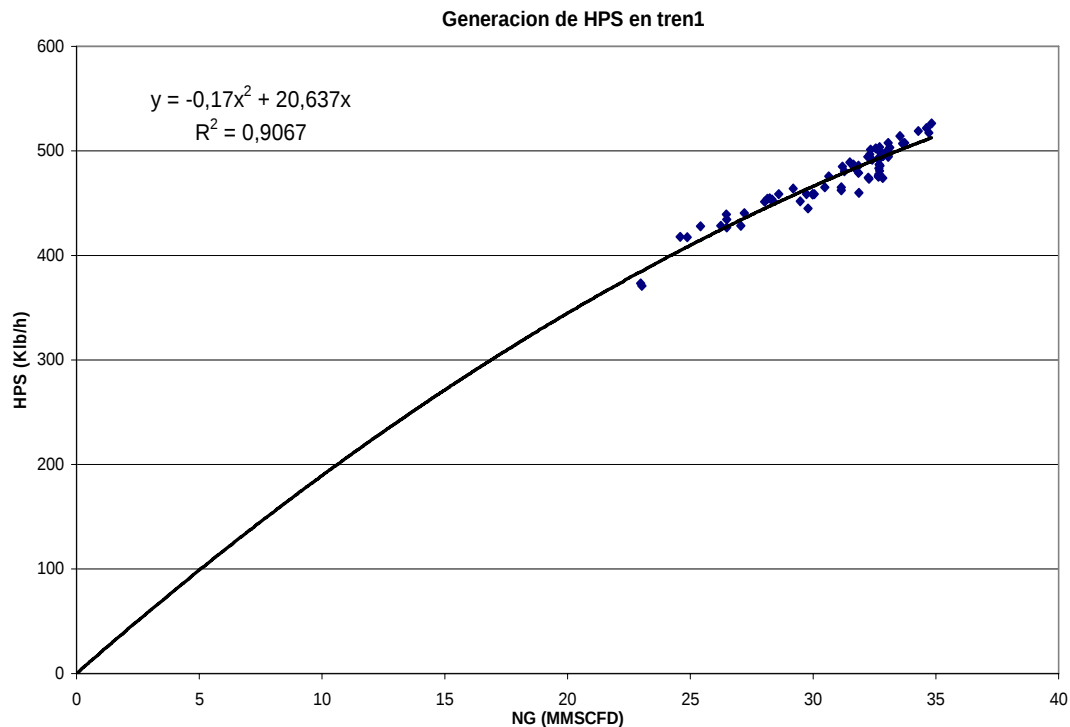


Figura N° 50. Generación de vapor de alta presión con respecto a la carga al tren 1 de la Unidad 22

$$VAPg_{U22T1} = -0,17 \frac{Klb}{MMSCFD^2 \cdot h} * C_{U22T1}^2 + 20,637 \frac{Klb}{h} * C_{U22T1} \quad (32)$$

Donde,

$VAPg_{U22T1}$: Cantidad de vapor de alta generada en el tren 1 de la Unidad 22 (Klb/h)

De igual forma se presenta a continuación, en la figura N° 51, la gráfica correspondiente al segundo tren de producción.

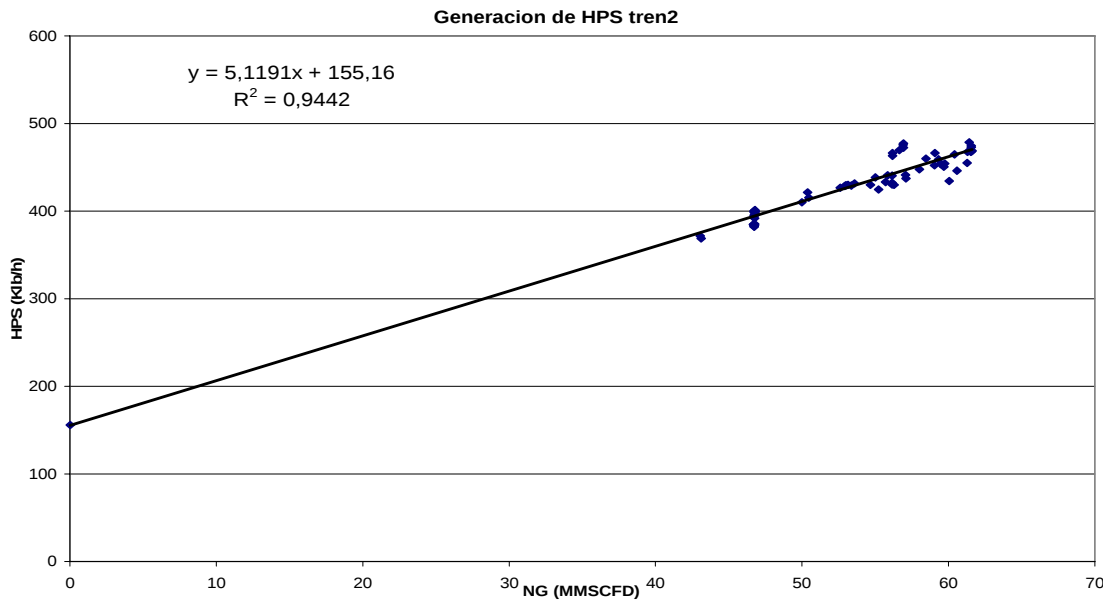


Figura N° 51. Generación de vapor de alta presión con respecto a la carga al tren 2 de la Unidad 22

Utilizando en la herramienta la ecuación N° 33, exhibida a continuación:

$$VAPg_{U22T2} = 5,1191 \frac{Klb}{MMSCFD \cdot h} * C_{U22T2} + 155,16 \frac{Klb}{h} \quad (33)$$

Donde,

$VAPg_{U22T2}$: Cantidad de vapor de alta generada en el tren 2 de la Unidad 22 (Klb/h)

- c) **Consumo de vapor de media presión:** El vapor de media presión en esta Unidad, sólo es consumido en pequeñas cantidades por un par de turbinas, que pueden o no estar en servicio, por lo tanto dicho gasto es constante, razón por la cual se fijaron para la herramienta, los valores dados por diseño, que son una cantidad de 1,9 Klb/h para cada tren de producción.
- d) **Vapor de baja presión:** Al igual que en el caso anterior esta Unidad consume cantidades constantes de este servicio, al igual que lo genera. Por esta razón se fijaron los siguientes valores para la herramienta:
- Un consumo para la Unidad igual a 8 Klb/h
 - Una generación para cada tren de la Unidad, igual a 67,9 Klb/h
- e) **Consumo de gas combustible:** El consumo de gas combustible varía muy poco, lo cual se puede apreciar en las graficas mostradas en las figuras N° 52 y N° 53, correspondientes a los trenes 1 y 2 respectivamente. Además de eso, las variables no parecen correlacionarse bien.

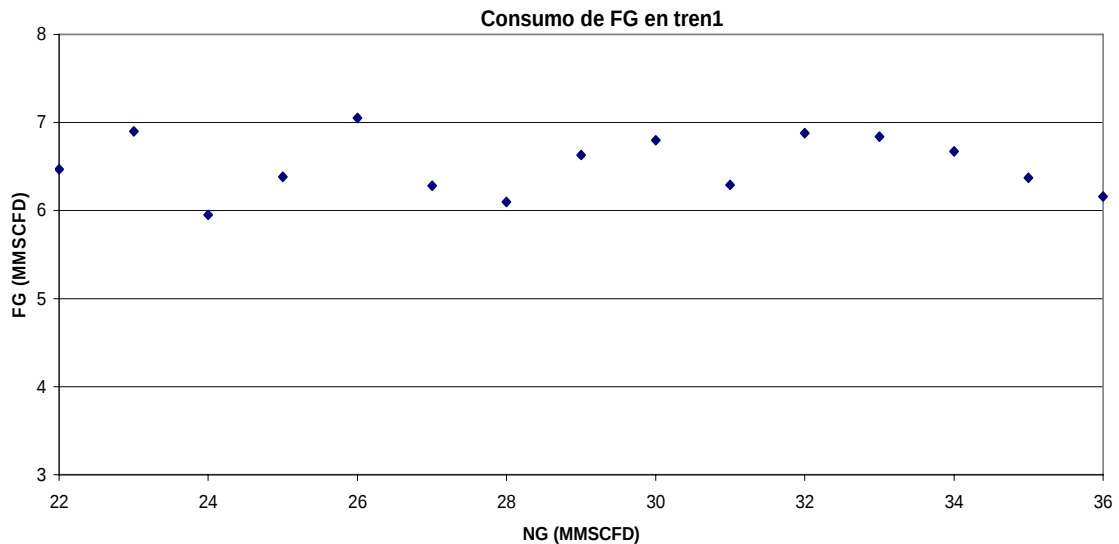


Figura N° 52. Consumo de gas combustible con respecto a la carga al tren 1 de la Unidad 22

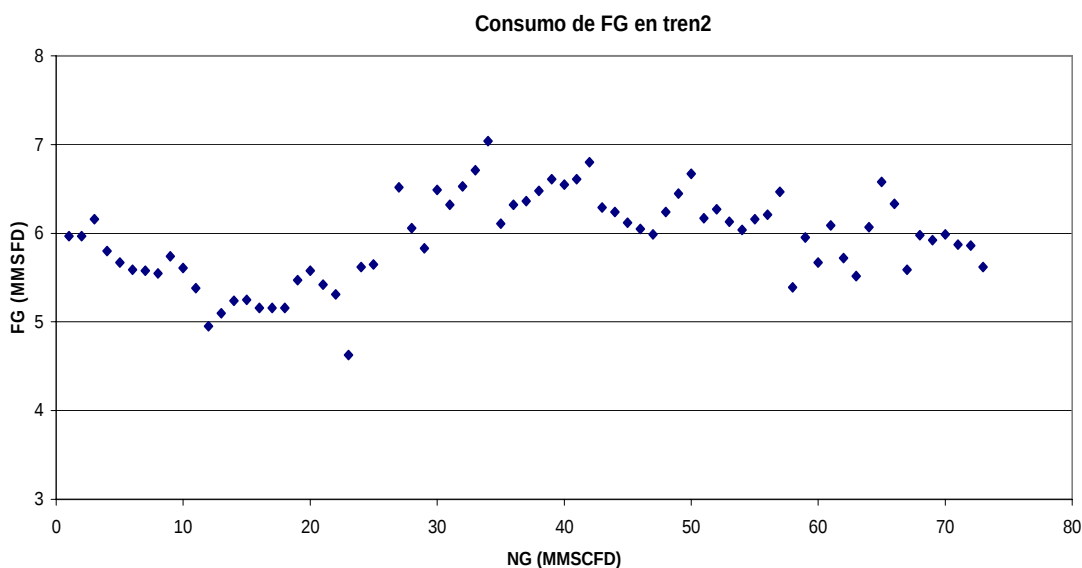


Figura N° 53. Consumo de gas combustible con respecto a la carga al tren 2 de la Unidad 22

Por esa razón es que se decide fijar un valor constante de 6 MMSCFD para ambos trenes, sin importar que cantidad de flujo se esté alimentando a la Unidad.

Área 70. Servicios Industriales (Unidades 42, 43, 46 y 47): El consumo de los servicios en estas Unidades es el menos dependiente de la carga a las mismas. Primeramente destaca el hecho de que ninguna de estas Unidades consume o genera gas combustible, ya que la Unidad 45, a pesar de ser el corazón de este servicio y de pertenecer al grupo de Unidades que conforman los servicios industriales, sólo se toma en cuenta como Unidad de mezcla de combustible (gas natural y gas de refinería), ya que sus flujos están siendo considerados a través de las verdaderas Unidades de generación expuestas en anteriores resultados.

Otra de las particularidades, radica en el consumo o generación de vapor en sus tres niveles de presión. Todos estos servicios en estas Unidades, a excepción del consumo de vapor de baja en la Unidad 43, dependen de cuántas turbinas estén en operación en cada una de las Unidades.

Por eso se fijó la cantidad de servicio según la cantidad de turbinas, del total de disponibles, en cada Unidad, de manera que el usuario introduce la cantidad de turbinas que operaran y a partir de este número se calcula el servicio. En tal sentido se fijaron las siguientes cantidades por diseño:

a) Unidad 42. Ósmosis Inversa:

- 10,3 Klb/h por cada turbina que consume vapor de alta; por lo tanto se generará la misma cantidad de vapor de baja

b) Unidad 43. Agua de Carga a Calderas y Recuperación de Condensados:

- 9,5 Klb/h por cada turbina que consume vapor de alta
- 8,9 Klb/h para la turbina de vapor de media
- 53 Klb/h de consumo general por diseño de vapor de baja presión
- Para la generación de vapor de baja presión se tendrá una cantidad igual a la sumatoria del consumo de vapor de alta y media presión (extracción total), más una cantidad fija dada por diseño de 8,7 Klb/h.

c) Unidad 46. Aire de Instrumentación:

- 22,1 Klb/h por cada turbina que consume vapor de alta; por lo tanto se generará la misma cantidad de vapor de baja

d) Unidad 47. Agua de Enfriamiento:

- 31,9 Klb/h por cada turbina que consume vapor de alta; por lo tanto se generará la misma cantidad de vapor de baja

Unidad 41. Generación y Distribución de Vapor: El caso de esta Unidad también fue bastante particular, pues para ella, en cuanto al consumo de vapor, no se podían establecer buenas correlaciones debido principalmente a que el consumo y generación (exceptuando la generación de vapor de alta presión), dependían de las otras unidades, pues hay que recordar que estas variables se manejan automáticamente para mantener el nivel de presión en cada uno de los cabezales, a través de las estaciones reductoras.

Debido a este particular, se introduce como carga a la Unidad, la misma cantidad de vapor de alta presión que se genera, luego el vapor de alta que se consume es la diferencia de lo producido en las calderas de esta Unidad más lo producido en la Unidad 22, menos lo consumido en todas las demás Unidades. En cuanto al vapor de media presión se generará la misma cantidad de vapor de alta que se consume, y se consumirá la diferencia de todo el vapor de media que se produzca (Unidades 12, 28, 15 y la misma 41), menos lo que se consume en todas las otras Unidades. Finalmente, para el vapor de baja, se repite el mismo patrón, solo que no se contempla un consumo de este servicio, pues el restante va a la recuperación de condensados que no forma parte de esta Unidad.

Debido a que la carga a la Unidad se tomaría como la misma cantidad de vapor de alta que se produciría, se graficaron los consumos de gas combustibles con respecto a estas variables, obteniendo los resultados que se exhiben en las figuras N° 54 y N° 55.

En ambas gráficas, correspondientes a cada una de las calderas ubicadas en la Unidad y responsables por la generación de vapor de alta presión, se puede notar como las variables se correlacionan de muy buena manera mediante rectas, con R^2 de 0,97 y 0,98 para las calderas 1 y 2, respectivamente

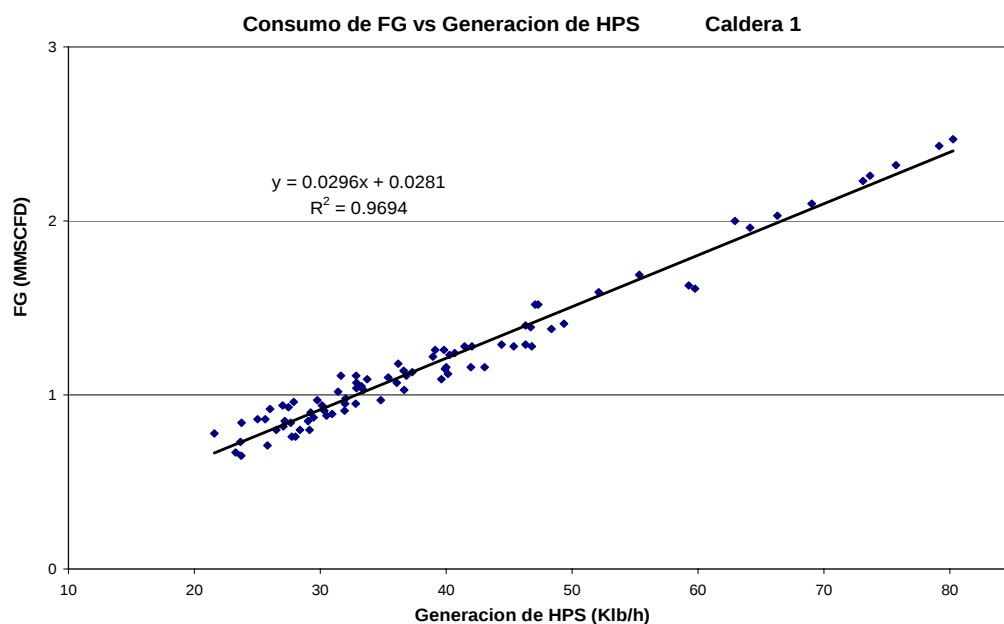


Figura N° 54. Consumo de gas combustible con respecto a la cantidad de vapor de alta generada en la caldera 1 de la Unidad 41

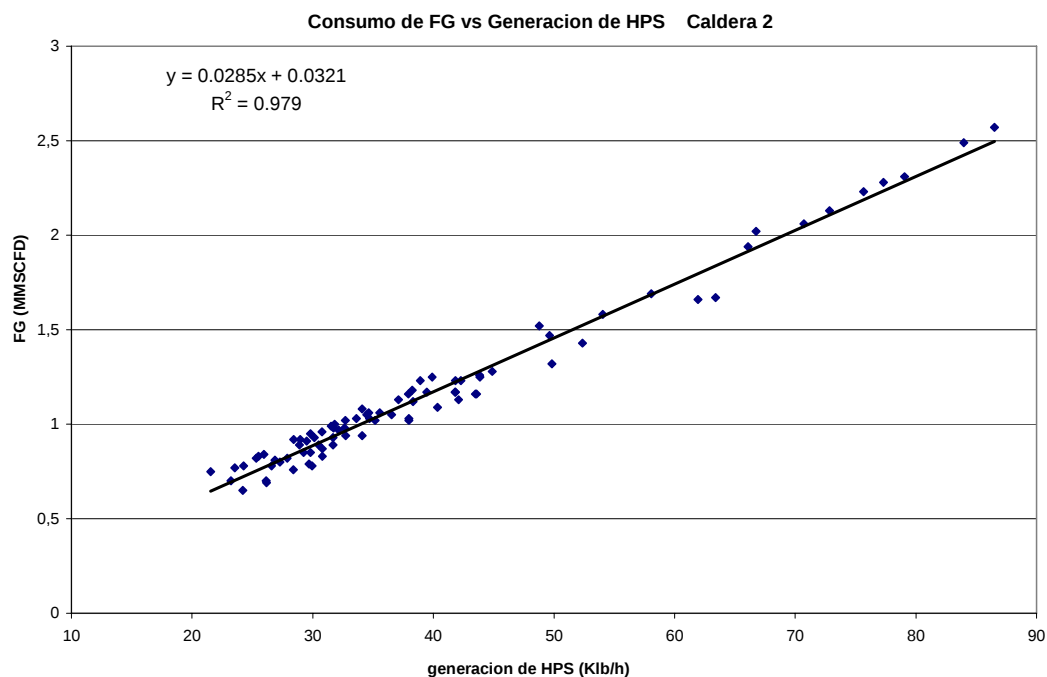


Figura N° 55. Consumo de gas combustible con respecto a la cantidad de vapor de alta generada en la caldera 2 de la Unidad 41

En la herramienta se colocaron entonces las ecuaciones N° 34 y N° 35 las cuales se muestran a continuación:

$$GC_{U41C1} = 0,0296 \frac{MMSCFD \cdot h}{Klb} * VAPg_{U41C1} + 0,0281MMSCFD \quad (34)$$

Donde,

GC_{U41C1} : Cantidad de gas combustible a consumir en la cald. N° 1 de la Unidad 41. (MMSCFD)

$VAPg_{U41C1}$: Cantidad de vapor de alta generada en la cald. N° 1 de la Unidad 41. (Klb/h)

$$GC_{U41C2} = 0,0285 \frac{MMSCFD \cdot h}{Klb} * VAPg_{U41C2} + 0,0321MMSCFD \quad (35)$$

Donde,

GC_{U41C2} : Cantidad de gas combustible a consumir en la cald. N° 2 de la Unidad 41 (MMSCFD)

$VAPg_{U41C2}$: Cantidad de vapor de alta generada en la cald. N° 2 de la Unidad 41 (Klb/h)

4.3.3.- Archivo ejecutable

Una vez que se obtuvieron las correlaciones y se fijaron los consumos, se procedió a crear el archivo ejecutable, el cual se llamó “Interfaz” y se presenta a continuación.

Este archivo consta de cuatro páginas, una para que el usuario introduzca las cargas a las Unidades, propias del escenario que desea recrear, y otra tres correspondientes a resultados.

La primera de estas páginas es la que se denominó “Data”, la cual, como se dijo anteriormente, es la página que permite al usuario de la herramienta manipular valores que representen un escenario específico a visualizar, bien sea en términos de carga a las unidades, características de los gases a utilizar o número de turbinas en servicio en ciertas unidades del Mejorador, tal y como se muestra en la figura N° 56. Cabe destacar que esta página es la única en la que el usuario puede introducir y cambiar valores a su antojo, ya que las otras páginas se bloquearon para que de esta forma el usuario no pudiese cambiar las ecuaciones ni los valores y de esta forma alterar la herramienta.

Microsoft Excel - interfaz

Archivo Edición Ver Insertar Formato Herramientas Datos Ventana ?

Escriba una pregunta

N16 fx

A B C D E F G H I J K

2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37

A continuación se dan los valores actuales de las Capacidades Caloríficas (LHV)

Poderes Caloríficos del Ref. G (Actual)	1223,47
Poderes Caloríficos del Nat. G (Actual)	897,74
Poderes Caloríficos del Fuel G (Actual)	1120,57

Por favor introduzca los valores estimados para la proyección a realizar

Poderes Caloríficos del RG	1223
Poderes Caloríficos del NG	898
Poderes Caloríficos del FG	1121

Ahora introduzca las cargas a cada una de las Unidades

Corrida de Credo (MBD)	252
Carga de Residuo de Yacio a U12 (MBD)	57
Carga de Gas Acido a U28 (MMSCFD)	10
Carga de Gas Acido a U29 (MMSCFD)	15
Carga de Líquido a U14 (MBD)	53
Carga de efluentes de los reactores a U15 (MBD)	50
Carga de pesados a U16 (MBD)	55
Carga de Fuel Gas al tren 1 de la U22 (MMSCFD)	30
Carga de Fuel Gas al tren 2 de la U22 (MMSCFD)	30
Generación de HPS por la Caldera 1 -U41- (Klb/h)	50
Generación de HPS por la Caldera 2 -U41- (Klb/h)	50

Numero de Turbinas en servicio (Area 70)

UNIDAD 43	2	Valor Aceptado
UNIDAD 46	1	Valor Aceptado
UNIDAD 47	3	Valor Aceptado
UNIDAD 42	2	Valor Aceptado

Resultados Globales

Resultados Específicos FG

Resultados Específicos Vapor

ACTUALIZAR

Data

Listo

Inicio Microsoft Excel - inter...

ES Escritorio

Figura N° 56. Pantalla de la página “Data” del archivo “Interfaz”

En la figura N° 56 se observa un primer campo con descripciones en azul oscuro, correspondiente a los valores de los poderes caloríficos actuales de las especies que conforman el gas combustible, así como el gas combustible en sí. Estos valores son descargados a través de la conexión de EXCEL con el ASPEN y el

sistema de control, permitiendo al usuario visualizar la situación actual en cuanto a manejo de combustible y a partir de allí, diseñar una situación, nueva o no, que fijará en el campo inferior, colocada en degradé de azules.

Más abajo se encuentra el tercer campo, correspondiente a la carga a cada una de las unidades, y debajo de éste, el campo correspondiente a las turbinas en operación. A mano derecha se encuentran cuatro botones, tres de estos (los primeros), son los que dan acceso a cada una de las páginas de resultados, mientras que el cuarto botón se utiliza para actualizar los datos y realizar con éstos las operaciones pertinentes.

Cabe destacar que los valores en color rojo son los que el usuario puede cambiar, además de que existen restricciones, por ejemplo con las celdas correspondientes a valores actuales que no pueden ser reescritas, o con el número de turbinas, cuyos valores no pueden ser negativos ni mayores al número de turbinas existentes, pues de lo contrario aparece una señalización del error.

La primera página de resultados es la que se denominó “Resultados Globales”, ya que en ésta sólo se presenta un recuadro informativo de cuánto se estaría generando, o consumiendo, de cualquiera de los servicios¹ en todo el Mejorador, así como la cantidad de gas natural que se requeriría para trabajar bajos las condiciones especificadas por el usuario. Ésta se puede ver en la figura N° 57.

Como se puede apreciar en dicha figura, esta página no tiene la pestaña que la identifica, así como tampoco tiene las pestañas de las otras páginas, esto se debe a que el usuario solo puede acceder a las páginas a través de la primera (“Data”), pues las otras permanecen ocultas. De igual forma se puede ver el recuadro que detalla el manejo de servicios con sus respectivas unidades, así como un botón a mano derecha, el cual se repite en las páginas restantes, que permite “volver” a la primera página, mostrada en la figura N° 56.

¹ Todo el gas combustible generado es consumido

Cantidades totales de los servicios en estudio

Fuel Gas Consumido (MMSCFD)	40,19
Gas Natural Necesario (MMSCFD)	77,92
HPS Generado (KLb/h)	874,84
HPS Consumido (KLb/h)	725,98
MPS Generado (KLb/h)	645,91
MPS Consumido (KLb/h)	156,75
LPS Generado (KLb/h)	898,09
LPS Consumido (KLb/h)	342,45

Volver

Excel status bar: Listo, NUM, ES Escritorio, 10:17 p.m.

Figura N° 57. Pantalla de la página “Res. Glob” del archivo “Interfaz”

La tercera página es la correspondiente a los resultados específicos de gas combustible, mostrando una tabla con el consumo o generación en detalle, de cada una de las Unidades involucradas, y en ciertos casos el detalle de equipos o secciones de una Unidad, como es el caso de la 22, en donde se hace la distinción de los trenes.

En la figura N° 58, se muestra como quedó la página de resultados específicos de gas, en donde se puede observar aparte de el consumo y la generación de gas combustible (gas de refinería para la Unidad 15 y el Área 20), una columna con el consumo equivalente de gas natural, obtenido por la relación de los capacidades caloríficas, para así determinar cuanto de gas natural sería necesario introducir a la planta para cumplir con los requisitos energéticos. De igual forma se puede apreciar como existen valores en color verde en alguna de las celdas, y esto se debe a que son valores que no están siendo calculados, es decir, son valores que se mantienen

constantes pues no se correlacionaban con la carga, y han sido fijados en base a promedios o por diseño.

Microsoft Excel - interfaz

Archivo Edición Ver Insertar Formato Herramientas Datos Ventana ?

Escriba una pregunta

Arial 10 N K S

K13

A	B	C	D	E	F	G	H	I
1					Capacidad Calorifica del RG	1223		
2	Corrida de Credo (MBD)				Capacidad Calorifica del NG	898		
3	252				Capacidad Calorifica del FG	1121		
4	Area o Unidad		Carga	Consumo FG (MMSCFD)	Produccion FG (MMSCFD)	Cons. Eq. De GN (MMSCFD)		
5	Soporte	Udad. 22	Trea 1	30	6	0	-7,49	
6		Trea 2	30	6	0	-7,49		
7		Udad. 41	Cald.1	50	1,46	0	-1,82	
8			Cald.2	50	1,51		-1,88	
10	Proceso	Udad. 10		252	17,22	0	-21,50	
11		Area 20		57	6,2042	20,6947	19,73	
12		Udad. 28		25	0	0	0,00	
13		Area 50	Udad. 14	53	0,8	0	-1,00	
14			Udad. 15	50	0	3,5	4,77	
15			Udad. 16	55	1	0	-1,25	
16	TOTAL						-77,323	

Volver

11 Data / Res.Glob / Res. Esp. FG / Res. Esp. Vapor /

Figura N° 58. Pantalla de la página “Res. Esp. FG” del archivo “Interfaz”

La última de las páginas que conforman este archivo, es la de los resultados específicos de vapor, la cual muestra en detalle como se manejan los servicios de vapor de alta, de media y de baja presión, tal y como se muestra en la figura N° 59, en la que se puede apreciar, aparte de los elementos antes mencionados en otras páginas, como los valores constantes, la falta de pestañas y el botón “volver”, una celda con el valor de la disponibilidad rodante, que es la cantidad adicional de vapor de alta presión que se pudiese producir en las calderas diseñadas para generar un máximo de 200 KLb/h .

Microsoft Excel - interface1.1

Archivo Edición Ver Insertar Formato Herramientas Datos Ventana

Escriba una pregunta

R15

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
2		Carrida de Gruda (MBD)								
3		252								
4		Area Unidad	Carga	Consumo de HPS (Kil/h)	Generacion de HPS (Kil/h)	Consumo de MPS (Kil/h)	Generacion de MPS (Kil/h)	Consumo de LPS (Kil/h)	Generacion de LPS (Kil/h)	
5	Soporte	Udad. 22	Tran 1	30	227,21	466,11	1,9	0		67,9
Tran 2			30	119,42	466,11	1,9	0		67,9	
Udad. 41		Cald.1	50	346,24	50	409,16	346,2383	0	409,16	
		Cald.2	50		50			0		
10	Proceso	Udad. 10		252	43,09	0	86,72	0	71,28	31
11		Area 20		57	32,00	0	19,428	140,8185	0	4
12		Udad. 28		25	10,46	0	0	154,753	210,1675	51,8281
13		Area 50	Udad. 14	53	30,00	0	6,9	0	0	5,7
14			Udad. 15	117,23	44,00	0	3,6	4,1	0	0
15			Udad. 16	55	43,00	0	6,8	0	0	5,6
16	Servicios	Udad. 42			0	0	20,6	0	0	20,6
17		Udad. 43			19	0	8,9	0	53	36,6
18		Udad. 46			22,1	0	0	0	0	22,1
19		Udad. 47			95,7	0	0	0	0	95,7
20	TOTAL				685,98	1032,22	156,75	645,91	342,45	990,09
21										
22	Disponibilidad Rodante									
23	100,00									
24	Volver									

NUM

Figura N° 59. Pantalla de la página “Res. Esp. Vap” del archivo “Interfaz”

4.4.- Manuales de Operación

Como se mencionó en la metodología, el resultado final se basó en presentaciones en diapositivas, en la entrega en sí de los archivos electrónicos que conformaban cada una de las herramientas y en la entrega de dos notas técnicas. Las presentaciones en MICROSOFT POWER POINT, fueron netamente informativas y no constituyen en sí mismas un resultado; de los archivos electrónicos (herramientas a utilizar), ya se trató en secciones anteriores, de manera que no se redundará en el tópico, pero si se debe resaltar lo obtenido en las notas técnicas.

Las notas técnicas son los documentos escritos que quedan archivados en la biblioteca de la empresa y dan constancia del trabajo realizado, quedando al alcance del que así lo desee. En éstas se exponen las razones que generaron el desarrollo del proyecto, los objetivos que se perseguían, las premisas que se tomaron, la metodología, los resultados obtenidos, las recomendaciones, las conclusiones y los manuales operativos de las herramientas.

No obstante, no se presentarán en esta sección las notas técnicas como tal, pues en la mayoría de su contenido se presenta un resumen de lo que se ha presentado hasta entonces en este trabajo; en su lugar se presentarán los instructivos encartados en ellas, que son en realidad el resultado de mayor importancia de esta sección.

A continuación se presentan los manuales operativos a ser utilizados por los usuarios de cada una de las herramientas electrónicas.

4.4.1.- Herramienta de evaluación hidráulica.

Esta herramienta ha sido creada de forma tal que permita ir cambiando y creciendo a medida que se utiliza. Originalmente ha sido creada con cinco (5) archivos, correspondientes a las simulaciones del caso base y de los cuatro escenarios desarrollados, sin embargo, el usuario tiene la opción, no sólo de ver y utilizar estos archivos, si no de modificarlos para crear archivos nuevos, lo cual es una de las mayores ventajas de la herramienta. En las siguientes sub-secciones se exhiben las instrucciones para usar de manera adecuada la herramienta y obtener los resultados deseados.

- ❖ **Inicio:** Una vez que se ha entrado en el programa INPLANT, se debe abrir cualquiera de los archivos que constituyen la herramienta, lo cual se puede hacer por dos formas, desde el menú principal o desde la barra de herramientas, cuya diferencia radica en la rapidez del proceso.

Para acceder a la apertura de archivos desde el menú principal, encontrado en la parte superior de la pantalla en forma de una pestaña con palabras claves, tal y como se ve en la figura N° 60 (debajo de las palabras “SimSci INPLANT:” seguido del nombre del archivo), se debe hacer clic en “File”; seguidamente aparecerán una serie de opciones. Hacer clic en “Open Existing File” para que aparezcan las carpetas con archivos creados.

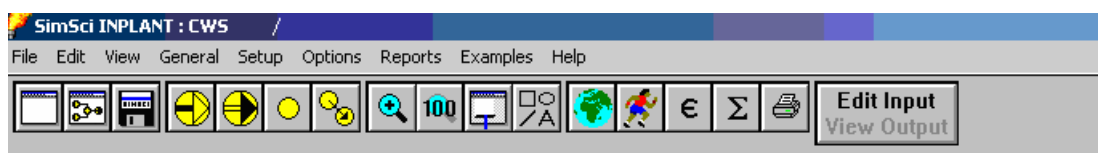


Figura N° 60. Ambiente de trabajo INPLANT

Para hacerlo desde la barra de herramientas (ubicada justo debajo del menú principal, como se puede apreciar en la figura N° 60) se debe hacer clic en el segundo botón de izquierda a derecha, en seguida aparecerán las diferentes carpetas archivadas.

Luego, se debe hacer doble clic en la carpeta llamada “CWS”, en donde aparecerán las cinco posibles opciones:

- CASOBASE: Para abrir la simulación del Caso Base.
- CBOMBA: Para abrir la simulación del caso en donde solo operan dos bombas.
- CRUGOS: Para abrir el caso en donde se aumentó el doble de la rugosidad
- CFUT: Para abrir el caso en donde se está operando una posible Unidad futura.
- CDIAMD: Para abrir el caso en donde se aumentó el diámetro hasta el máximo (48 pulgadas)

Al hacer doble clic en cualquiera de las posibilidades, se cargará y se abrirá el archivo, mostrando en pantalla el diagrama de flujo del sistema.

❖ **Revisión de resultados:** Una vez que se tiene abierto un archivo, o se ha corrido una simulación, se pueden visualizar los diferentes resultados que ofrece el programa, los cuales son el reporte de errores, el sumario de resultados y el resultado por cada puerto.

a) **Reporte de errores:** Éste es un archivo de texto, en donde aparece un reporte de todas las etapas que se alcanzaron durante la corrida, con sus respectivas advertencias y errores, si es que existen. Si la corrida es satisfactoria no aparecerá error alguno, mas se puede alcanzar una solución con una que otra advertencia.

Para acceder al reporte de errores se puede hacer clic, directamente en la barra de herramientas, sobre el botón que muestra la letra griega ϵ . También se puede ingresar al mencionado reporte haciendo clic en la palabra “reports” ubicada en el menú principal, y luego clic en “Error Report”.

b) **Sumario de resultados:** Este sumario es un archivo de texto que muestra la temperatura, la presión y el flujo alcanzado en todos los puertos del archivo, es decir, en todos los “sources” (salidas) y “sinks” (llegadas).

Para acceder a este sumario se puede hacer clic directamente en el botón que muestra la letra griega Σ , ubicado al lado derecho del botón del reporte de errores en la barra de herramientas. También se puede ingresar entrando a “reports” del menú principal y luego en “Result Summary”

- c) **Resultado por puerto:** Esta opción permite ver la presión, la temperatura y el flujo alcanzado en alguno de los puertos, incluso en los “junction” (nodos).

Para ello se debe hacer clic en el último botón (el de mayor tamaño), el cual tiene dos frases correspondientes a dos opciones, “Edit Input” y “View Output”, para así activar el modo “View Output”, lo cual estará listo una vez que la frase se coloree de negro (ver figura N° 61). Esto se hace porque por defecto, el programa inicia en modo “Edit Input”, sin embargo, en cualquiera de los casos, cada vez que haga clic sobre este botón se cambiará de modalidad.

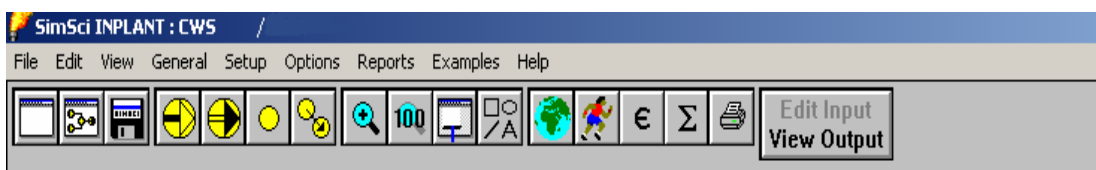


Figura N° 61. Ambiente INPLANT en modo para ver resultados (“View Output”)

Una vez que la herramienta está en modo para ver los resultados, se procede a hacer clic en cualquiera de los puertos, apareciendo una ventana informativa con la presión, la temperatura y el flujo que tiene dicho puerto.

- ❖ **Introducción de cambios:** Existen diversas formas de lograr variaciones en los archivos ya creados, bien sea menores o radicales, para crear nuevos escenarios o no, etc. Éstas se muestran a continuación.

- a) **Cambios de valores en los puertos:** Para lograr estos cambios se debe estar en modalidad “Edit Input” (colocando en negro la opción como se mencionó anteriormente) y luego hacer doble clic en el puerto en donde se quiera realizar la modificación. Aparecerá una ventana similar a la mostrada en el ejemplo de la figura N° 62 para el caso de las “sources” o como la de la figura N° 63, para el caso de los “sinks”.

Figura N° 62. Ventana de introducción de valores para una source. Ejemplo de la bomba A (PA)

Figura N° 63. Ventana de introducción de valores para un sink. Ejemplo del Área 70 (A70)

Una vez abierta la ventana, se encuentran los campos disponibles para fijar o estimar presiones, flujos, y en el caso de los “sources” también la temperatura. Una vez que se ha realizado el cambio se presiona el botón “OK” si se está de acuerdo o “Cancel” en caso contrario; en cualquiera de los dos desaparecerá la ventana.

- b) **Deshabilitación o habilitación de puertos:** De forma similar a la explicada en el punto anterior, se entra en el puerto deseado para que aparezca la ventana correspondiente al puerto (tal como se ejemplifica en las figuras N° 63 o N° 64). Si se desea deshabilitar se hace clic una

vez a la izquierda del mensaje “disable source” o “disable sink”, según sea el caso, hasta que aparezca la marca en el recuadro (ver figura N° 64). Si por el contrario se requiere el puerto activo, el recuadro debe estar vacío.

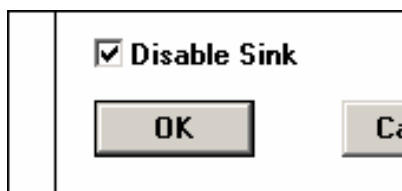


Figura N° 64. Recuadro de desactivación. Ejemplo de “sink” que se deshabilita

Al deshabilitar un puerto, se debe deshabilitar la o las líneas asociadas a éste, lo cual se hace de forma similar que con los puertos.

- c) **Cambios globales en todo el sistema:** Estos cambios se realizan para cambiar las propiedades del agua, la rugosidad de las tuberías, la temperatura del aire o su velocidad, etc.

Para realizar cambios de este tipo se puede hacer clic en la opción “General” del menú principal y luego en “Global Defaults”, o se puede ir directamente haciendo clic en el botón que tiene un símbolo de globo terráqueo. Aparecerá la ventana correspondiente y se realizan los cambios en los campos destinados para tal fin.

- d) **Cambios en las líneas:** Para realizar estos cambios nuevamente la herramienta debe estar en modo “Edit Input” y se debe hacer doble clic sobre la línea a cambiar, para así ingresar en una página que contiene el detalle de toda la línea, todos los tramos de tubería y todos los accesorios. De esta forma se debe hacer doble clic en cada uno de los componentes de dicha línea que se quieran cambiar, las dimensiones, el tipo de accesorio, etc.

Cabe destacar que si se cambia el diámetro de un tramo de tubería o accesorio, se debe cambiar consistentemente los accesorios y tuberías ligados a este.

- ❖ **Corrida de simulaciones:** Para correr la simulación se debe hacer clic en el botón que tiene el dibujo del hombre corriendo, ubicado en la barra de herramientas del programa, enseguida aparecerá una ventana negra indicando las etapas en que se encuentra la corrida, una vez que la misma desaparezca, el proceso habrá terminado.

Es posible que aparezcan una o dos ventanas de advertencia. Si la ventana indica que el máximo de usuarios ha sido alcanzado, la corrida no se podrá llevar a cabo por falta de licencia online en ese instante, por lo tanto se debe esperar y repetir la operación en otro momento. Si el mensaje indica la falta de un archivo de tipo .DLL, se debe hacer clic en “Ignore”, ya que este tipo de archivos no afectan los resultados.

Posteriormente se deben revisar los resultados obtenidos (tal y como se explico anteriormente), especialmente el reporte de errores, para ver como se llevó a cabo la corrida.

- ❖ **Guardar el trabajo realizado:** Una vez que se han realizado modificaciones de algún tipo, se recomienda guardar en un archivo diferente con la finalidad de salvar los cambios realizados, los cuales constituyen en sí un escenario diferente, sin perder la información del caso original abierto. Para llevar a cabo esta acción se debe ingresar nuevamente a “File”, del menú principal, y luego a “Save as...”, se dejará fijo el tipo de proyecto, y la carpeta en la cual se encuentra, tan sólo se cambiara la descripción (por ejemplo: Caso en que no operan la Unidad 57) y el nombre en si del archivo (por ejemplo: CDU57).

Una vez que se ha guardado el archivo de esta forma, cualquier cambio menor para ese escenario se puede guardar directamente bajo ese mismo nombre

entrando a “File” y posteriormente a “Save”. Esta tarea se puede realizar directamente desde la barra de herramienta, seleccionando el tercer botón de izquierda a derecha.

4.4.2.- Manual de operación de la herramienta de proyección de consumos

La herramienta de proyección de consumos de vapor y gas combustible ha sido diseñada para que el usuario introduzca los valores y cree diferentes escenarios y almacene los resultados en un lugar aparte, ya que no permite que el usuario tenga acceso a las páginas de cálculo.

- ❖ **Inicio:** Para ingresar en la herramienta, se puede directamente ubicar el archivo “Interfaz” y hacer doble clic sobre el mismo, o se puede abrir MICROSOFT EXCEL y una vez allí buscar el archivo.

Para buscar la herramienta desde EXCEL, se puede proceder de diversas formas, entrando a “Archivo” en el menú principal y luego en “Abrir...”, haciendo clic en el segundo botón de la barra de herramientas, o, mucho más directamente, presionando “Ctrl. + A” en el teclado. Seguidamente aparecerá una ventana donde se buscará y seleccionará manualmente el archivo.

- ❖ **Creación de escenarios:** Una vez que se abre el archivo “Interfaz” (la herramienta de proyección de consumos), aparece una única página llamada “DATA”. Los valores que en esa página se encuentran en color rojo, son los destinados a ser cambiados por el usuario, mientras que los de negros no se pueden modificar.

En la parte superior izquierda, en color azul oscuro, aparece una zona informativa, que muestra los valores actuales de los poderes caloríficos del gas natural (“Nat. G”), del gas de refinería (“Ref. G”) y del gas de combustible (“Fuel G”) que se manejan en el Mejorador, para fijar una

referencia y a partir de estos desarrollar escenarios en donde se mejoren o empeoren las condiciones energéticas del Mejorador.

Un poco más abajo aparece el sector destinado para que se introduzcan los valores de poderes caloríficos del gas de refinería (“RG”), gas natural (“NG”) y gas combustible (“FG”), correspondientes al escenario a proyectar, a partir de la referencia creada en la zona anterior. Este sector se puede apreciar en la siguiente figura (Nº 65).

Por favor introduzca los valores estimados para la proyección a realizar	
Poderes Caloríficos del RG	1223
Poderes Caloríficos del NG	898
Poderes Caloríficos del FG	1121

Figura Nº 65. Segundo sector superior izquierdo. Introducción de poderes caloríficos

También se pueden crear nuevos escenarios modificando las cargas a las Unidades. Para ello se destinaron dos sectores que se pueden apreciar en la figura Nº 66, uno para cambiar las cargas y otro para cambiar la cantidad de turbinas en operación. Cada cambio hecho, así sea en la carga a una sola Unidad, constituye un escenario diferente.

Ahora introduzca las cargas a cada una de las Unidades	
Corrida de Credo (MBD)	252
Carga de Residuo de Vacio a U12 (MBD)	57
Carga de Gas Acido a U28 (MMSCFD)	10
Carga de Gas Agrio a U28 (MMSCFD)	15
Carga de Livianos a U14 (MBD)	53
Carga de efluentes de los reactores a U15 (MBD)	50
Carga de pesados a U16 (MBD)	55
Carga de Fuel Gas al tren 1 de la U22 (MMSCFD)	30
Carga de Fuel Gas al tren 2 de la U22 (MMSCFD)	30
Generación de HPS por la Caldera 1 -U41- (Kib/h)	50
Generación de HPS por la Caldera 2 -U41- (Kib/h)	50

Numero de Turbinas en servicio (Area 70)		
UNIDAD 43	2	Valor Aceptado
UNIDAD 46	1	Valor Aceptado
UNIDAD 47	3	Valor Aceptado
UNIDAD 42	2	Valor Aceptado

Figura Nº 66. Sector para la introducción de cargas y turbinas en operación.

Si se colocan valores (en la parte del número de turbinas) no adecuados con la realidad, por ejemplo valores negativos, o más turbinas de las que se dispone en esa Unidad, la herramienta envía una señal de alerta para que se modifique el error, en caso contrario aparecerá la frase “valor aceptado”.

- ❖ **Actualización de resultados:** Para actualizar los resultados cada vez que se requiera correr un escenario, se debe hacer clic en el botón que dice “ACTUALIZAR”, ubicado en el sector derecho de la herramienta, tal y como se muestra en la figura N° 67.

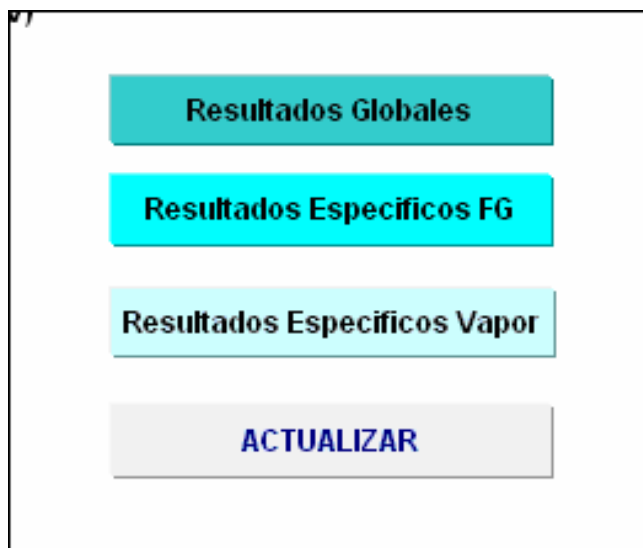


Figura N° 67. Sector botones. Actualización y visualización de resultados

- ❖ **Visualización de los resultados:** Para acceder a los resultados se debe presionar, en el sector derecho de la herramienta, el botón correspondiente al tipo de resultado que se desee ver, según las opciones dadas, como se aprecia en la figura N° 67.

Los Resultados Globales muestran la cantidad total de gas combustible que se está consumiendo, la cantidad de gas natural que se debe comprar, y las cantidades totales de consumo y generación para los tres niveles de vapor.

Los Resultados Específicos de Gas Combustible (“Resultados Específicos FG”) muestran la cantidad que se está consumiendo o generando en cada una de las Unidades involucradas, así como el consumo equivalente de gas natural en las mismas y la cantidad de gas natural que se necesita para suplir las necesidades energéticas del Mejorador para el escenario creado.

Finalmente, los Resultados Específicos de Vapor, mostrarán la cantidad de vapor de alta, media y baja presión que se está generando o consumiendo en cada unidad.

Entre las páginas de resultados no hay un enlace directo, de manera que luego que se vean ciertos resultados se debe regresar la página “DATA”, a través del botón “Volver” ubicado en cada una de las páginas de resultados.

- ❖ **Guardar cambios realizados:** Para salvar se debe hacer clic en “Archivo” y luego en “Guardar”, o hacer clic en el tercer botón de la barra de herramientas (símbolo con un diskette), simplemente teclear “Ctrl. + G”.

CONCLUSIONES

Luego de haber desarrollado las herramientas y de haber terminado el proceso de análisis de resultados, se ha llegado a las conclusiones que se exponen a continuación.

- Los sistemas de agua de enfriamiento y de vapor, tienen una constitución cíclica, en donde parte de lo que se utiliza para una función determinada, es devuelta para ser reutilizada. Por su parte el sistema de gas combustible se desplaza exclusivamente en una sola dirección.
- Las pérdidas de presión debidas a la diferencia de altura, son más significativas que las correspondientes al efecto de la fricción.
- El sistema de distribución de agua de enfriamiento no presenta irregularidades hidráulicas mayores, es decir, el flujo se entrega a los consumidores de forma normal.
- Existe una caída de presión de aproximadamente 10 psi, entre las bombas y el límite de batería de la Unidad 47.
- El medidor de presión con conexión al sistema de control, ubicado en el límite de batería de la Unidad 47, da una lectura errónea de la medición, con una desviación por exceso de aproximadamente 10%.
- Las tuberías que llevan el agua de enfriamiento hacia las unidades 61 y 65, parecen estar sobredimensionadas, ya que el flujo por diseño para estas Unidades está por debajo del flujo necesario para obtener la velocidad mínima requerida.
- Es posible que hacia la Unidad 61 y hacia el Área 70, existan obstrucciones menores, sin embargo, no se puede dar como definitiva esta determinación, ya que no se tiene el flujo exacto asociado a las presiones reales halladas para esos puntos.

- El flujo de agua de enfriamiento hacia la Unidad 65 es el más sensible a las pérdidas de presión por fricción, debido a la mayor cantidad de accesorios que presenta en su línea de distribución.
- El caso de diseño no se alcanzó en la realidad, trabajándose con una cantidad mayor de flujo que el esperado.
- La herramienta de evaluación hidráulica queda validada, sin embargo, se debe realizar un nuevo caso basado en los flujos y presiones reales del sistema, y no en el caso dado por diseño, para así obtener mejores resultados.
- En caso de trabajar con dos bombas impulsando el agua de enfriamiento, la limitante no es la presión, ya que los niveles de presión se mantienen. Un factor a considerar es el flujo ya que sólo se puede entregar el 72% de lo dado por diseño, lo cual tiene un impacto negativo en el intercambio de calor que se debe llevar a cabo en las Unidades consumidoras del servicio.
- Los flujos en las bombas de la Unidad 47, no pueden ser iguales entre sí, a menos que se varíe la presión de descarga.
- Un aumento del 100% de la rugosidad de la tubería no implica mayores pérdidas de presión en las llegadas del servicio líquido, de manera que se puede trabajar bajo las mismas condiciones durante el tiempo adecuado para alcanzar una rugosidad igual a 0,0036 pulgadas.
- Existe capacidad hidráulica en el servicio de agua de enfriamiento para ampliar la cantidad de plantas en el Mejorador, con una disponibilidad de aproximadamente 2914 gpm.
- Al aumentar el diámetro en la tubería de descarga de las bombas de la Unidad 47, se obtiene una disminución poco significativa en la caída de presión entre las bombas y el límite de batería de la misma.
- No se justifica la inversión para cambiar las tuberías que conectan las bombas del sistema de distribución de agua de enfriamiento, con el cabezal principal del sistema.

- El estudio hecho para realizar la herramienta de proyección de consumos, se llevó a cabo en un período de tiempo de mucha inestabilidad operacional, lo cual fue contraproducente para lograr el mejor de los resultados.
- Se obtuvieron resultados totalmente satisfactorios para los casos de: consumo de gas combustible de las Unidades 10 y 20, generación de gas combustible en el Área 20, consumo de vapor de alta presión en las Unidades 10, 28 y 22, generación de vapor de alta presión en las Unidades 22 y 41 (en sus dos trenes y sus dos calderas, respectivamente), la generación de vapor de media presión en el Área 20 y en la Unidad 28, consumo de vapor de baja presión en las Unidades 10 y 28, y finalmente, de generación de vapor de baja en la Unidad 28. En estos casos se obtuvieron ecuaciones adecuadas para utilizar en los cálculos de la herramienta de proyección de consumos.
- Para los casos en que no se encontró correlación alguna entre los servicios y las cargas, se colocaron valores fijos que presentaran desviaciones relativas menores al 10%.
- El consumo de vapor de media presión en el Área 20, tiene cierta tendencia a aumentar con la carga, razón por la que se aceptó la ecuación lineal de bajo R^2 , acción que permitió una disminución del error relativo.
- La herramienta presenta limitaciones en cuanto a los rangos en que trabaja, como lo son valores de carga muy pequeños o muy grandes, siendo en estos casos poco confiable.
- Si se introducen valores de carga al Área 20, menores a los 34 MBD (dentro de los límites permitidos), la herramienta falla, aumentando de forma considerable su error.
- Se desarrolló una correlación para el consumo de vapor de alta presión en la Unidad 28, en caso que la Unidad este en proceso de arranque, la cual es confiable y puede servir en futuras ocasiones, mas no forma parte de la herramienta.

- La herramienta sólo contempla el caso de operación normal, es decir, no sirve para procesos de puesta en marcha de una o varias Unidades, o procesos de parada.
- Las Unidades del Área 50, son las más críticas, pues el consumo o generación de los servicios de vapor y gas asociados a ellas, no depende de las cargas, depende de la severidad del proceso, razón por la cual, para todas éstas se tomaron valores constantes.
- En los casos en que el consumo o generación de vapor, en alguno de los niveles de presión, se debía sólo al funcionamiento de una turbina, se tomaron los valores dados por diseño directamente, importando el hecho de si están o no en operación.
- El archivo ejecutable ha sido diseñado con un sistema de colores e indicaciones escritas que diferencie bien las funciones de cada campo y sea amigable al usuario.
- Los escenarios que pueden ser creados en la herramienta de evaluación hidráulica, pueden ser de tipo estructural u operativo, mientras que los propios de la herramienta de proyección de consumos sólo se limitan al plano operacional, se puede cambiar la cantidad de las cargas o la calidad de los gases manejados, mas no se puede variar la forma en que son distribuidos, o los accesorios involucrados.

RECOMENDACIONES

A continuación se exponen las recomendaciones que sugieren mejoras en la operación de la planta, las cuales son el producto del trabajo desarrollado en sus instalaciones.

- Revisar calibración del medidor 47-FI-006, correspondiente al flujo de agua de enfriamiento a distribución en el límite de batería de la Unidad 47.
- Considerar la instalación de medidores de flujo para el suministro de agua de enfriamiento hacia las Unidades 61 y 65.
- Crear un nuevo Caso Base para la herramienta de evaluación hidráulica, basado en el levantamiento del perfil de flujos y de presiones en un mismo día de operación.
- Realizar un estudio en cada una de las unidades para determinar la presión mínima de diseño. Se recomienda empezar dicho estudio con el área 20, pues es la que presenta la mayor caída de presión.
- Hacer un estudio profundo acerca de los flujos mínimos de agua de enfriamiento necesarios para las Unidades usuarias, para así determinar un verdadero plan de acción al trabajar con dos bombas.
- Hacer el estudio para la herramienta de proyección de consumos, en un período de operación estable.

REFERENCIA CITADA

- Aspen Tech (2005). Aspen Procces Explorer. Página informativa de la empresa de softwares Aspen Tech [catálogo en línea]. Disponible en: <http://www.aspentech.com/includes/product.cfm?IndustryID=4&ProductID=71>. [Consulta: 2005, mayo 7]
- Austin, George (1998). “Manual de Procesos Químicos en la Industria” 5ª Edición (1ª en español). Mc. Graw Hill. México.
- Crane (1989). “Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías”. Edit. Mc. Graw Hill. México.
- Chapra S. y Canale R (1999). “Métodos numéricos para Ingenieros Químicos”. 2ª edición. Mc Graw Hill. México.
- Grupo Alvica (2002a). “Hamaca Crude Upgrader, Unit 00 Overview, Operating Manual”. Petrolera Ameriven S.A. Venezuela.
- ----- (2002b). “Hamaca Crude Upgrader, Unit 47 Cooling Water System, Operating Manual”. Petrolera Ameriven S.A. Venezuela.
- ----- (2002c). “Hamaca Crude Upgrader, Unit 41 Steam Generation and Distribution, Operating Manual”. Petrolera Ameriven S.A. Venezuela.
- ----- (2002d). “Hamaca Crude Upgrader, Unit 22 Hydrogen Production, Operating Manual”. Petrolera Ameriven S.A. Venezuela.
- ----- (2002e). “Hamaca Crude Upgrader, Unit 45 Fuel Gas System, Operating Manual”. Petrolera Ameriven S.A. Venezuela. 2002.
- Invensys Systems (2003). “Tutorial Guide (PES)”, Inc. United States of America.

- Ludwing, Ernest E (1997). “Applied process design for chemical and petrochemical plants”. Vol. 2. 3rd edition. Gula Professional Publishing. United States of America.
- Mott, Robert L. (1996) “Mecánica de fluidos aplicada” 4^a edición. Prentice Hall Hispanoamérica. México.
- Perry, R. y Green, D. (2001). “Manual del ingeniero químico” Vol. 2. 7^{ma} edición (4^{ta} en español). Mc Graw Hill. España.
- Petrolera Ameriven S.A. (2004a) “Herramienta para Evaluación de Intercambiadores de Calor con Agua de Enfriamiento” Nota técnica N°: NT-47-2004-0001. Mejorador de Crudo Hamaca, Barcelona, Edo. Anzoátegui, Venezuela: Ana M. Benítez.
- ----- (2004b) “Simulación del Sistema de Alivio de Gases de Petrolera Ameriven”. Nota técnica N°: NT-TEC-PRO-AZ-00-00011. Mejorador de Crudo Hamaca, Barcelona, Edo. Anzoátegui, Venezuela: Carmelo Trezza.
- ----- (2004c). “Automatización de los balances de vapor, agua tratada y condensado en el Mejorador de Petrolera Ameriven”. Nota técnica N°: NT-TEC-PRO-SI-00-0036. Mejorador de Crudo Hamaca, Barcelona, Edo. Anzoátegui, Venezuela: Gustavo Gonzáles, Kilkeny Isturiz y Natacha Montaña.
- ----- (2004d). “Monitorización del Sistema de Generación y Distribución de Vapor”. Procedimiento. N° J/E/TEC-PRO-IP-PP-206. Mejorador de Crudo Hamaca, Barcelona, Edo. Anzoátegui, Venezuela: Kilkeny Isturiz

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Gary, J. y Handwerk, G. (2001) “Petroleum Refining. Technology and Economics”. 4th Edition. Marcel Dekker, Inc. New York. United States of America.
- Leffer, William L. (2000). “Petroleum refining in non technical language” 3rd edition. Edit. Penn Well. United States of America.
- Mohinder, L. N. (2000) “Piping Handbook”. 7th edition. Mc. Graw Hill. United States of America.
- Soares, Claire (2002). “Process Engineering Equipment Handbook” 1st edition. Mc Graw Hill. New York. United States of America.