

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“EVALUACIÓN TÉCNICA, ECONÓMICA Y AMBIENTAL DE UN SISTEMA
PARA EL REUSO DE ACEITES LUBRICANTES COMO COMBUSTIBLE
ALTERNO EN LOS SECADORES DE MINERAL DE HIERRO DE
ORINOCO IRON S.C.S”**

**ELABORADO POR:
CARLOS ALBERTO DELGADO MITRANO
CI: 18.885.014**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO ANTE LA UNIVERSIDAD DE
ORIENTE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

PUERTO LA CRUZ, AGOSTO DE 2011

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“EVALUACIÓN TÉCNICA, ECONÓMICA Y AMBIENTAL DE UN SISTEMA
PARA EL REUSO DE ACEITES LUBRICANTES COMO COMBUSTIBLE
ALTERNO EN LOS SECADORES DE MINERAL DE HIERRO DE
ORINOCO IRON S.C.S”**

ASESORES

Ing. Quím. Shirley Marfisi, Dra.
Asesor académico

Ing. Quím. Jose Navas
Asesor industrial

PUERTO LA CRUZ, AGOSTO DE 2011

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“EVALUACIÓN TÉCNICA, ECONÓMICA Y AMBIENTAL DE UN SISTEMA
PARA EL REUSO DE ACEITES LUBRICANTES COMO COMBUSTIBLE
ALTERNO EN LOS SECADORES DE MINERAL DE HIERRO DE
ORINOCO IRON S.C.S”**

JURADO

**Ing. Quím. Shirley Marfisi, Dra.
Asesor académico**

**Ing. Quím. Luis Moreno
Jurado principal**

**Ing. Quím. Osvaldo Ochoa
Jurado principal**

PUERTO LA CRUZ, AGOSTO DE 2011

RESOLUCIÓN

DE ACUERDO CON EL ARTÍCULO 41 DEL REGLAMENTO DE TRABAJOS DE GRADO:

“Los trabajos de grado son de exclusiva propiedad de la universidad de oriente y sólo podrán ser utilizados para otros fines con el consentimiento del consejo del núcleo respectivo, quien lo participará al consejo universitario”

DEDICATORIA

A mi padre Carlos Delgado, a mi madre María Mitrano, a mis hermanos Angie, Julio y Paolo, a todos mis familiares cercanos, a Ornella Cocco, mi segunda madre, a la Universidad de Oriente Núcleo Anzoátegui, a la empresa Orinoco Iron y a todo aquel a quien le pueda interesar, de alguna manera u otra, la temática abordada en este trabajo de grado; espero que les sea de gran utilidad, no me queda más que decirles que esta tesis es para ustedes...

AGRADECIMIENTOS

Al finalizar un trabajo tan arduo y lleno de dificultades como es el desarrollo de una pasantía de ingeniería es inevitable que se realce un muy buen proyecto, ambición que te lleva a concentrar la mayor parte del mérito en el aporte que has hecho. Sin embargo, el análisis objetivo te muestra inminentemente que la dimensión de ese aporte hubiese sido inverosímil sin el aporte de personas e instituciones que prestaron su apoyo para que este trabajo llegara a un adecuado término. Por ello, es para mí un indiscutible placer esgrimir este punto para ser justo con ellas, expresándoles mis agradecimientos.

Debo reconocer de forma especial y abierta a la profesora Shirley Marfisi, mi tutora académica, sin dejar a un lado a mis asesores industriales, Jose Navas y Noel Valery, quienes día a día me dieron incondicional apoyo y la oportunidad de escoger este interesante tema, que a mi parecer fue la mejor elección. Sus orientaciones, soporte, confianza en mi trabajo y su contribución en la tutela de mis ideas, han sido un aporte invaluable, no simplemente en el desarrollo de este trabajo, sino también en mi formación como ingeniero químico integral. Las ideas oportunas, siempre enmarcadas en su disposición y seriedad, han sido la clave del buen trabajo que hemos ejecutado juntos, el cual no se pudo pensar sin su siempre oportuna participación. Les gratifico también el haberme prestado los medios para llevar a cabo todas las actividades propuestas durante el desarrollo de este trabajo. Muchas gracias...

A la Universidad de Oriente Núcleo de Anzoátegui, en especial al Departamento de Ingeniería Química, por darme herramientas indispensables para mi formación como profesional y como persona.

A Orinoco Iron y Venprecar, por permitirme realizar mis pasantías de grado en sus instalaciones y brindarme las herramientas necesarias; especialmente a Orinoco Iron por brindarme una oportunidad de trabajo. Gracias Noel, Gracias Jose Luis, por haberme invitado a formar parte de su equipo laboral, de verdad estoy muy agradecido.

A la Gerencia de Ambiente y Seguridad, Gerencia Técnica, Mantenimiento, Ingeniería de Proyectos, Ingeniería de Procesos y Operaciones, por toda la valiosa y oportuna colaboración prestada para el desarrollo de este trabajo de grado, resaltando el arduo labor de los ingenieros Carlos Contreras, Carlos Guzman, Jose Navas, Noel Valery, Jose Bartolome y Juan Luzardo.

A mis compañeros de pasantía y panas de Puerto Ordaz (Anyuth, Yetsibell, Early, Carlos, Zaida, Marly y Alex), por todos los gratos momentos vividos dentro y fuera de las instalaciones de la empresa. Éxito, muchachos. En especial a Felix (actual pana y compañero de trabajo), y Alex, que me ladillaron hasta más no poder para que terminara la tesis.

Al Señor Alcides Herrera, representante de la contrata Opserman, por su proactividad hacia el proyecto de inyección de aceites usados y su invaluable colaboración.

A SIDOR, específicamente a la Gerencia de Ingeniería y Ambiente (Ing. Rosalma Gobby y a su pasante Isabella Mallón), por toda la información

suministrada referente al sistema de inyección de aceites lubricantes usados que poseen en las instalaciones de su planta de cal. Debo dar especial agradecimiento a Isabella ya que, sin saberlo, fue el catalizador que promovió el logro de muchos objetivos de este trabajo.

A mis amigos universitarios (Rocio, Carlos “Greengo”, Mary, Yoscary, Angelica, Yohana, Roberth, Antonio, Jet, Wirpax, Yaneska, Cariana y a Karline) por compartir junto a mi los mejores años de lo que llevo de vida, no puedo dejar por fuera a toda la gente de “BSC” Los quiero y ustedes saben quienes son... éxito para todos y espero seguir en contacto con ustedes.

Puede que ustedes me hayan dedicado no más de una línea en sus respectivos agradecimientos, pero no importa... a lo mejor estaban contra el reloj y redactaron sus agradecimientos por salir del paso; pero como en mi ser no hay cabida para esfímeros reconocimientos, yo, Carlos Delgado les tengo aca más de una simple línea:

Mis más sinceros agradecimientos a mis amigas Aleysa Velasquez y Yalimar Yarbouh por su trascendental aporte e intervención activa en casi la totalidad de mi vida universitaria. Su disponibilidad y paciencia permitieron que nuestras constantes y acaloradas discusiones, redundaran benéficamente tanto a nivel académico como en lo personal, haciéndonos ser mejores personas cada día. No da pie a la incertidumbre el hecho de que los momentos vividos con ustedes, a pesar de no haber sido los mejores (como ustedes ya lo saben), estarán tanto en mi memoria como en mi corazón. Espero que nuestra amistad perdure *“hasta que el cuerpo aguante!”*, como dice Aleysa, porque de lo contrario Yalimar definitivamente terminara escupiéndome un ojo.

A todos mis profesores (Arturo Rodulfo, Raiza Sánchez, Ana Colmenares, Luis Moreno, Alexis Cova, Petra Martinez, Rafael Barrueta y Fidelina Moncada), por haber contribuido grandemente tanto en mi formación integral como profesional.

A mis Padres, Carlos y Maria, por todo lo que me han dado y todo lo que han hecho por mi a lo largo de mi vida, desde el momento en el que nací, gracias por todo, de verdad los quiero y espero que estén siempre orgullosos de mi.

A mis hermanos (Julio, Angie y Paolo), a mis tios (Zuleikha, Cesar y Susana) y a Ornella por estar siempre ahí, cuidar y velar por mi en mis años de universitario.

Gracias a todos,
Carlos Delgado

RESUMEN

Los aceites lubricantes usados (ALU's) son un residuo peligroso cuya gestión inadecuada puede provocar graves daños al medio ambiente, por ello se evaluó la factibilidad técnica, económica y ambiental de un sistema para el reuso de los aceites, que se generan en Orinoco Iron y Venprecar, como combustible complementario al gas natural que alimenta las cámaras de combustión de la planta de secado de mineral de hierro de Orinoco Iron. Para ello, se revisó y determinó el tipo, cantidad y gestión que la empresa le da a los ALU's que generan, también se hizo la caracterización de sus propiedades fisicoquímicas. Se realizó la conceptualización de dos sistemas de inyección de aceite, uno preliminar y otro definitivo, ubicando estratégicamente cada uno de sus componentes dentro de la planta de secado de mineral de hierro de Orinoco Iron, y se realizó un estimado de costo tipo III para el sistema de inyección de ALU's definitivo; por último se analizaron aspectos técnicos, económicos y ambientales inherentes a la implantación y puesta en marcha del sistema de inyección. Entre los resultados más destacados se encontró que los ALU's poseen propiedades fisicoquímicas que lo hacen un combustible de mejor calidad que el *fuel oil* y otros combustibles pesados, además en su combustión generan emisiones más amigables con el medio ambiente; por otro lado, entre Orinoco Iron y Venprecar se generan anualmente alrededor de 123 y 137 m³ de ALU's, y su reuso como combustible complementario devengará ahorros entre 165.000 y 179.000 BsF por año, lo que le permitirá a Orinoco Iron obtener el retorno de la inversión (117.935,62 BsF ± 20%) en menos de 9 meses; también se demostró que las cámaras de combustión del secador de mineral de hierro garantizan que el tiempo de residencia, la turbulencia y la temperatura de los gases en su interior tengan valores óptimos para propiciar

la eficiente combustión del ALU. Por todo lo anteriormente mencionado, quedó demostrado que es factible técnica, económica y ambientalmente, la implantación de un sistema para el reuso de los ALU's como combustible complementario al gas natural en las cámaras de combustión del proceso de secado de mineral de hierro de Orinoco Iron.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|-----|
| RESOLUCIÓN | iv |
| DEDICATORIA | v |
| AGRADECIMIENTOS..... | vi |
| RESUMEN..... | x |
| TABLA DE CONTENIDO | xii |
| CAPÍTULO 1 | 1 |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. Reseña de la empresa | 1 |
| 1.1.1. Ubicación geográfica de la empresa..... | 4 |
| 1.2. Planteamiento del problema..... | 4 |
| 1.3. Objetivos | 7 |
| 1.3.1. Objetivo general..... | 7 |
| 1.3.2 Objetivos específicos | 8 |
| CAPÍTULO 2..... | 9 |
| MARCO TEÓRICO | 9 |
| 2.1. Antecedentes | 9 |
| 2.2. Aceites lubricantes | 12 |
| 2.2.1. Bases lubricantes..... | 13 |
| 2.2.2. Aditivos | 17 |
| 2.3. Propiedades fisicoquímicas de los aceites lubricantes y de combustibles pesados | 18 |
| 2.4. Aceites lubricantes usados (ALU's) | 18 |
| 2.4.1. Clasificación..... | 20 |
| 2.4.2. Composición | 20 |
| 2.4.3. Aplicación y uso | 22 |

| | |
|--|----|
| 2.4.4. Daños generados..... | 24 |
| 2.5. Materiales peligrosos..... | 24 |
| 2.5.1. Definición de material peligroso | 25 |
| 2.5.2. Definición de material peligroso recuperable | 25 |
| 2.5.3. Recuperación y reuso de materiales peligrosos | 26 |
| 2.5.4. Análisis de riesgo | 26 |
| 2.5.4.- Clase de peligrosidad de los ALU's | 27 |
| 2.6. Ecoeficiencia | 27 |
| 2.6.1. Objetivos de la ecoeficiencia..... | 28 |
| 2.7. Pasivo ambiental | 29 |
| 2.8. Consideraciones básicas de los fluidos en tuberías..... | 29 |
| 2.8.1. Regímenes de flujo de fluidos en tuberías: laminar y turbulento... 29 | |
| 2.8.2. Número de Reynolds | 30 |
| 2.8.3. Flujos de fluidos en tubería..... | 31 |
| 2.8.4. Resistencia de los fluidos en general..... | 31 |
| 2.9. Dosificación con bombas de engranes..... | 32 |
| 2.9.1. Sistema dosificador básico | 33 |
| 2.9.2.- Control de la derivación | 34 |
| 2.9.4. Eficiencia global de la bomba | 36 |
| 2.10. Combustibles líquidos como suministro alternativo al gas natural | 37 |
| 2.10.1. Consideraciones para el manejo de combustibles líquidos como combustible alternativo..... | 39 |
| 2.11. Sistema de quemado de aceites aplicado en la planta de cal de SIDOR..... | 41 |
| 2.11.1. Descripción general del proceso..... | 43 |
| 2.12.- Descripción del proceso de la planta de secado del mineral de hierro de ORINOCO IRON S.C.S..... | 45 |
| 2.11. Evaluación técnico-económica de proyectos..... | 47 |
| 2.13. Estimado de costos | 49 |

| | |
|---|----|
| 2.13.1. Tipo de estimación de costo de capital | 50 |
| CAPÍTULO 3 | 54 |
| DESARROLLO DEL TRABAJO | 54 |
| 3.1. Revisión de la información sobre regulaciones, manejo, tipo y cantidades de aceites lubricantes usados generados por las empresas ORINOCO IRON y VEMPRECAR | 54 |
| 3.1.1. Tipos y cantidad de ALU's | 55 |
| 3.1.2. Regulaciones, manejo y almacenamiento..... | 56 |
| 3.2. Caracterización los aceites lubricantes usados, midiendo sus propiedades fisicoquímicas | 57 |
| 3.2.1. Recolección de las muestras | 58 |
| 3.2.2. Decantación gravitacional | 59 |
| 3.2.3. Determinación de la densidad, densidad relativa y gravedad API, aplicando la norma ASTM D 287 | 60 |
| 3.2.4. Determinación de la densidad, aplicando la norma ASTM D 100. | 62 |
| 3.2.5. Determinación de agua y sedimentos, aplicando la norma ASTM-D 96 | 65 |
| 3.2.6. Determinación del punto de fluidez, aplicando la norma ASTM D 97 | 68 |
| 3.2.7. Determinación del punto de inflamación y de combustión, en copa abierta o Cleveland (ASTM D 92) | 70 |
| 3.2.8. Determinación del carbón Conradson, aplicando la norma ASTM D 189 | 71 |
| 3.2.9. Determinación del calor de combustión, aplicando la norma ASTM D 240 | 73 |
| 3.2.10. Determinación de la viscosidad absoluta con el viscosímetro Brookfield rotacional DV-E | 80 |

| | |
|---|-----|
| 3.3. Determinación de la factibilidad técnica para la quema eficiente de los aceites en las cámaras de combustión | 85 |
| 3.3.1. Temperatura de la cámara de combustión del secador de lecho fluidizado de la planta de secado mineral de hierro de Orinoco Iron | 85 |
| 3.3.2. Caracterización de las corrientes gaseosas de las cámaras de combustión de los de secadores de mineral de hierro..... | 87 |
| 3.3.2.1. Cálculo del volumen molar de las corrientes gaseosas a condiciones normales..... | 91 |
| 3.3.2.2.- Cálculo de los flujos molares | 97 |
| 3.3.2.3. Balance másico de los flujos molares de las corrientes bajo parrilla del secador de mineral de hierro con reacción química | 98 |
| 3.3.2.4. Cálculo de la densidad de la corriente de gases de combustion..... | 104 |
| 3.3.2.5. Cálculo de la viscosidad de los gases bajo parrilla a las condiciones de operación del secador de mineral de hierro de O.I.. | 107 |
| 3.3.3. Cálculo de la velocidad de los gases bajo parrilla a las condiciones de operación del secador de mineral de hierro de O.I | 111 |
| 3.3.4. Cálculo del tiempo de residencia de los gases dentro de la cámara de combustión de la planta de secado de mineral..... | 113 |
| 3.3.5. Cálculo la turbulencia de los gases dentro de la cámara de combustión de la planta de secado de mineral..... | 114 |
| 3.4. Selección de los equipos y la ubicación del nuevo sistema de alimentación de combustible líquido en la planta de secado mineral de hierro de ORINOCO IRON S.C.S..... | 115 |
| 3.4.1. Selección de los equipos para el sistema de inyección de ALU´s..... | 116 |
| 3.5. Realización de un estimado de costos al sistema propuesto para el reuso de aceites lubricantes..... | 118 |

| | |
|--|-----|
| 3.6. Análisis del impacto que generaría el reuso de los aceites como combustible complementario en los secadores, desde el punto de vista técnico, económico y ambiental | 121 |
| 3.6.1. Aspectos ambientales | 121 |
| 3.6.2. Aspectos técnicos | 122 |
| 3.6.3. Aspectos económicos | 122 |
| 3.6.3.1. Determinación de la relación consumo gas-aceite | 122 |
| 3.7. Equipos, materiales y sustancias | 125 |
| 3.7.1- Equipos | 125 |
| 3.7.2. Materiales | 125 |
| 3.7.3. Sustancias | 126 |
| CAPÍTULO 4 | 127 |
| DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 127 |
| 4.1. Revisión de la información sobre regulaciones, manejo, tipo y cantidades de aceites lubricantes usados generados por las empresas ORINOCO IRON y VENPRECAR | 127 |
| 4.1.1. Tipo y cantidad de ALU´s | 127 |
| 4.1.2. Regulaciones, manejo y almacenamiento | 131 |
| 4.2. Caracterización de los aceites lubricantes usados, midiendo sus propiedades fisicoquímicas | 136 |
| 4.3. Determinación de la factibilidad técnica para la quema eficiente de los aceites en las cámaras de combustión | 141 |
| 4.3.1. Análisis de la temperatura en las cámaras de combustión | 143 |
| 4.3.2. Análisis del tiempo de residencia y de la turbulencia de los gases en la cámara de combustión de los secadores de mineral de hierro | 146 |
| 4.4. Selección de los equipos y la ubicación del nuevo sistema de alimentación de combustible líquido en la planta de secado de mineral de hierro de ORINOCO IRON S.C.S | 148 |

| | |
|--|-----|
| 4.4.1. Selección de las variables operacionales para el sistema de inyección | 149 |
| 4.4.2. Descripción general del sistema de inyección de ALU´s de prueba..... | 150 |
| 4.4.2.1. Filosofía de operación del sistema de prueba..... | 156 |
| 4.4.3. Descripción general del sistema de inyección de ALU´s definitivo..... | 158 |
| 4.4.3.1. Filosofía de operación del sistema definitivo..... | 165 |
| 4.4.4. Permisivos del sistema de inyección de aceite | 167 |
| 4.4.5. Ubicación del sistema de inyección de ALU´s | 167 |
| 4.5. Realización del estimado de costos al sistema propuesto para el reuso de aceites lubricantes usados. | 174 |
| 4.6. Analisis del impacto que generaría el reuso de los aceites como combustible complementario en los secadores, desde el punto de vista técnico, económico y ambiental | 175 |
| 4.6.1. Aspectos ambientales..... | 176 |
| 4.6.1.1. Aspectos garantes de la ecoeficiencia del sistema de inyección de ALU´s | 176 |
| 4.6.1.2. Eliminación del pasivo ambiental | 178 |
| 4.6.1.3. Contaminación por concepto de emisiones gaseosas | 180 |
| 4.6.1.4. Formación de dioxinas y furanos..... | 181 |
| 4.6.1.4. Cumplimiento legal ambiental de los ALU´s..... | 183 |
| 4.6.2. Aspectos técnicos | 185 |
| 4.6.2.1. Integridad mecánica interna del secador de mineral de hierro | 185 |
| 4.6.2.2. Calidad del mineral de hierro seco | 186 |
| 4.6.2.3. Dualidad de los quemadores..... | 186 |
| 4.6.3. Aspectos económicos | 187 |
| 4.6.3.1. Ahorros por reducción en el consumo de gas | 187 |

| | |
|---|-----|
| 4.6.3.2. Ahorros en disposición final | 189 |
| 4.6.3.3. Ahorro total..... | 191 |
| 4.6.3.4. Retorno de la inversión | 192 |
| 4.7. CONCLUSIONES..... | 194 |
| 4.8. RECOMENDACIONES | 195 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 198 |
| METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:..... | 204 |

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Reseña de la empresa

Orinoco Iron S.C.S y Venprecar son empresas dedicadas a la producción y comercialización de unidades de hierro metálico briqueteado en caliente, de alta calidad; ambas filiales pertenecientes a *Internacional Briquette Holding* (IBH). Orinoco Iron, con una capacidad de producción instalada de 2,2 millones de toneladas métricas al año, es la mayor productora en América de hierro briqueteado en caliente a través del proceso FINMET®, que consiste básicamente en someter los finos del mineral de hierro a un lecho fluidizado que utiliza un gas (rico en hidrógeno y monóxido de carbono) como agente reductor y fluidizador. Venprecar, mediante la tecnología MIDREX®, produce 815.000 toneladas métricas al año de briquetas de hierro compactadas en caliente, a partir de las pellas y gruesos de mineral de hierro.

Las ventajas tecnológicas del proceso FINMET proveen, entre otras propiedades, un alto grado de flexibilidad operativa, bajo consumo energético, uso de finos de mineral de hierro para obtener un producto con alto contenido metálico y bajo contenido de ganga y residuales. En la figura 1.1 se puede observar un esquemático general del proceso FINMET.

En la empresa Orinoco Iron operan dos módulos independientes o plantas de HBI (briqueta de hierro en caliente), y cada módulo está constituido por dos trenes de producción, y cada tren posee cuatro reactores de lecho fluidizado conectados en serie, en donde los finos de mineral de

hierro fluyen en contracorriente con un gas altamente reductor, proveniente del proceso de reformación del gas natural. El mineral proveniente de la etapa final de reducción pasa luego a un proceso de briqueteado, en el cual se obtienen las briquetas de hierro, que por su alta densidad, alto porcentaje de metalización, bajo contenido de ganga y residuales y su excelente condición inerte, constituyen una excelente e ideal carga metálica para complementar o sustituir a la chatarra en los procesos de acería.

La planta de Orinoco Iron se encuentra dividida en cinco áreas:

- Manejo de mineral y producto (recepcion, cribado, secado y molienda del mineral y despacho de briquetas).
- Reactores
- Briqueteadora (proceso de briqueteado en caliente del mineral de hierro reducido).
- Planta de gas (proceso de reformación del gas natural con vapor para la obtención del gas reductor).
- Servicios (proceso para la producción de gas inerte, aire de instrumentación, aguas para uso industrial y de caldera).

El 22 de julio de 1998 se inició la construcción de Orinoco Iron y para el 16 de febrero de 1999 se produjo la primera briqueta a partir de los finos del mineral de hierro; Pero fue en mayo del 2000 que se puso en marcha el primero de los cuatro trenes de producción de briquetas de HBI (Hot Briquette Iron). En el 2002 la empresa puso en marcha su segundo tren y alcanzó el primer millón de toneladas de briquetas producidas y vendidas; luego para el 15 de enero del 2004 Orinoco Iron arrancó la producción de su tercer tren y para febrero de ese mismo año alcanzó el segundo millón de

toneladas de briquetas producidas y vendidas. En octubre del 2008 la empresa fue afectada por la crisis económica mundial y fue forzada a reducir su capacidad de producción a un sólo tren, y esta situación persiste hasta la fecha. Orinoco Iron luego de una intensa etapa de negociación con el gobierno venezolano iniciada en abril del 2009, en el 2010 pasó a ser una empresa en proceso de transición del estado venezolano hasta que se concreten las negociaciones, y trabaja arduamente para colocar en marcha nuevamente todos sus trenes de producción.

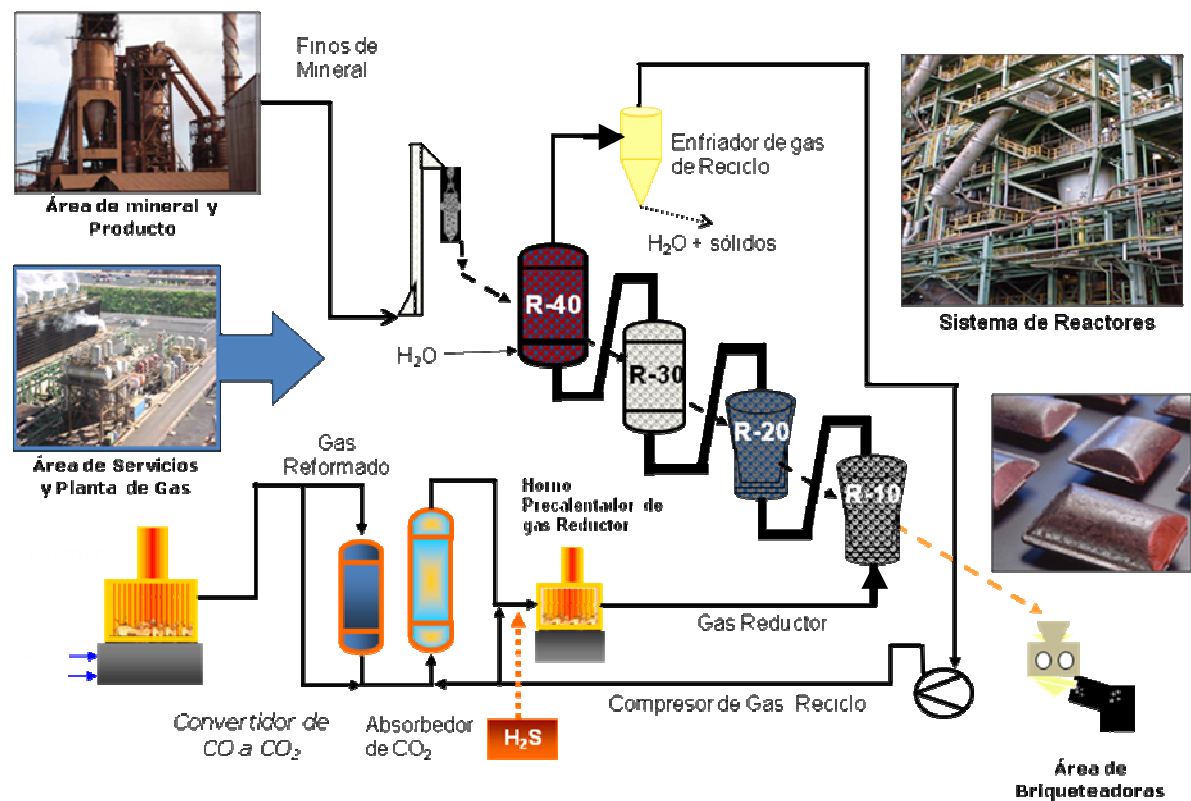


Figura 1.1. Proceso FINMET (Orinoco Iron, 2004).

1.1.1. Ubicación geográfica de la empresa

Está situada en el estado Bolívar, dentro del perímetro urbano de Ciudad Guayana, en la zona industrial Matanzas sobre el margen derecho del río Orinoco a unos 17 km del punto de confluencia de los ríos Orinoco y Caroní. Ocupa un área de extensión de 550.00 m², y está adyacente a las empresas SIDOR, CVG Venalum, CVG Alcasa, CVG Carbonorca y las plantas Venprecar y Casima (figura 1.2).

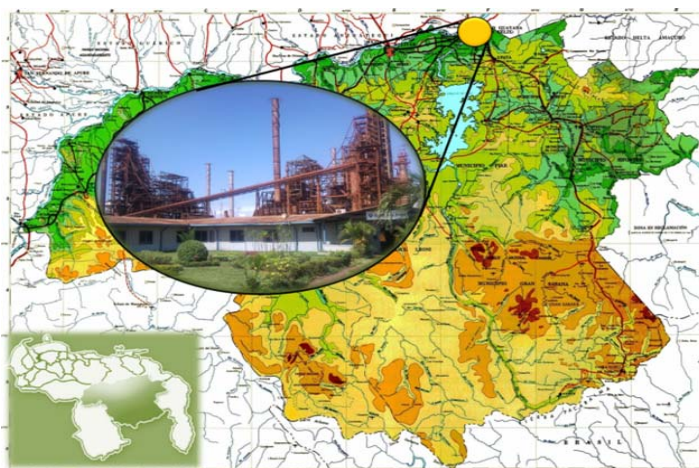


Figura 1.2. Ubicación geográfica de Orinoco Iron.

1.2. Planteamiento del problema

Los seres humanos, en su incesante esfuerzo por proporcionar grandes beneficios a la sociedad, se ven en la necesidad de crear diversos tipos de industrias, entre ellas las siderúrgicas; pero inevitablemente esto también conlleva a la contaminación ambiental por materiales y desechos peligrosos que se generan en los diversos procesos de manufactura.

En Orinoco Iron S.C.S (sociedad en comandita simple) y Venprecar, así como en muchas otras empresas, es inevitable la generación de contaminantes, que pueden causar daños al ecosistema y efectos nocivos a la salud de los seres humanos si éstos no son manejados adecuadamente. Es por ello que las mencionadas filiales de IBH, a través del mejoramiento continuo de sus procesos, asumen un compromiso para evitar y minimizar los impactos ambientales que ellas generan.

Entre los diferentes desechos y residuos generados por Orinoco Iron y Venprecar están los aceites lubricantes usados (denominados por las siglas ALU's), procedentes del proceso productivo de las mencionadas empresas; que luego de haber perdido las cualidades lubricantes son sustituidos, colectados en tambores y/o trasladados a trampas de aceite, en donde permanecen expuestos prácticamente durante días a la intemperie, antes de ser llevados al lugar de almacenamiento temporal (tanques ubicados en el patio de hidrocarburos de Orinoco Iron); en donde son retirados por una empresa de servicios que se encarga de su disposición final.

Debido a la gran cantidad de aceites lubricantes usados que se generan en Orinoco Iron y Venprecar y el costo que implica su disposición final, estas empresas tienen la necesidad de buscar la opción más favorable para el aprovechamiento de este residuo; considerado como material peligroso recuperable de acuerdo al decreto 2.635, que dicta las normas para el control de la recuperación de materiales peligrosos y el manejo de los desechos peligrosos.

Los ALU's por su elevado poder calorífico constituyen uno de los residuos con mayor potencial como carburante, por lo cual se planteó su reuso como combustible complementario en el proceso de secado de mineral

de hierro, específicamente en los quemadores que generan los gases calientes utilizados para retirar la humedad del mineral en los secadores de lecho fluidizado de Orinoco Iron, los cuales actualmente operan con gas natural proveniente de una subestación de PDVSA Gas.

Es importante señalar que el proceso de secado del mineral de hierro depende de los gases calientes obtenidos a partir de la quema del gas natural en las cámaras de combustión, motivo por el cual el simple hecho de contar con un suministro alternativo y gratuito de combustible reducirá el consumo de gas natural y generará un ahorro tanto energético como económico, resultando muy conveniente para Orinoco Iron; ya que el gasto en gas natural representa el 25% del costo de producción de las unidades de hierro metálico.

Estudios similares sobre la gestión de los ALU's se han realizado en todo el mundo en países como Chile, Ecuador, Venezuela y España; sin embargo, a pesar de tener un propósito en común con dichos trabajos, en la mayoría de ellos se opta por la valorización energética en los hornos de las plantas cementeras o de cal.

En el desarrollo del presente trabajo se recopiló la información necesaria para organizar parte del protocolo exigido para que la empresa, a mediano plazo, pueda iniciar el proceso de quemado ecoeficiente de los ALU's en la planta de secado de mineral de hierro; considerando que los aceites usados son clasificados como un material peligroso recuperable, según el decreto 2635, y requieren la aprobación por parte del Ministerio del Poder Popular para el Ambiente (MinAmb).

Luego se realizó una evaluación técnica, económica y ambiental del reuso de estos aceites, con la finalidad de determinar el tratamiento más idóneo que estos requieran para adecuarlos a las condiciones propias del quemado de un combustible líquido en las cámaras de combustión de la planta de secado de mineral de hierro; lo cual comprendió la determinación de la tasa de generación, caracterización fisicoquímica de los ALU's, selección y ubicación de los equipos que conformarán el sistema de alimentación de los ALU's a las cámaras de combustión, realización de un estimado de costo y finalmente el análisis de aspectos de índole económica, técnica y ambiental enmarcados en el empleo de estos aceites como combustible complementario en el proceso de la planta.

A través de la evaluación técnica, económica y ambiental, que abarcó hasta la conceptualización del sistema de inyección de ALU's a las cámaras de combustión, tanto Orinoco Iron como Venprecar podrán solucionar los problemas inherentes a la gestión de los ALU's que generan, en cumplimiento de las leyes ambientales y al mejoramiento continuo de sus procesos.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar técnica, económica y ambientalmente un sistema para el reuso de aceites lubricantes como combustible alternativo en los secadores de mineral de hierro de Orinoco Iron S.C.S.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Revisar la información sobre regulaciones, manejo, tipo y cantidades de aceites lubricantes usados generados por las empresas Orinoco Iron y Venprecar.
2. Caracterizar los aceites lubricantes usados, midiendo sus propiedades fisicoquímicas.
3. Determinar la factibilidad técnica para la quema eficiente de los aceites en las cámaras de combustión.
4. Seleccionar los equipos y la ubicación del nuevo sistema de alimentación de combustible líquido en la planta de secado de mineral de hierro de Orinoco Iron S.C.S.
5. Realizar un estimado de costos del sistema propuesto para el reuso de aceites lubricantes.
6. Analizar el impacto que generaría el reuso de los aceites como combustible complementario en los secadores, desde el punto de vista técnico, económico y ambiental.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

Considerando la problemática planteada, en cuanto a la gestión de los aceites lubricantes usados se refiere, y en aras de solventar dicho problema, se plantea evaluar técnica, económica y ambientalmente la factibilidad de implantación de un sistema para el aprovechamiento de aceites lubricantes usados como combustible complementario al gas natural, para lo cual sirvierón de guía los resultados de algunas investigaciones citadas a continuación:

Alam (2009) realizó una evaluación técnica, económica y ambiental de la factibilidad de implantación de un sistema para el manejo y tratamiento de materiales y desechos peligrosos en el área del Complejo Industrial Gran Mariscal de Ayacucho (CIGMA). Propuso procedimientos para la incineración de desechos y materiales peligrosos, así como también para el tratamiento de aceites y grasas lubricantes usados y de las aguas provenientes de su tratamiento. También determinaron los equipos principales necesarios para realizar tales actividades, así como sus costos.

Núñez (2006) determinó que, entre las alternativas de disposición de aceites usados existentes en el mundo, la más factible para aplicar en la ciudad de Cali (Colombia), era la valorización energética en los hornos de clinker, ya que la reducción en el consumo de combustible y en la generación de emisiones de gases CO₂, NO_x y SO₂ convierten a los hornos

cementeros en instalaciones ideales donde los aceites usados pueden ser utilizados como combustible alterno sin riesgos.

Zabala y colaboradores (2006) analizaron el estado actual del manejo de los aceites lubricantes usados en Guayaquil y elaboraron un plan técnico para su manejo, así como también evaluaron la factibilidad económica de utilizarlos como combustible alterno en los procesos de diversas industrias del país, resultando que es más factible aprovecharlos energéticamente en las cementeras.

Rivera (2006) realizó un estudio de factibilidad técnico-económica para la adquisición de un equipo reciclador de los aceites residuales provenientes del proceso productivo de Orinoco Iron S.C.S., en aras de reducir los costos, brindar más seguridad al área de almacén y de conservar al ambiente, ya que al disminuir la cantidad de aceites generados disminuirían también los riesgos de derrames de aceites. Con este estudio se demostró que la adquisición de un equipo reciclador de aceites lubricantes era factible para la empresa Orinoco Iron. En este estudio se identificaron dentro del proceso productivo los equipos y subconjuntos que emplean aceites en sus sistemas, y se determinó el volumen que utiliza cada equipo, así como la frecuencia de cambio en los mismos por tipo de aceite; lo que permitió dar a conocer que para ese entonces Orinoco Iron consumía el doble de aceites, debido a que se realizaba el reemplazó de aceites cada 3 meses, como consecuencia de la alta contaminación en estos aceites.

Hernández y Hernández (2002) trabajaron con la recuperación de la base lubricante de un aceite lubricante usado por motores de combustión interna a través de una extracción con dióxido de carbono a condiciones supercríticas. Al caracterizar muestras de aceite nuevo (supra SJ SAE 10-W-

30) y usado, y otra de aceite usado pero desconocido, obtuvieron que entre las muestras de aceite lubricante nuevo y usado que los valores de las propiedades fisicoquímicas fueron semejantes; los valores que obtuvieron para la densidad, viscosidad, contenido de azufre, carbón Conradson y el contenido de metales fueron mayores en el aceite usado, mientras que los valores obtenidos para el índice de viscosidad, el punto de inflamación y el punto de combustión fueron menores en el ALU.

SIDOR (2002) realizó una caracterización tanto de los aceites hidráulicos y lubricantes recuperados en SIDOR como de las emisiones de chimenea, obtenidas durante las pruebas de aprovechamiento de dichos aceites como combustible en los hornos rotatorios de planta de cal; con lo cual determinó que los aceites, además de no afectar la calidad del producto final, no presentaron en su composición elementos químicos en concentraciones suficientes que puedan dar origen o servir de precursores en la formación de contaminantes secundarios en las emisiones. Tales resultados demostraron que los aceites recuperados cumplen con las normas para el control de la recuperación de materiales peligrosos y el manejo de los desechos peligrosos, en cuanto al aprovechamiento como combustible (artículo 13, numeral 1 y 3 del decreto 2.635), así como también cumplen con las normas sobre calidad del aire y control de la contaminación atmosférica establecidas en el decreto 638 de la Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela.

SIDOR (2001), en aras de reducir rápida y eficazmente los miles de metros cúbicos de aceites lubricantes usados en SIDOR, implantó un sistema relativamente sencillo para la quema de éstos en los hornos rotatorios de la planta de cal, aprovechando así su elevado poder calorífico (similar al del *fuel oil*). Dicho sistema constó básicamente de una lanza con una boquilla

aspersora en uno de sus extremos, la cual fué insertada en el horno de tal forma que alimentara una neblina de aceite paralela a la llama generada por el quemador, mientras que en el otro extremo se conectó una bomba, una válvula de sobrepresión, a dos filtros dúplex y a un tanque; todos interconectados entre ellos a través de tuberías de tal manera que se asegurara la correcta y completa combustión del lubricante desgastado inyectado al horno.

2.2. Aceites lubricantes

Un aceite lubricante es toda sustancia líquida de origen animal, vegetal, mineral o sintética que permite separar dos superficies en movimiento relativo, reduciendo el desgaste refrigerándolas, evacuando contaminantes y protegiéndolas del medio circundante. Un aceite lubricante consiste, usualmente, en una mezcla de aceites minerales puros, frecuentemente conocidos como “aceites básicos” provenientes de las fracciones pesadas de ciertos crudos que han experimentado un tratamiento de purificación (Hernández, Hernández, 2002).

Los lubricantes líquidos son los de mayor uso, y se clasifican dependiendo de la fuente de procedencia de la base empleada en su formulación, es decir, en lubricantes naturales, minerales y sintéticos (Cabrera, 2006).

En la tabla 2.1 se presentan valores típicos de composición de los aceites minerales, indicando la función de los diferentes aditivos, los cuáles en términos generales permiten aumentar su rendimiento, eficiencia y vida útil. Nótese que de un 75 a 85 % de la composición del lubricante está

representada por la base del lubricante, y el porcentaje restante en su composición está representado por los aditivos (Cabrera, 2006).

Tabla 2.1. Composición media de un aceite lubricante de base mineral (Cabrera, 2006).

| Hidrocarburos totales (85 – 75%) | |
|---|---|
| -Alcanos | 45-76% |
| -Cicloalcanos | 13-45% |
| -Aromáticos | 10-30% |
| Aditivos (15 – 25%) | |
| -Antioxidantes | Ditiofosfatos, fenoles, aminas |
| -Detergentes | Sulfonatos, fosfonatos, fenolatos |
| -Anticorrosivos | Ditiofosfatos de zinc y bario, sulfonatos |
| -Antiespumantes | Siliconas, polímeros sintéticos |
| -Anticepticos | Alcoholes, fenoles, compuestos clorados |

2.2.1. Bases lubricantes

Son las que determinan la mayor parte de las características del aceite, provenientes de las fracciones producidas por la destilación al vacío y procesos subsiguientes de refinación para la extracción de asfaltenos, aromáticos y/o parafinas pesadas, cuales que afecten el índice de viscosidad y punto de inflamación y fluidez, características importantes en los lubricantes (Hernández, Hernández, 2002).

Entre los distintos tipos de bases lubricantes se tienen:

- ❖ Bases parafínicas: constituidas por más de un 75% en hidrocarburos parafínicos; predominan los hidrocarburos saturados de cadena recta, con presencia de naftalenos y aromáticos. Se caracterizan por la forma de cadena C_nH_{2n+2} ; son relativamente estables a altas temperaturas,

pero por el alto contenido de parafinas no funcionan satisfactoriamente a bajas temperaturas.

- ❖ Bases nafténicas: contienen porcentajes de hidrocarburos del 70% o mayores. Tienen un mayor contenido de cicloparafinas (naftalenos) y de aromáticos que los parafínicos; aunque estos últimos hidrocarburos son predominantes, ellos poseen de mediano a bajo índice de viscosidad. Se caracterizan por la fórmula C_nH_{2n} .
- ❖ Bases aromáticas: no se utilizan en la fabricación de aceites lubricantes debido a que no presenta prácticamente ninguna característica que amerite su uso. Su viscosidad disminuye rápidamente con la temperatura, y presentan tendencia a la formación de gomas a altas temperaturas. Su estructura molecular está constituida por ciclos de doble ligadura, similares a las del benceno.
- ❖ Bases hidrofragmentados: son el resultado de un complejo proceso de hidrogenación catalítico; este sistema permite obtener unos excelentes resultados en la mejora de la viscosidad de las bases minerales. También son denominados como bases minerales “no convencionales”. Comparado con los aceites minerales clásicos que son monogrados, los aceites “hidrofracmentados”, ofrecen grandes ventajas, ya que son multigrados y mucho más resistentes a la oxidación. Es un excelente método para producir aceites de alta calidad con un costo reducido.
- ❖ Bases sintéticas: son aquellas bases únicamente obtenidas por medio de síntesis química, ya que no existen en la naturaleza. Una de las grandes diferencias de las bases sintéticas frente a las minerales es que presentan una estructura molecular definida y conocida, así como propiedades predecibles, fruto de esta información. Los productos que hasta hoy se conocen como lubricantes sintéticos pueden ser ubicados entre alguna de las familias nombradas a continuación (Tabla 2.2).

- Poli Alfa Olefinas (PAO): son el resultado de un procedimiento químico sobre el etileno, basado en la reacción de polimerización de compuestos olefínicos. Son multigrados según SAE para motor y cajas de cambio, y su punto de congelación es bajo. Conocidos también como hidrocarburos de síntesis, por ser “construidos” artificialmente con productos precedentes del crudo petrolífero. Se aplican a los aceites de uso frigorífico por su propiedad de mantener su fluidez a muy baja temperatura. Si se compara con un aceite mineral, se observará que tienen un mayor índice de viscosidad y una mayor resistencia a la oxidación.
- Esteres orgánicos: también se obtienen de forma artificial, pero sin la participación de productos petrolíferos. Son producto de la reacción de esterificación entre productos de origen vegetal, tales como los alcoholes y ácidos grasos de origen vegetal. Son multigrados y tienen un poder lubricante extraordinario. Los esterres tienen propiedades sobresalientes, tales como, ultra untuosidad (capacidad de adherencia para formar una capa límite continua sobre metales como el hierro y aluminio. Eliminan el tiempo de formación de película, reduciendo el desgaste producido en ese momento. Poseen propiedades “autolimpiantes”, ya que son capaces de evitar la formación de depósitos adheridos en las paredes internas del motor. Tienen resistencia a las altas temperaturas y gran biodegradabilidad, por lo que no rompen el equilibrio ecológico ya que son absorbidos por las colonias bacterianas sin causarles daños. Son usados en aceites para compresores, en aceites hidráulicos y en aceites de transición.
- Esteres fosfóricos: son producto de la reacción de óxidos fosfóricos y alcoholes orgánicos. Su alto costo hace que su uso se restrinja a los fluidos hidráulicos resistentes al fuego en aplicaciones muy

específicas. Tienen alto poder de lubricación y antidesgaste (Albaracin, 1993 y Pérez, 1965).

Tabla 2.2. Resumen de las aplicaciones de las bases sintéticas

| Tipos | Aplicación Principal | Obtención |
|--------------------|-----------------------------|--|
| Poly alfa olefinas | Automotriz e industrial | Polimerización de olefinas |
| Esteres orgánicos | Aviación y automotriz | Esterificación de alcoholes y ácidos grasos orgánicos |
| Esteres fosfóricos | Industrial | Reacción entre óxidos fosfóricos y alcoholes orgánicos |

En la tabla 2.3 se presentan las propiedades de las distintas bases lubricantes, y en la figura 2.1 se muestra la composición típica porcentual de los aceites lubricantes.

Tabla 2.3. Propiedades de las bases lubricantes (Hernández, Hernández, 2002).

| Propiedades | Tipo de base lubricante | | | |
|----------------------------|--------------------------------|--------------------------|---------------------|---------------------|
| | Mineral | Hidrofragmentados | P.A.O | Ester |
| Viscosidad | Monogrado | Multigrado | Multigrado | Multigrado |
| Índice de viscosidad | Bajo 100 | Bueno 120-150 | Bueno 120-150 | Muy bueno 130-160 |
| Punto de fluidez (°C) | Débil -10 a -15 | Débil -10 a -25 | Excelente -40 a -60 | Excelente -40 a -60 |
| Resistencia a la oxidación | Buena | Buena | Muy buena | Excelente |
| Volatilidad | Media | Media | Excelente | Excelente |
| Untuosidad | No | No | No | Si |
| Biodegradabilidad | No | No | No | Si |

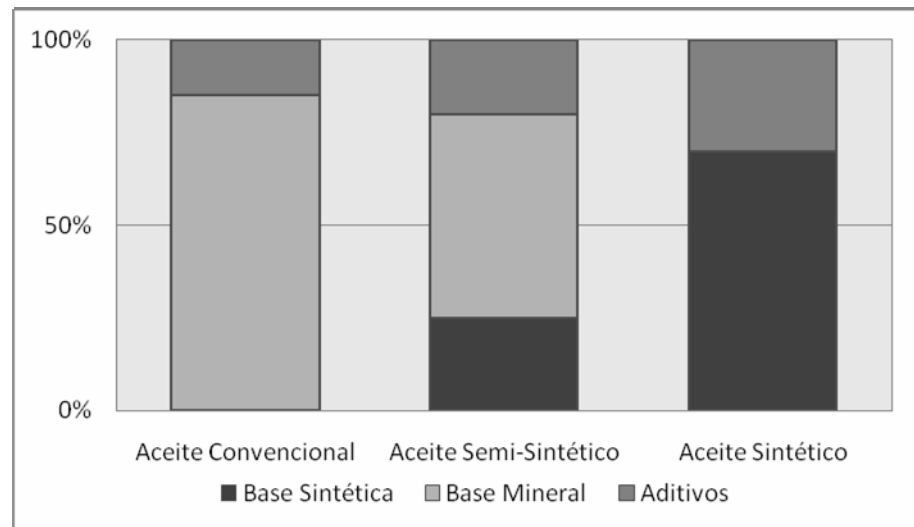


Figura 2.1. Composición general de aceites lubricantes (Hernández, Hernández, 2002)

2.2.2. Aditivos

Son sustancias, que cuando son incorporadas en lubricantes o combustibles, le imparten nuevas propiedades o mejoran las ya existentes. Los aditivos son agregados en cantidades predeterminadas para lograr su efecto, desde partes por millón (ppm) hasta el 30% en peso en algunos aceites de motor, pero generalmente se agregan en dosis pequeñas (Cabrera, 2006).

En la tabla 2.4 se muestran los tipos de aditivos y su aplicación de acuerdo a las condiciones de servicio. En el anexo A se tiene la estructura molecular típica de algunos de los aditivos frecuentemente utilizados (Figuras A.1 y A.2).

Tabla 2.4 Tipo de aditivos y su aplicación (Cabrera, 2006).

| Aditivo | Aplicación | Aditivo | Aplicación |
|---|---|-----------------------------|-----------------------------|
| Antioxidante | Alta temperatura | Detergentes Dispersantes | Contaminación con ácidos |
| Depresor del punto de fluidez | Baja temperatura | Demulsificantes | Contaminación con agua |
| Mejorador del índice de viscosidad | Variaciones extremas de temperatura | Agentes biocidas | Contaminación microbiana |
| Extrema presión Antidesgaste Agentes grasos | Cargas elevadas entre superficies | Antiespumantes | Agitación mecánica |
| Anticorrosivos | Ambiente corrosivo | | |

2.3. Propiedades fisicoquímicas de los aceites lubricantes y de combustibles pesados

Los combustibles líquidos y aceites lubricantes, desde el punto de vista industrial, son aquellos productos que provienen del petróleo bruto o del alquitrán de hulla en caso de los combustibles, es decir, ambos son derivados del petróleo, y como el objetivo de este trabajo es el de reutilizar ecoeficientemente a dichos aceites como un carburante, se hace conveniente que las propiedades fisicoquímicas de estas sustancias sean analizadas en un mismo punto para así observar más directamente las similitudes existentes entre ellos; tratando solo aquellas propiedades que poseen en común. Véase el resumen de las propiedades de los aceites lubricantes y de combustibles pesados (tipo *fuel oil*) en las tablas 2.5 y 2.6.

2.4. Aceites lubricantes usados (ALU's)

Un aceite lubricante usado, es el residuo que se genera de la utilización de aceites lubricantes para automoción y para usos industriales. Los aceites

usados son una mezcla de hidrocarburos procedentes del petróleo con restos de los aditivos que se le añadieron para realizar la función de lubricación, así como agua, disolventes y otros contaminantes adquiridos durante su utilización (Arner, Barbera, 2006).

Tabla 2.5. Principales propiedades en un aceite lubricante (Cabrera, 2006)

| Principales propiedades de los lubricantes | | |
|---|------------------------|------------------------|
| Gravedad API | Demulsibilidad | Contenido de carbón |
| Viscosidad | Capacidad antioxidante | Contenido de cenizas |
| Índice de viscosidad | Numero básico | Emulsibilidad |
| Punto de inflamación | Numero ácido | Corrosión |
| Punto de fluidez | Color | Herrumbre |
| Espuma | Contenido de agua | Capacidad antidesgaste |

Tabla 2.6. Principales propiedades en un combustible pesado.

| Principales propiedades de los combustibles pesados | |
|--|--------------------------------|
| Gravedad específica | Contenido de carbón |
| Viscosidad | Contenido de cenizas |
| Contenido de metales | Contenido de agua y sedimentos |
| Punto de inflamación | Corrosión |
| Punto de combustión | Azufre |
| Punto de fluidez | Poder calorífico |

Esta denominación comprende a los aceites de origen mineral, que durante el uso perdieron sus propiedades características, volviéndose inapropiados para continuar su utilización con el mismo propósito. Comprenden a los aceites lubricantes de motores (de vehículos y de maquinas industriales), los fluidos hidráulicos y de transmisión, aceites de corte, de transferencia de calor y los aceites dieléctricos provenientes de transformadores y condensadores (Martínez, 2005).

2.4.1. Clasificación

Los ALU's, se pueden clasificar según su fuente de generación en: aceites lubricantes usados grado automotriz, aceites lubricantes usados grado industrial y en aceites lubricantes usados dieléctricos.

Aceite lubricante usado grado automotriz (ALUa): son todos aquellos aceites y lubricantes que han perdido sus propiedades originales como resultado de su uso en transmisiones automáticas o manuales y en motores de combustión dinámica, estacionaria y diferencial. La descomposición de los aceites de motor se debe especialmente a una reacción de oxidación.

Aceite lubricante usado grado Industrial (ALUi): son todos aquellos aceites y lubricantes que han perdido sus propiedades originales, como resultado de su uso en maquinarias, prensas, transformadores, compresores, sistemas hidráulicos, sistemas de intercambio de calor, engranajes, entre otros.

Aceite lubricante usado dieléctrico (ALUd): es todo aquel aceite lubricante que ha perdido sus propiedades originales, como resultado de su empleo en transformadores y condensadores eléctricos. Es importante señalar que estos contienen más de 50 ppm de bifenilos policlorinados, por los cuales debe de gestionárseles de forma separada de acuerdo a su grado de contaminación.

2.4.2. Composición

Los ALU's adquieren concentraciones elevadas de metales pesados como plomo, cromo, cadmio, arsénico y zinc. El origen de estos metales es

principalmente el desgaste del motor o maquinaria que lubricó. Otra fuente de contacto es debida al contacto con combustibles (referido a los ALUa), como es el caso de la presencia de plomo que provenía de la degradación del tetraetilo de plomo de las naftas. Con frecuencia se encuentran compuestos clorados tales como tricloroetano, tricloroetileno y percloroetileno, provenientes del proceso de refinación del petróleo y de la reacción del aceite con compuestos halogenados de los aditivos. Otros contaminantes presentes son el azufre, el hollín, el agua y los sedimentos; todos los contaminantes antes mencionados pueden detallarse en la figura 2.2 (Martínez, 2005).

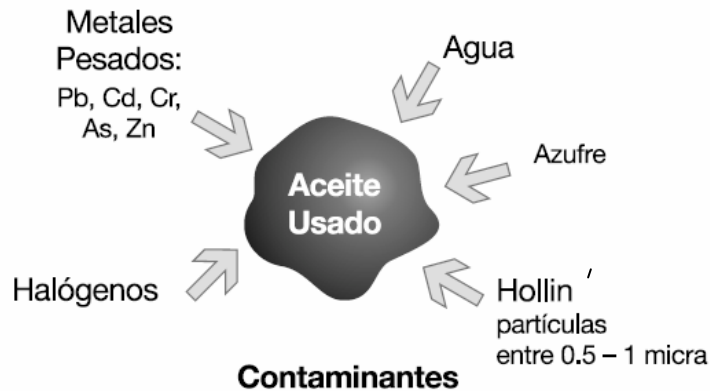


Figura 2.2. Principales contaminantes de un aceite lubricante usado (Martínez, 2005).

Los aceites poseen composiciones muy variables y dependen de su aplicación, en todos los casos como consecuencia de su utilización se degradan perdiendo las cualidades que les hacían operativos, y se hace necesaria su sustitución, generándose un residuo que puede ser variable en cantidad y composición, dependiendo de la procedencia. Las características del aceite usado pueden variar dentro de un amplio margen dependiendo de la procedencia y aplicación del aceite; en general las contaminaciones tienen

su origen en compuestos derivados de la degradación de los aditivos en subproductos de combustión incompleta, polvo, partículas metálicas o en contaminaciones exteriores por mal mantenimiento o mal almacenamiento del aceite (agua, disolventes, etc.).

En la tabla 2.7 se presenta un ejemplo de la composición de contaminantes presente en un ALUa. Cabe destacar que la cantidad de plomo varía significativamente en función del uso que se le dé al aceite lubricante, siendo mayor en los provenientes del parque automotor en donde están en contacto con combustibles con plomo.

Tabla 2.7 Contaminantes típicos de un ALUa en Uruguay (Martínez, 2005).

| Contaminantes | Concentración (ppm) |
|----------------------|----------------------------|
| Cadmio | 1,2 |
| Cromo | 1,8 |
| Plomo | 220 |
| Zinc | 640 |
| Cloro Total | 900 |
| PCB's | <2 |

2.4.3. Aplicación y uso

A continuación se presentan cuatro opciones de gestión para los aceites usados, ordenadas de acuerdo a principios ambientales (Martínez, 2005).

- ❖ La re-utilización en otros usos, si la calidad del aceite usado lo permite o previo tratamiento para remoción de contaminantes insolubles y productos de oxidación, mediante calentamiento, filtración, deshidratación

y centrifugación, puede reusarse como aceite de maquinaria de corte o en sistemas hidráulicos. El aceite dieléctrico es uno de los que se puede mantener "limpio" luego de su uso.

- ❖ La regeneración, mediante distintos tratamientos es posible la recuperación material de las bases lubricantes presentes en el aceite original, de manera que resulten aptas para su reformulación y utilización. Casi todos los aceites usados son regenerables, aunque en la práctica la dificultad y el costo hacen inviable esta alternativa para aceites usados con alto contenido de aceites vegetales, aceites sintéticos, agua y sólidos.
- ❖ La valorización energética mezclado con fuel-oil (en calderas industriales y hornos de cemento) ya sea por combustión directa o con pre-tratamiento del aceite (separación de agua y sedimentos). El aceite se constituye en uno de los residuos con mayor potencial para ser empleado como combustible por su elevado poder calorífico. Aunque la mayoría de calderas domésticas, calderas comerciales e industriales de baja potencia de generación, pueden quemar aceites usados, es una práctica no recomendable debido al problema de contaminación potencial del aire, por tratarse de quemas de productos sin control de especificaciones, quemado bajo condiciones no controladas y sin tratamiento de emisiones, especialmente por el contenido de metales pesados.
- ❖ La destrucción en incineradores de residuos peligrosos, en los casos que presenten niveles de contaminantes de metales pesados o halógenos que no permitan la sustitución de combustible en hornos o calderas industriales.

Esta priorización se basa en las ventajas ambientales de los procesos actuales de regeneración, por su mayor ahorro de materias primas, menores emisiones y olores, así como la menor producción de residuos o efluentes. Sin embargo se debe tener en cuenta que todavía coexisten procesos de

regeneración que son muy contaminantes y costosos, frente a lo cual la opción de valorización energética se hace más conveniente.

La valorización energética es un proceso que incluye la eliminación del agua y partículas sólidas para que el aceite usado (ALU) o cualquier otra sustancia con poder calorífico elevado, pueda ser utilizado como combustible alternativo o complementario en procesos industriales, sustituyendo a los combustibles fósiles (como el gas natural). En estos casos sólo se aprovecha el poder calorífico del aceite usado, despreciándose su capacidad para ser regenerado.

2.4.4. Daños generados

El vertido y combustión inadecuada sin previo tratamiento de los aceites lubricantes usados causan profundos daños al medio ambiente, y algunos de los aspectos más dañinos pueden resumirse de la siguiente manera: 1 litro de aceite usado es capaz de contaminar 1.000.000 de litros de agua potable; 5 litros de aceite usado quemado sin control contaminan el aire que un ser humano puede respirar en tres años; 1 litro de aceite de motor vertido puede llegar a formar una mancha de 4.000 m² sobre el agua (Arner, Barbera, 2006).

2.5. Materiales peligrosos

Los aceites lubricantes usados son considerados como un material peligroso recuperable, según el decreto 2635, por lo que se hace necesario definirlos dentro del ámbito legal-ambiental.

2.5.1. Definición de material peligroso

De acuerdo al artículo numero 9 de la ley sobre sustancias, materiales y desechos peligrosos, un material peligroso es aquella sustancia o mezcla de sustancias que por sus características físicas, químicas o biológicas sea capaz de producir daños a la salud, a la propiedad o al ambiente. Esta definición incluye a los materiales peligrosos recuperables. (Ley sobre sustancias, materiales y desechos peligrosos, 2001)

Una definición más técnica se encuentra en el decreto 2.635 que contempla las normas para el control de la recuperación de materiales peligrosos y el manejo de desechos peligrosos, en donde *“se considera peligroso todo material o desecho que presente características peligrosas, figure en el Anexo B o contenga cualquiera de las sustancias del Anexo C, indicadas con una X en concentración igual o superior a 50 ppm o cualquiera de las otras sustancias del mismo Anexo en concentración igual o superior a 1.000 ppm”* (Decreto N° 2.635, 1998). Los anexos B y C del decreto 2.635 estan colocados en los anexo B y C de este trabajo e grado, respectivamente.

2.5.2. Definición de material peligroso recuperable

Los materiales peligrosos recuperables son aquellos que revisten características peligrosas, que después de servir a un propósito específico todavía conserva propiedades físicas y químicas útiles y por lo tanto puede ser reusado, reciclado, regenerado o aprovechado con el mismo propósito u otro diferente (artículo N° 3 del decreto 2.635, 1998).

2.5.3. Recuperación y reuso de materiales peligrosos

Mientras que el reuso de materiales peligrosos consiste en el empleo de materiales peligrosos recuperables en otro ciclo de producción diferente al que le dio origen, la recuperación de un material peligroso incluye todas aquellas operaciones o procesos que comprenden la recolección, transporte, almacenamiento, tratamiento y transformación de materiales peligrosos para reuso, reciclaje, regeneración o aprovechamiento. (Decreto N° 2.635, 1998)

La recuperación de los materiales peligrosos tendrá como objetivo fundamental el reuso, el reciclaje, la regeneración o el aprovechamiento de dichos materiales a escala industrial o comercial, con el propósito de alargar su vida útil, minimizar la generación y destrucción de desechos peligrosos y propiciar las actividades económicas que empleen estos procesos o se surtan de estos materiales (artículo N° 9 del decreto 2.635, 1998).

2.5.4. Análisis de riesgo

Consiste en la identificación y evaluación sistemática de la probabilidad de ocurrencia de una situación adversa a la salud o al ambiente, como consecuencia de la exposición a un agente (material o desecho peligroso). (Decreto N° 2.635, 1998)

El análisis de riesgo debe incluir:

- ❖ Identificación de los riesgos, identidad química, localización, cantidad, naturaleza del riesgo.
- ❖ Análisis de vulnerabilidad, zona vulnerable, poblaciones o asentamientos humanos, facilidades críticas, medio ambiente.

- ❖ Análisis de probabilidad de ocurrencia de una contingencia, severidad de las consecuencias.

2.5.4.- Clase de peligrosidad de los ALU's

Los materiales peligrosos recuperables y los desechos peligrosos presentan diferentes niveles de riesgo, atendiendo a sus características y condiciones peligrosas. Los niveles de riesgo se presentan en cinco clases de peligrosidad creciente, las cuales deben ser identificadas y evaluadas para definir las medidas de seguridad, los planes de contingencia y la contratación de pólizas de seguros contra daños a terceros y daños ambientales. Los ALU's pertenecen a la clase 3 de esta clasificación.

Clase 3. Sólidos o líquidos, combustibles o inflamables sólo en presencia de llama; pueden tener ciertas características irritantes, corrosivas o tóxicas pero no requieren para su manejo equipos de protección total; potencial de dispersión limitado, cantidad transportada que no exceda de 3 toneladas, ni 25 metros cúbicos, con un daño esperado moderado, en áreas puntuales y sin efectos perdurables en el ambiente. (Decreto N° 2.635, 1998)

2.6. Ecoeficiencia

La ecoeficiencia está enfocada en una filosofía de gestión que surge a partir de conceptos de eficiencia económica que logran beneficios positivos sobre el medio ambiente; no consiste en aumentar las eficiencias de las prácticas ya existentes, sino que promueve y estimula la creatividad e innovación hacia la búsqueda de nuevas y mejores formas de hacer las cosas (Martinez, 2005).

La eco-eficiencia se alcanza mediante el comercio de productos y servicios a un precio competitivo, que satisfaga las necesidades de la sociedad y ofrezca calidad de vida, a la vez que reduzca de forma progresiva los impactos ambientales y la intensidad de uso de los recursos a lo largo de todo su ciclo de vida, hasta que el planeta los pueda asimilar (Martinez, 2005).

La eco-eficiencia es un cociente entre una medida económica y una medida de tipo ecológica o ambiental (Ecuación 2.1). A modo de ejemplo, es posible utilizar la cantidad de producto o las horas de trabajo como numerador del cociente e indicadores como el consumo agua o energía, o la emisión de gases de efecto invernadero como denominador. Entonces una alta eco-eficiencia se alcanzará al obtener más valor por unidad de impacto ambiental o unidad de recurso natural utilizado (Martinez, 2005).

$$\text{Ecoeficiencia} = \frac{\text{Valor del producto o s}}{\text{Influencia ambiental}} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

2.6.1. Objetivos de la ecoeficiencia

De acuerdo a Martinez (2005), los objetivos de la ecoeficiencia son:

- Reducción del consumo de recursos utilizando menos cantidad de energía, menos materiales, menos agua y menos cantidad de suelo, con el fomento del reciclaje y la mayor durabilidad del producto.
- Reducción del impacto ambiental mediante la minimización de las emisiones, la reducción en el consumo de agua, la correcta disposición de los residuos y el fomento del uso de los recursos renovables en lugar de los no renovables.

- Incremento del valor del producto o servicio con la generación de más beneficio al consumidor, el incremento de la funcionalidad del producto, e intentando satisfacer las necesidades efectivas de los consumidores.

2.7. Pasivo ambiental

Es el conjunto de corrientes de desechos no tratados de manera adecuada y oportuna, producidos por una empresa durante su funcionamiento ordinario o por accidentes a lo largo de su historia, que han ocasionado o podrían ocasionar algún deterioro en los recursos naturales y los ecosistemas (Observatorio de la deuda ecológica en la globalización, 2002).

2.8. Consideraciones básicas de los fluidos en tuberías

2.8.1. Regímenes de flujo de fluidos en tuberías: laminar y turbulento

El tipo de flujo que se transporta a velocidades más bajas que la crítica, velocidad donde empieza la deformación de las capas del fluido, se conoce como régimen laminar y a veces como régimen viscoso. Este régimen se caracteriza por el deslizamiento de capas cilíndricas concéntricas una sobre otra de manera ordenada. La velocidad del fluido es máxima en el eje de la tubería (en el centro) y disminuye rápidamente hasta anularse en la pared de la tubería. En el régimen turbulento hay un movimiento irregular e indeterminado de las partículas del fluido en direcciones transversales a la dirección principal del flujo; la distribución de velocidades en el régimen

turbulento es más uniforme a través del diámetro de la tubería que en régimen laminar. A pesar de que existe un movimiento turbulento a través de la mayor parte del diámetro de la tubería, siempre hay una pequeña capa de fluido en la pared de la tubería, conocida como la “capa periférica” o “subcapa laminar”, que se mueve en régimen laminar (Crane, 1976).

2.8.2. Número de Reynolds

Las investigaciones de Osborne Reynolds han demostrado que el régimen de flujo en tuberías, es decir, si es laminar o turbulento, depende del diámetro de la tubería, de la densidad y la viscosidad del fluido y de la velocidad del flujo. El valor numérico de una combinación adimensional de estas cuatro variables, conocido como el número de Reynolds, puede considerarse como la relación de las fuerzas dinámicas de la masa del fluido respecto a los esfuerzos de deformación ocasionados por la viscosidad.

Para estudios técnicos, el régimen de flujo en tuberías se considera como laminar si el número de Reynolds es menor que 2.000 y turbulento si el número de Reynolds es superior a 4.000. Entre estos dos valores está la zona denominada “crítica” donde el régimen de flujo es impredecible, pudiendo ser laminar, turbulento o de transición, dependiendo de muchas condiciones con posibilidad de variación; el valor del número de Reynolds se calcula a través de la ecuación 2.2 (Crane, 1976).

$$\text{Re} = \frac{D.V.\rho}{\mu} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

| Donde: | En unidades métricas | En unidades inglesas |
|--------------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| D = diámetro interno de la tubería | m | pie |
| d = diámetro interno de la tubería | m | pulg |
| Re = número de Reynolds | adimensional | adimensional |
| V = velocidad del fluido | m/s | pie/s |
| μ = viscosidad dinámica | Pa.s | cP |

2.8.3. Flujos de fluidos en tubería

El estudio del flujo de líquidos a través de un conducto constituye uno de los problemas fundamentales de la mecánica de fluidos. El carácter predictivo de este estudio permite al ingeniero diseñar los sistemas de conducción y distribución de fluidos o evaluar y optimizar los existentes, de acuerdo con las exigencias de caudal y presión impuestas a dichos sistemas. Por esta razón, es de gran importancia conocer todos los principios fundamentales que gobiernan el estudio de flujos de fluidos en tuberías (PDVSA MDP-02-FF-03, 1996).

2.8.4. Resistencia de los fluidos en general

Cuando un cuerpo sólido se mueve en un líquido, por ejemplo un objeto en el aire, se origina una fuerza que no tiene lugar cuando un objeto se mueve en el vacío. La resultante de estas fuerzas en la dirección normal al movimiento es el empuje ascensional. La resultante de la misma fuerza en la dirección del movimiento es el arrastre o resistencia. El origen de esta fuerza es la viscosidad; aunque también la resultante de las fuerzas debida a las presiones normales puede a veces dar origen a una resistencia que se llama resistencia de presión.

Por el principio de acción y reacción el cuerpo ejerce sobre el fluido una fuerza igual y de sentido contrario a la que el fluido ejerce sobre el sólido. Es decir, el fenómeno de la resistencia que un sólido experimenta al moverse en un fluido es, fundamentalmente, igual al de la resistencia que un fluido experimenta al moverse en el interior de un sólido, como una tubería. Así, el fenómeno por pérdidas de energía en conducciones cerradas o tubería, producidas por el rozamiento del fluido con las paredes de la tubería y de las partículas de fluido entre sí, es de trascendental interés en la ingeniería hidráulica (PDVSA MDP-02-FF-03, 1996).

2.9. Dosificación con bombas de engranes

Aunque tienen algunas limitaciones, las bombas de engranes con flujo en derivación son una solución sencilla y de muy bajo costo para muchos problemas de dosificación de procesos.

Cuando un ingeniero especifica o selecciona un sistema dosificador de productos químicos, suele escoger una bomba dosificadora del tipo pistón o de diafragma. Aunque se prefieren estas bombas para muchas aplicaciones, vale la pena tener en cuenta una opción, en particular para sistemas de presión moderada, de cuadro abierto o cerrado, que es la bomba rotatoria de engranes, la cual es sencilla y de bajo costo relativo.

Las bombas de pistón o de diafragma manejan caudales de galones por hora; mientras que las bombas de engranes están diseñadas para trabajar a galones por minuto; pero, una sencilla derivación acoplada al sistema con bomba de engranes produce los gastos más bajos deseados.

Debido al diseño de la bomba dosificadora de engranes, el límite de contra presión es de 75 a 100 psi. Hay que evitar los sólidos abrasivos en el líquido dosificado, porque dañaran la bomba (Kenneth, 1998).

2.9.1. Sistema dosificador básico

Las partes principales del sistema básico (véase la figura 2.3) incluyen tanques para los productos químicos, la bomba de engranes de desplazamiento positivo, el cuadro de tubos de derivación, la válvula de control de derivación, el indicador de presión (manómetro) y el indicador de flujo (rotámetro) para indicar el volumen de producto químico. Partes adicionales podrían adicionarse de acuerdo a las exigencias de la dosificación.

La bomba de engranes, impulsada por un motor de baja velocidad, de bajo costo relativo, succiona el líquido del tanque de almacenamiento y lo envía al punto de alimentación. El volumen de alimentación se puede ver con claridad con un indicador visual de flujo o un rotámetro, porque la salida de la bomba es estable y lineal, sin pulsaciones.

Para variar el volumen de flujo se debe instalar un tubo de derivación después de la descarga de la bomba, que retorne el fluido al tanque. Según sean las caídas relativas de presión en el tubo de derivación y en el de alimentación, se puede dosificar el gasto para el proceso desde 0 hasta 100% de la capacidad de la bomba.

La caída de presión en el tubo de derivación (recirculación) se controla con una válvula de derivación (bypass) manual o automática. El tamaño y la longitud de la tubería controlan la caída de presión en el tubo de

alimentación, lo cual se necesita a menudo para producir la contra presión necesaria; ésta también puede ocurrir por la que hay en el sistema en el punto de alimentación o se puede controlar con una válvula manual o automática en el tubo de alimentación (figura 2.4).

No obstante la sencillez del sistema que se muestra en la figura 2.3 puede dar gastos exactos y reproducibles, que vayan desde 0,004 hasta 20 galones por minuto, todo esto con la misma bomba. (Kenneth, 1998)

2.9.2.- Control de la derivación

Es importante conocer las posibilidades del control de la derivación (recirculación) porque es la clave de la adaptabilidad de la instalación de cualquier sistema dosificador con bomba de engranes.

En la figura 2.3 se ilustra el más sencillo de los sistemas de dosificación con bombas de engranes que puede existir. Por otro lado se sabe que es posible controlar el flujo con un motor de velocidad variable, el cual es mucho más costoso y la variación en el gasto está muy limitada por la gama de velocidad que genere la propulsión, pero se logran máximas economías y una mejor adaptabilidad del proceso si la bomba funciona a velocidad constante a su plena capacidad y si se agrega una válvula de derivación, manual o automática, y un tubo de derivación para devolver parte del caudal al tanque.

El sistema utiliza una válvula de desahogo de presión en torno a la válvula de derivación. Aunque no es indispensable, es para garantizar la protección de la bomba y del sistema contra una presión excesiva en caso de que se obstruya alguna tubería o que alguna válvula se cierre por accidente.

El sistema que se ilustra en la figura 2.3 se utiliza para la entrega, sin vigilancia de un operador, de los productos químicos a los puntos para su dosificación en un volumen determinado. El operador sólo necesita graduar la válvula de derivación cuando cambian las condiciones de flujo u otras. El sistema, por supuesto, se puede construir para control automático, a expensas de utilizar más instrumentos y de mayor complejidad del sistema.

Se puede especificar un tipo y tamaño de bomba que maneje la máxima capacidad necesaria, para utilizarla en más de un sistema de dosificación, o para dosificar en un mismo sistema pero variando el volumen de flujo a entregar. El sistema permite obtener diversos caudales si se desvía cualquier parte o hasta el 100% del flujo, sin que haya aumento excesivo de la temperatura ni peligro de daños. Esta estandarización ofrece máxima facilidad de control y se necesita un mínimo de piezas de repuesto en existencia (Kenneth, 1998).

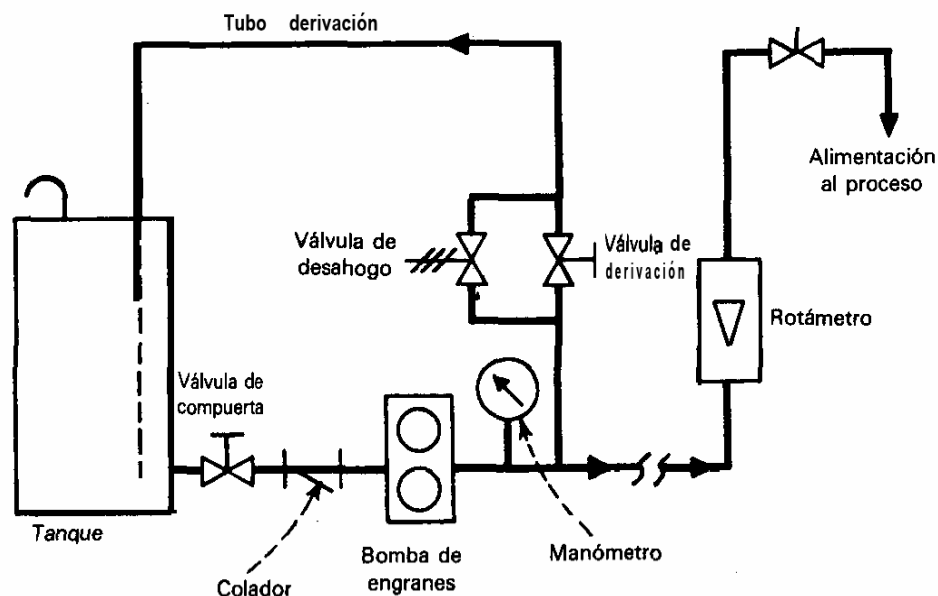


Figura 2.3. Sistema dosificador básico con tubería de derivación (Kenneth, 1998).

Cuando no se efectúa la dosificación, el flujo en derivación es muy eficaz para mezclar y agitar los productos que hay en el tanque. Aunque el sistema este funcionando para dosificación, la derivación producirá suficiente mezclado y agitación para que no se formen sólidos ni se acumulen en el fondo del tanque. Por ello el tubo de derivación siempre debe estar en el lado del tanque opuesto a la succión de la bomba, y si se coloca la salida del tubo cerca del fondo del tanque se evitan los problemas de espumas y aireación (Kenneth, 1998).

El cuadro de derivación tiene otra ventaja; conforme ocurre el desgaste de la bomba y se reduce su capacidad de bombeo, se puede ajustar la derivación para compensar dicho cambio y mantener la bomba en funcionamiento hasta la realización de parada para el mantenimiento programado, o hasta que se tengan los fondos o repuestos necesarios. (Kenneth, 1998)

2.9.4. Eficiencia global de la bomba

La eficiencia global de la bomba incluye dos categorías de pérdida, hidráulica y mecánica. Las pérdidas mecánicas son causadas por la fricción en los cojinetes y en el sello del eje y son muy pequeñas con respecto a las pérdidas hidráulicas. Las pérdidas hidráulicas son causadas por turbulencia, fricción del revestimiento y del disco, y deslizamiento o fugas internas desde la zona de descarga de la bomba hacia la zona de succión. Las pérdidas hidráulicas son una parte tan grande de las pérdidas totales que las eficiencias hidráulica y global se pueden intercambiar para propósitos de diseño de servicio de bombas. (Norma PDVSA MDP-02-P-06, 1997)

2.10. Combustibles líquidos como suministro alternativo al gas natural

El manejo de combustibles líquidos, como suministro alternativo al gas metano, implica la adquisición de quemadores duales o mixtos (Figura 2.4) y/o la instalación de equipos adicionales en el sistema de alimentación de combustible, como se muestra en la figura 2.5 (PDVSA GAS, 2004).

Los quemadores duales tienen la capacidad de consumir alternativamente gas metano y gasoil o gas metano y fueloil. La combustión de estos líquidos requiere de una técnica distinta a la empleada para la quema de gases. Para lograr una buena mezcla entre las moléculas de aire y el combustible líquido se necesitan atomizadores que dispersen el carburante en gotitas muy finas para incrementar la superficie de contacto entre el combustible y el aire. La atomización del líquido se realiza, generalmente, por intermedio de boquillas de atomización, las cuales utilizan presión, o fricción con otro fluido. Cuando la dispersión del combustible se lleva a cabo por fricción con otro fluido se utiliza aire o vapor de agua como atomizante. También existen boquillas de atomización (figura 2.6) por efecto centrífugo y por vibración con empleo de ultrasonido (PDVSA GAS, 2004).

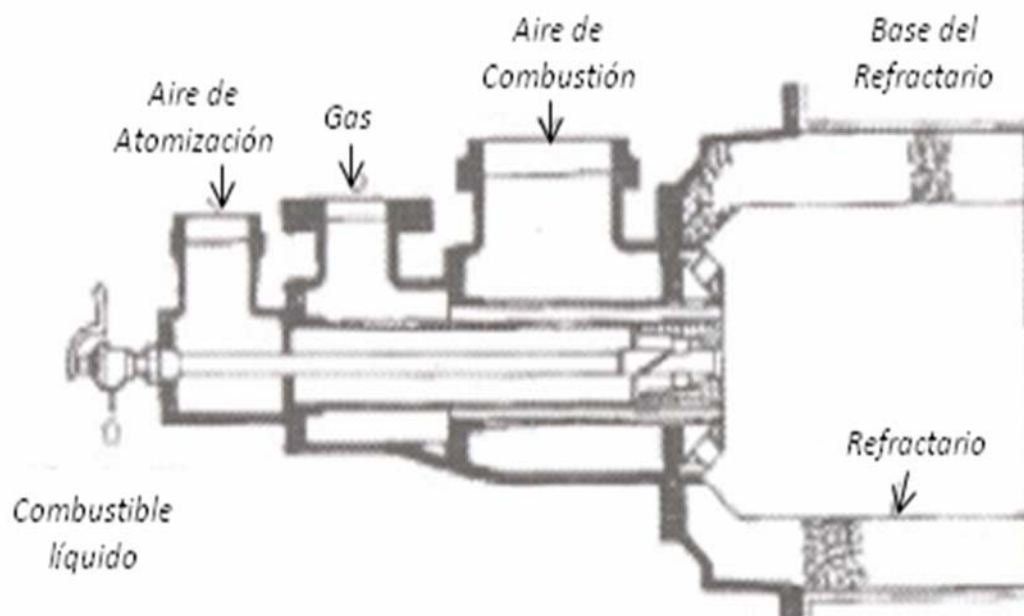


Figura 2.4 Esquemático de un quemador dual (PDVSA GAS, 2004).

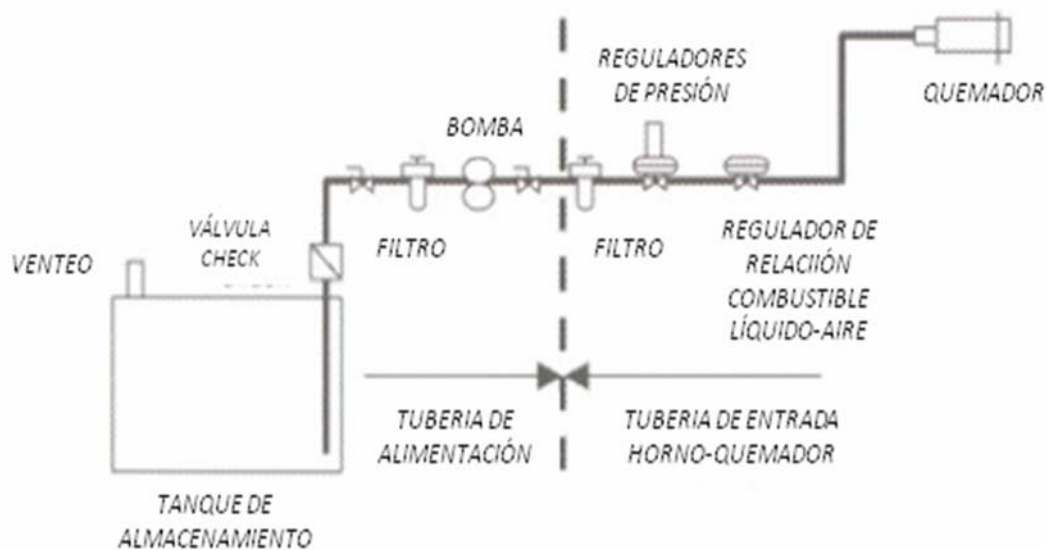


Figura 2.5. Representación esquemática de la alimentación alterna de un combustible líquido, en este caso gasoil, a un quemador dual. (PDVSA GAS, 2004).

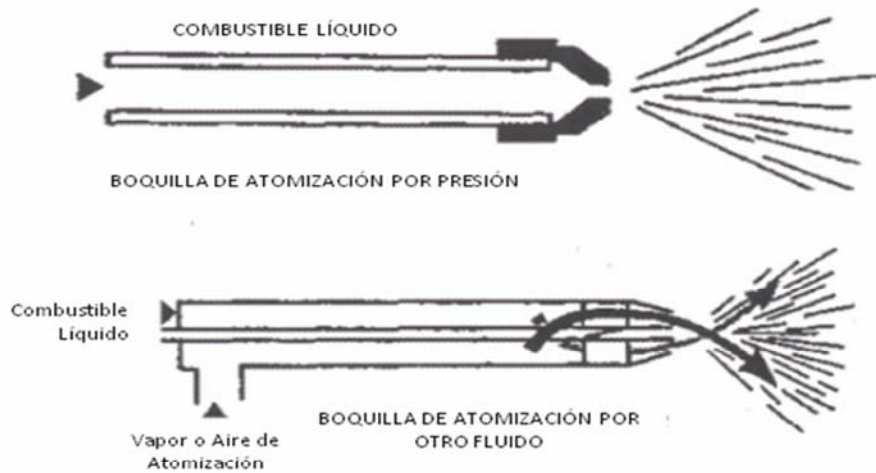


Figura 2.6. Esquemático de boquillas y acción atomizadora por presión y por fricción (PDVSA GAS, 2004).

Por otro lado, al manejar un combustible líquido muy espeso, como el fueloil se requiere mantener el nivel de viscosidad del fluido a condiciones apropiadas para su transporte dentro de la tubería de alimentación, así como para facilitar la formación de gotitas en las boquillas de alimentación. Para esto, se debe precalentar el combustible en el tanque de almacenamiento y se colocan bombas de recirculación que mantienen el líquido precalentado en un lazo previo a la línea de alimentación del quemador (PDVSA GAS, 2004).

2.10.1. Consideraciones para el manejo de combustibles líquidos como combustible alterno

Al elegir un combustible líquido como combustible alternativo, la primera consideración es evaluar la factibilidad técnica-económica de transformar un quemador a gas en un quemador dual. Existen marcas de quemadores que suministran paquetes de conversión para sus modelos. Por otro lado, no todos los quemadores son factibles de transformar. Si se decide por la adquisición de un quemador dual, parte del proceso de transformación se facilita, ya que el conjunto compuesto por refractarios, boquillas, bujías de encendido, bombas, etc., es suministrado por el proveedor y está diseñado para los requerimientos de la aplicación. No obstante, deben considerarse los siguientes aspectos (PDVSA GAS, 2004):

- ❖ Impacto ambiental: los combustibles líquidos requieren un tratamiento especial para lograr una combustión completa. Es frecuente la emisión de humo e inquemados a través de las chimeneas, originados por problemas en la atomización o fluidez del combustible. Adicionalmente, poseen mayores proporciones de azufre y minerales disueltos, por lo cual debe revisarse la afectación de las regulaciones ambientales para cumplir los parámetros exigidos por las leyes.
- ❖ Periodos de almacenamiento: los combustibles líquidos tienden a deteriorarse con el almacenamiento prolongado. Se produce la sedimentación, se forman hongos o se contaminan con agua. Por tanto, debe establecerse un programa de mantenimiento, cambio y logística de suministro con el fin de contar con la calidad y cantidad necesaria para el momento en que se necesite.
- ❖ Pruebas periódicas: en la tubería y orificios por donde se transporta el combustible líquido se depositan partículas y se sedimentan porciones del carburante; este efecto restringe el paso de los fluidos bloqueando válvulas y orificios. Para evitar problemas al momento de la utilización, es importante hacer pruebas periódicas con el sistema alternativo, o limpiar

las tuberías con un barrido de aire una vez finalizada la alimentación del combustible líquido.

- ❖ Cambios de eficiencia térmica: el empleo de combustibles líquidos incrementa la eficiencia térmica de la combustión, con mayor emisión de calor por radiación y menos presencia de vapor de agua en los gases de combustión. Por lo general, este efecto es positivo en todos los procesos, sólo pueden presentarse inconvenientes en los refractarios, especialmente en tubos radiantes.
- ❖ Calentamiento por radiación: la transferencia de calor por radiación varía de un combustible a otro. Por tanto, debe evaluarse el efecto del cambio de combustible en los requerimientos de calor por radiación.
- ❖ Capacidad de manejo de calor del refractario: el sitio destinado para la combustión está diseñado para manejar cierto nivel de temperatura. El cambio de combustible puede afectar la temperatura del recinto de combustión, pudiendo dañar el refractario.
- ❖ Consumo de energía y tubería adicional: el manejo de combustibles líquidos requiere de equipos adicionales como bombas, compresores y calentadores para el transporte del carburante y/o aire de atomización, los cuales requieren suministro eléctrico. Adicionalmente, se necesita tubería extra para el transporte de líquidos y del aire o vapor de atomización.

2.11. Sistema de quemado de aceites aplicado en la planta de cal de SIDOR

El sistema de quemado de aceites en la planta de cal de SIDOR consiste en inyectar aceite presurizado en el horno rotatorio, para así lograr el quemado óptimo del mismo evitando la contaminación del medio ambiente. El aceite es suministrado en un rango de presión entre 90 y 130 psi, pero el

valor de trabajo es de 125 psi. En la planta de cal realizan la quema de ALU's siempre y cuando la temperatura del cabezal de su horno rotatorio sea superior a los 1000°C.

Existen dos tipos de aceites para quemar, el *aceite recuperado* (ALUi y ALUa según las definiciones de este trabajo de grado) y el *aceite contaminado* (emulsiones provenientes de la laminación del acero), ambos almacenados en tanques separados. El sistema que se usa en la planta de cal de SIDOR permite quemar cualquier tipo de aceite en cualquiera de los dos hornos disponibles (SIDOR, 2001).

El sistema de quemado está dividido en dos subsistemas, el contaminado y el recuperado. El *subsistema de aceite contaminado* (el del tanque grande, figuras 2.7 y 2.8) se compone básicamente de un tanque de 100 m³, dos bombas, un filtro antes de las bombas, un filtro auto limpiante, un calentador que permite elevar la temperatura del aceite a un valor determinado para así lograr una viscosidad óptima del fluido y un arreglo de válvulas que permite llevar al aceite contaminado a cualquiera de los dos hornos. El *subsistema de aceite recuperable* se encuentra compuesto de la misma manera que el de aceite contaminado, solo que el tanque es de 35 m³ y no posee el calentador de aceite ni el filtro auto limpiante, ya que la viscosidad del aceite recuperable (ALUi y ALUa) es óptima y este además es un aceite mucho más limpio.

Son seis las válvulas principales (válvulas de actuación) en cada sistema: la válvula a la salida del tanque, las que están previo a las bombas, la que habilita la inyección del aceite al horno, la que permite la inyección de un barrido de aire y una válvula de tres vías que permite regular la presión del sistema, enviando aceite al horno o recirculándolo al tanque, y

adicionalmente una válvula común que permite la inyección de un determinado aceite a cualquiera de los dos hornos (Figuras 2.7 y 2.8).

Este sistema de inyección de aceites es totalmente automatizado y el control se realiza desde la pantalla de un *PLC* (controlador lógico programable), permitiendo que las paradas y arranques se realicen desde la sala de control (SIDOR, 2001).

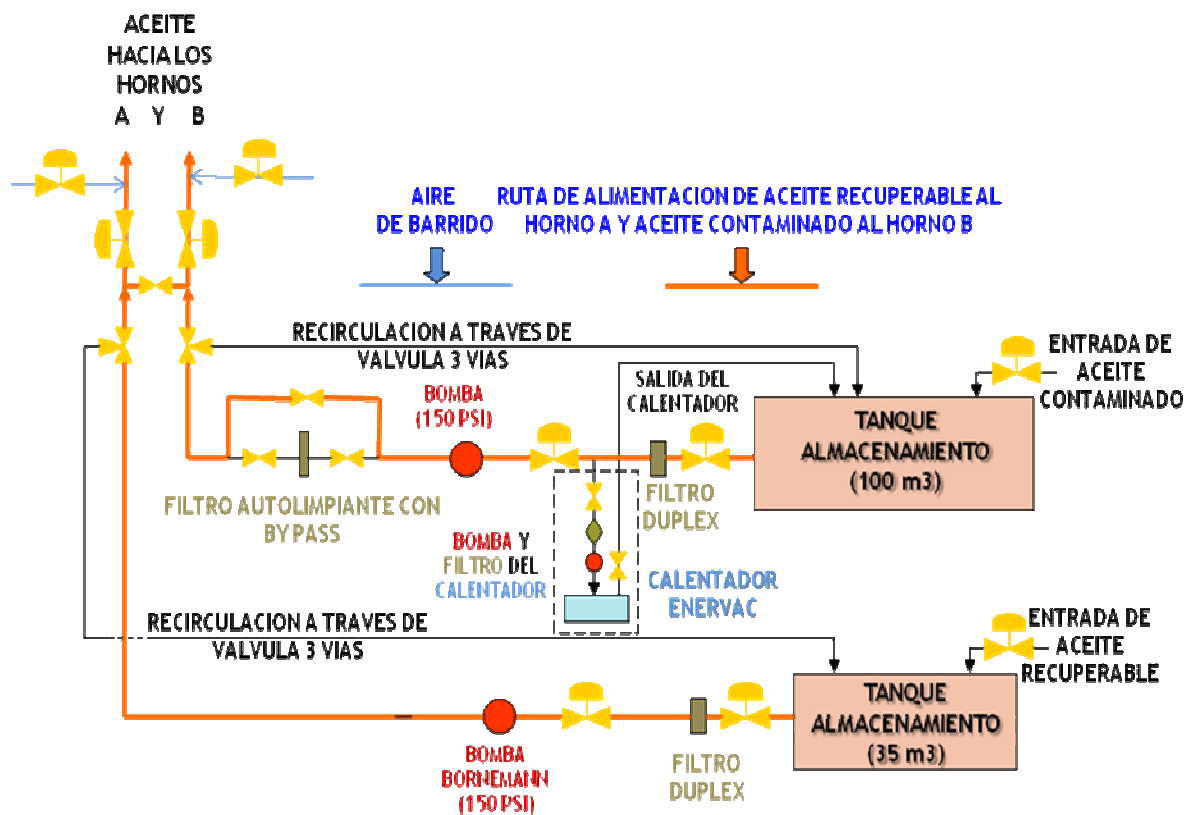


Figura 2.7. Diagrama del sistema de quemado de aceites en la planta de cal de SIDOR (SIDOR, 2001).

2.11.1. Descripción general del proceso

Al colocar en marcha el sistema arranca con un tiempo de seguridad que dura aproximadamente 15 segundos y haciendo sonar una alarma, que da aviso al inicio del quemado. Pasado este tiempo se enciende/n las bombas seleccionadas y el sistema comienza a recircular aceite por un determinado tiempo. Finalizado el tiempo de recirculación comienza la etapa de suministro de aceite al horno seleccionado, en este modo la válvula de tres vías comienza a abrirse enviando el aceite en dirección al horno, y una vez alcanzada una presión de aproximadamente 160 psi (presión de apertura) en la entrada del horno, se abre la válvula de inyección de aceite respectiva (la presión de apertura es mayor a la presión de trabajo ya que al abrir la válvula de inyección de aceite cae abruptamente la presión y de esa manera se amortigua dicha caída). De esta forma se mantiene el sistema funcionando, inyectando aceite a presión de 125 psi (presión de trabajo).

Para detener el suministro de aceite se apaga la bomba y se cierra la válvula de inyección de aceite y automáticamente se abre la de inyección de aire (proveniente de un pulmón de aire), purgando el aceite residual de la lanza de inyección, esta última válvula permanece abierta durante 25 minutos y se cierra automáticamente.

El sistema se detiene automáticamente y pasa al purgado automático con aire ante las siguientes situaciones: falla de alguna de las válvulas, falla de alguna de las bombas en marcha, algún filtro tapado, presión fuera de rango de trabajo, tanque de aceite vacío o falla o apagado del quemador del horno.

Mientras el sistema de inyección de aceite se encuentra funcionando las válvulas de alimentación del tanque permanece bloqueada por medidas de seguridad.

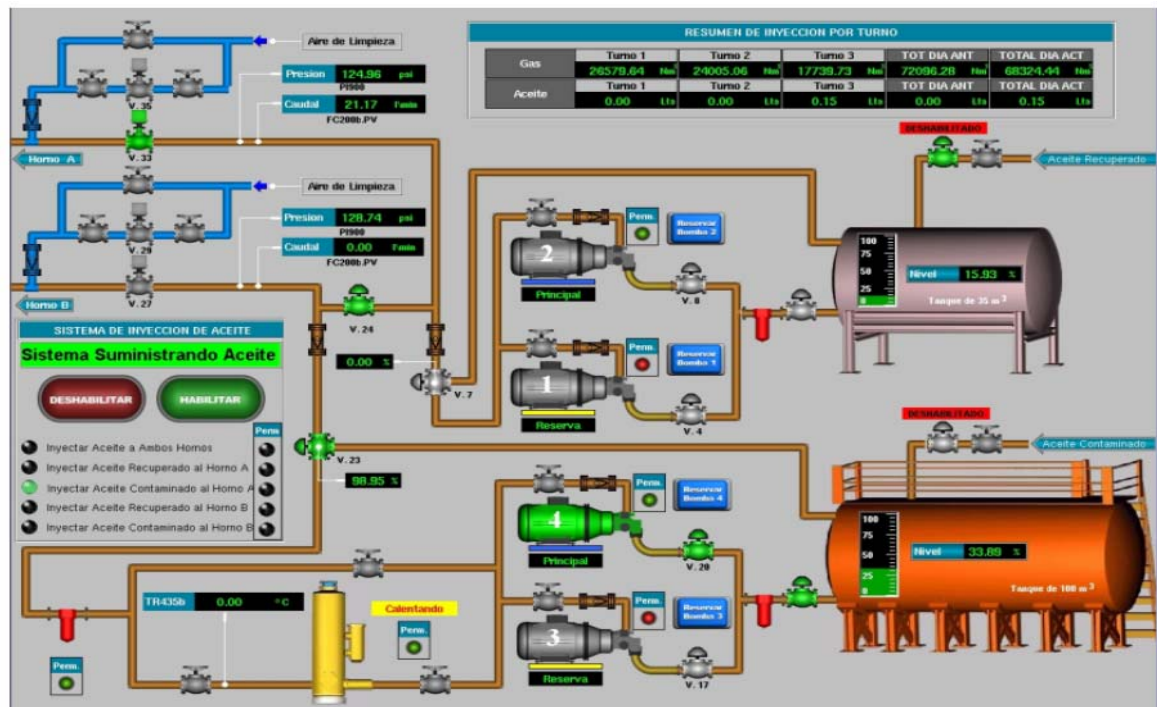


Figura 2.8. Sistema de quemado de aceite en la planta de cal de SIDOR.

2.12.- Descripción del proceso de la planta de secado del mineral de hierro de ORINOCO IRON S.C.S.

El secado del mineral de hierro tiene por objeto remover la humedad relativa del mismo antes de incorporarlos al sistema de reactores de forma continua y oportuna. El mineral de hierro recibido en planta es transportado por un sistema de correas que según sus características fisicoquímicas es apilado en patio o alimentado directamente al proceso para su respectiva preparación, figura 2.9 Durante el transporte del mineral húmedo al proceso,

las partículas de mineral mayor o igual a 5/8" son separadas en una batería de cribado, con lo cual se consigue adaptar el mineral al proceso. Paralelamente, una corriente de *remet* es alimentada al mineral húmedo, previo al cribado, con la finalidad de aportar hierro metálico (Fe°) al sistema. (Contreras, Ramos, 2005)

La mezcla de mineral cribado, con un contenido de humedad de 6%, es alimentada a los secadores de mineral que en contracorriente con los gases de combustión, remueven el agua libre a una temperatura aproximada de 120 °C. Junto a los gases de combustión, una corriente de aire fluye a través de una parrilla distribuidora de gas, la cual mantiene los sólidos en estado fluidizado. Los gases de combustión junto al aire de fluidización arrastran los ultrafinos hacia las cámaras separadoras donde el exceso de éstos es separado por las cámaras multicíclicas. Estos finos separados son humedecidos y acarreados hacia el sistema de despacho. La corriente de gases a la salida de las cámaras multiciclónica, es enviada a un sistema de lavado de gases, antes de ser emitidos a la atmósfera. (Contreras, Ramos, 2005)

El mineral sale de los secadores con un contenido de humedad menor que 0,2% y con una temperatura de 90 a 100°C. Todas las partículas de mineral mayor que 7,1 mm son separadas en un sistema de cribado y son enviadas al sistema de molienda para una posterior realimentación al sistema de cribado. El material de tamaño menor que 7,1 mm es acarreado a través de un sistema de transporte de correas hasta almacenarlos en los silos de óxido seco (*storages bin*), (Contreras, Ramos, 2005).

2.11. Evaluación técnico-económica de proyectos

El estudio técnico-operativo para la evaluación de proyectos, además de verificar la posibilidad técnica de la implantación del mismo, tiene por objeto analizar y determinar el tamaño y localización óptima de los equipos, las instalaciones y la organización de requerimientos para la realización del proyecto que se pretende. En resumen, consiste en resolver las preguntas referentes a: dónde, cuánto, cuándo, cómo y con qué producir los que se desea; por lo cual el aspecto técnico operativo de un proyecto comprende todo aquello que tenga relación con el funcionamiento y la operatividad del propio proyecto. (Baca, 2008).

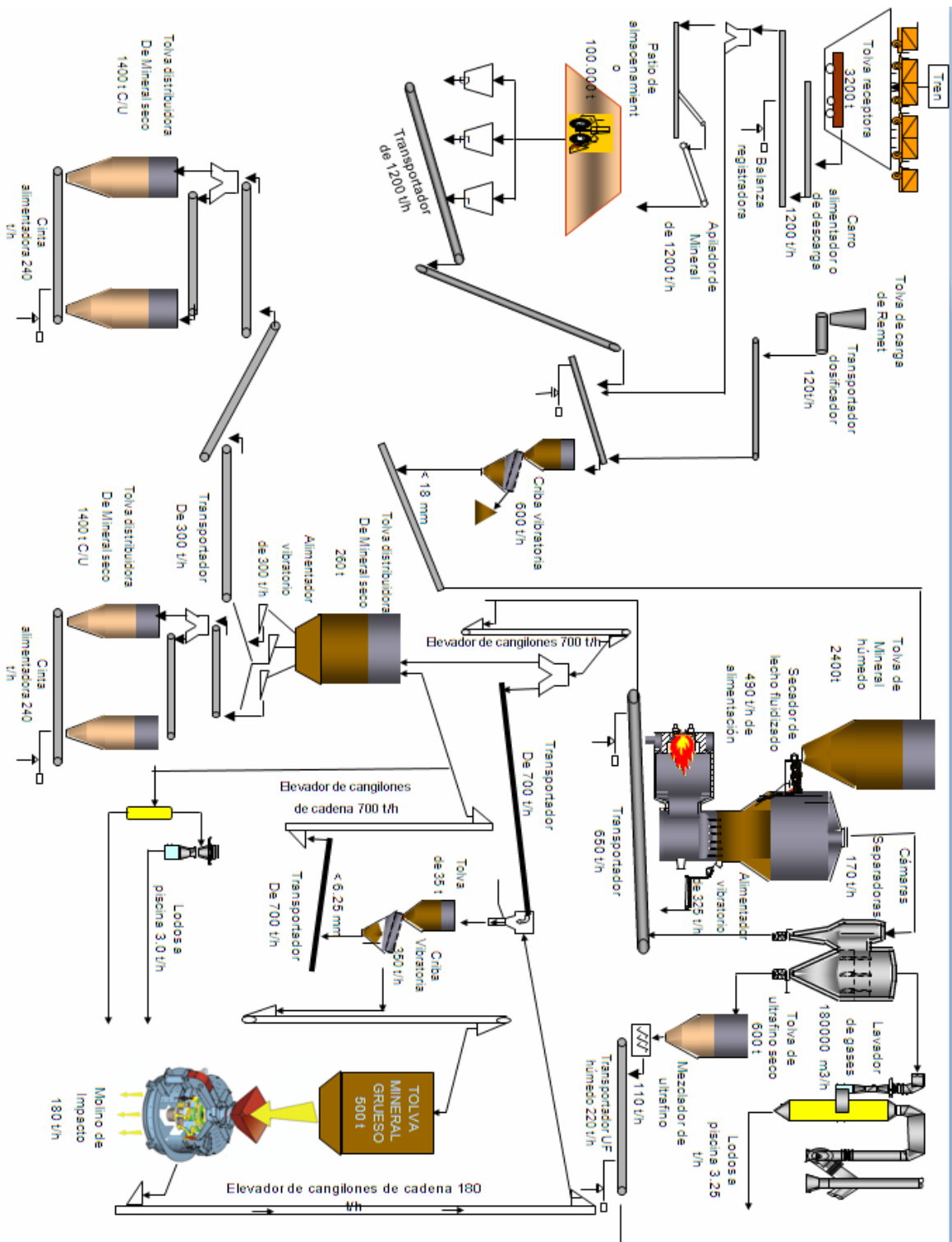


Figura 2.9. Diagrama de la Planta de secado de la empresa Orinoco Iron S.C.S (Contreras, Ramos, 2005)

Por otro lado, el estudio económico pretende determinar el monto de los recursos necesarios para la realización del proyecto, cuál será el costo total de la instalación de los equipos involucrados; y su objetivo es ordenar y sistematizar la información de carácter monetario. La evaluación económica es la parte final de toda secuencia de análisis de la factibilidad de un proyecto, y propone describir los métodos de evaluación que toman en cuenta el valor del dinero a través del tiempo, como son la tasa interna de retorno o rendimiento y el valor presente neto; es la parte más importante, pues es la que al final permite decidir la implantación del proyecto (Baca, 2008).

2.13. Estimado de costos

Un estudio económico, en forma bastante simple, engloba el análisis de todos los factores y criterios más eficaces para una adecuada distribución de los recursos considerando la selección entre una o más alternativas y el valor del dinero en el tiempo. Este último comúnmente representa como valor presente, anual o futuro, como una razón de costo – beneficio, tasa de retorno y como capitalizado.

La estimación del capital a invertir que debe utilizarse en un análisis económico, en particular las cantidades relacionadas con costos, varía desde una estimación preliminar hasta una en detalle, la primera se puede obtener tomando las cifras de los costos de proyectos que fueron terminados en algún momento en el pasado y actualizarlo a través de un índice de costo, el cual es la razón del costo de un artículo hoy con respecto al costo en algún momento en el pasado, o por medio de una relación costo – capacidad que relaciona el costo de un componente, sistema o planta con su capacidad.

Mientras que el otro, está basado en la información definitiva de planos, especificaciones de diseño y el estado del terreno (Peters, Timmerhaus, 1993)

2.13.1. Tipo de estimación de costo de capital

Según la asociación Americana de Ingeniería de Costos (American Association of Cost Engineers) las estimaciones de costos tienen las siguientes denominaciones (Inelectra, 2002):

- ❖ Estimación de orden de magnitud (estimación relativa): se basa en datos previos sobre costos similares; exactitud probable de esta estimación por encima de $\pm 30\%$.
- ❖ Estimación de estudio (que utiliza factores): se basa en el conocimiento de los equipos más importantes; exactitud probable de esta estimación hasta un $\pm 30\%$.
- ❖ Estimación preliminar (estimación que permite preparar un presupuesto; estimación de márgenes): se basa en suficiente información como para que se pueda preparar un presupuesto; exactitud probable de esta estimación dentro del $\pm 20\%$.
- ❖ Estimación definitiva (estimación para el control el proyecto): que se basa en la información casi completa pero es anterior a los diseños y especificaciones definitivas; exactitud probable de esta estimación dentro del $\pm 10\%$.
- ❖ Estimación detallada (estimación del contratista): se basa en los planos definitivos, especificaciones del terreno; exactitud probable de esta estimación dentro del $\pm 5\%$.

Es importante mencionar también la clasificación de estimado de costo que la industria petrolera nacional, Petróleos de Venezuela (PDVSA) maneja para sus proyectos de ingeniería, adaptados de los criterios anteriormente expuestos. Según el manual de presupuesto de inversiones de PDVSA los costos se subdividen en:

- a.** Costo clase I (estimado de control) – estimado detallado de costo relacionado con la fase de ejecución de la obra: representa una estimación hecha después de tener disponibles las especificaciones básicas del diseño y, al menos después de haberse completado algo del trabajo mecánico detallado (fundaciones, estructuras, despliegues de líneas y tuberías). Generalmente este estimado se hace durante la fase del proyecto en el cual se gestionan equipos y/o durante la fase de construcción de la obra. Se prepara utilizando técnicas de estimación detallada e incluye: licitaciones firmes, cotizaciones firmes de vendedores respecto a equipos mayores, y costos de materiales definidos como resultado de la ingeniería detallada. Se incluyen también desembolsos efectuados o compromisos financieros hechos hasta el momento de la estimación. La presión de este tipo de estimado es tal que la probabilidad de que el costo final difiera en aproximadamente el 10 % del estimado.
- b.** Costo clase II (presupuesto) – estimado detallado de costo basado en especificación es completadas de diseño básico: se basa en estimaciones con las especificaciones de diseño básico contempladas, las cuales son de un enlace suficiente para definir integralmente el proyecto para el diseño y la ingeniería detallada subsiguiente. Esto significa que los principales componentes de equipos (incluyen renglones tales como bombas, compresores, hornos, hornos, tuberías, equipos de instrumentación, calderas, etc.), edificios, requerimientos de almacenaje, etc.; se especifiquen en lo referente al tamaño, papel que jugarán,

detalles críticos de diseño, materiales de construcción, distribución física, etc. La exactitud que puede esperarse de una estimación basada en ese nivel de definición es tal que el costo final debe estar dentro de un 10% más o menos de la estimación.

- c.** Costo clase III (presupuesto) – estimado de costo basado en el diseño, es una estimación hecha después de la “fase de diseño” del proyecto se finaliza y el trabajo de laboratorio se completa. También deben estar completos los estudios de selección del tipo, tamaño y trabajo de diseño para las plantas de procesamiento y otras unidades, y comenzado el trabajo de diseño de equipos básicos lo cual incluye a las especificaciones de diseño. La estimación de clase III se genera utilizando curvas de inversión o técnicas de prorrateo equivalentes, las cuales se basan en definición de componentes importantes de equipos tales como unidades de procesamiento completas o secciones de componentes principales. En esta etapa, un proyecto se define en términos de tamaño y parámetros de diseños claves para plantas de procesos o unidades tales como plantas de productos livianos, facilidades para la disposición de desperdicios, plantas de energía eléctrica, etc.; la precisión esta dentro de un rango que va desde un 15 a 20% del estimado.
- d.** Costo clase IV (fase de ingeniería conceptual) – estimado de costos para fines de escogencia del proyecto: se prepara antes de finalizar la “base del diseño”. La técnica utilizada para la estimación es la misma utilizada en la estimación clase III, la cual se basa solamente en definiciones de unidades de procesamiento. Debido a que la experiencia muestra que cambios significativos ocurren en muchos proyectos, antes de la finalización de la “base del diseño”, una estimación hecha en este punto del tiempo tiene una probabilidad mayor de sobrepasarse o de resultar

por debajo del estimado, que en una estimación de clase III. El rango de precisión va de un 30 a 40% del estimado final.

- e. Costo clase V (fase de estudio) – estimado de costos para fines de pre-planificación: se basa en una definición global del proyecto, donde la información disponible se limita esencialmente al tamaño, o a la ubicación general; al tipo de producto y al tipo de alimentación, a este nivel no se habla de exactitud del estimado, su exactitud y confiabilidad dependerán de la pericia con que se evalué, factorice o escale la información estadística de costos de proyectos similares anteriormente ejecutados o en actual etapa de desarrollo. El rango de precisión es de 50 %.

CAPÍTULO 3

DESARROLLO DEL TRABAJO

En este capítulo se explica la metodología utilizada para desarrollar los objetivos específicos planteados, desde la recopilación de la información correspondiente a regulaciones, manejo, tipo y cantidades de aceites lubricantes usados en Orinoco Iron y Venprecar, la caracterización fisicoquímica de los ALU's (efectuado en el laboratorio de Hidrocarburos del departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Oriente), hasta el estudio técnico económico para el reuso ecoeficiente de los aceites en cuestión como combustible complementario en las cámaras de combustión de los secadores de lecho fluidizado pertenecientes a la planta de secado de mineral de hierro de Orinoco Iron S.C.S.

3.1. Revisión de la información sobre regulaciones, manejo, tipo y cantidades de aceites lubricantes usados generados por las empresas ORINOCO IRON y VEMPRECAR

Para llevar a cabo este objetivo primero se recolectó información sobre las cantidades y tipos de ALU's generados por las empresas Orinoco Iron y Venprecar desde el 2006 hasta el 2009. Luego se revisó la gestión que estas empresas le dan a los ALU's generados en las distintas áreas que conforman su proceso de producción, es decir, desde el punto de generación hasta el lugar de almacenamiento temporal, ubicado en el patio de desechos de Orinoco Iron o en alguna trampa o fosa de aceite; la finalidad fue detectar

posibles fallas en los procesos gestión, específicamente en el trasegado y almacenamiento que estas empresas aplican a los ALU's que generan.

3.1.1. Tipos y cantidad de ALU's

Los ALU's generados por Orinoco Iron y Venprecar, se clasificaron según su procedencia y se excluyeron a los ALUd (aceites lubricantes dieléctricos) del desarrollo de este trabajo de grado por dos motivos: estos aceites contienen más de 50 ppm de *PCB* (siglas en inglés para referirse a bifenilos policlorados) y su gestión es realizada por la empresa que realiza el mantenimiento a los transformadores y condensadores eléctricos.

En conformidad con lo establecido en el artículo 43 del decreto 2.635 que dicta las *"Normas para el control de la recuperación de materiales peligrosos y el manejo de los desechos peligrosos"*, Orinoco Iron y Venprecar, anualmente, deben presentar un balance de desechos y materiales peligrosos al Ministerio del Ambiente, especificando el tipo y cantidad de sustancia generada; es por ello que la cantidad de ALU's generados por estas empresas se obtuvo a partir de los balances anuales de desechos peligrosos, suministrados por el personal de la unidad de ambiente de Orinoco Iron y Venprecar.

En la tabla 3.1 se reporta la cantidad de ALU's tratada por la empresa *Ecochemical C.A.*, para darle una correcta disposición final, y la cantidad almacenada en el "patio de hidrocarburos usados" de Orinoco Iron desde el 2006 hasta el 2009.

Tabla 3.1. Cantidad de ALU's generados por Orinoco Iron y Venprecar desde el año 2006 hasta el 2009.

| Empresa | Volumen de ALU's (l) | | | |
|---------|----------------------|---------|------------|---------|
| | Orinoco Iron | | Venprecar | |
| | Almacenado | Tratado | Almacenado | Tratado |
| 2006 | 3.000 | 112.116 | 0 | 19.800 |
| 2007 | 3.000 | 112.300 | 0 | 16.900 |
| 2008 | 3.000 | 116.000 | 2.000 | 16.900 |
| 2009 | 48.000 | 54.700 | 4.148 | 16.900 |

Fuente: Balances anuales de desechos y residuos peligrosos generados por Orinoco Iron y Venprecar desde el 2006 al 2009.

Con los datos de la tabla 3.1 se calculó el total de ALU's generado por Orinoco Iron y Venprecar en ese periodo.

3.1.2. Regulaciones, manejo y almacenamiento

Se entrevistó al personal de Orinoco Iron y Venprecar encargado de realizar las labores de gestión de los ALU's desde el punto de generación hasta el almacenamiento en los tanques de almacenamiento temporal, tambores o unicubos en el patio de hidrocarburos usados de Orinoco Iron. En la figura D.1 se muestran los tanques de almacenamiento y mientras que en la figura D.2 se refleja la condición insegura en la que los tambores y .unicubos se encuentran resguardados en los alrededores del patio de hidrocarburos usados.

Por otro lado, se revisaron los procedimientos de inspección, medición y de trasegado de los ALU's en las trampas de aceite, con la intención de detectar fallas en los mismos. En la figura D.3 se ilustra un esquema de la

finalidad de una trampa de aceite y la tabla D.1 contiene un inventario de las trampas y fosas de aceite.

También se revisaron las condiciones de almacenamiento tanto en las trampas de aceite y en el patio de hidrocarburos usados. Este estudio se complementó con un ensayo para la determinación del contenido de agua y sedimentos a muestras representativas de aceite proveniente de los tanques de almacenamiento de ALU's (tanque 1, 2 y 3 en la figura D.1).

3.2. Caracterización los aceites lubricantes usados, midiendo sus propiedades fisicoquímicas

Para esta caracterización se recolectaron muestras de ALU's para determinar las siguientes propiedades fisicoquímicas: la gravedad API (ASTM D 287), densidad (ASTM D-100), contenido de agua y sedimentos (ASTM D 98), viscosidad absoluta (ASTM D 88), punto de fluidez (ASTM D 97), punto de inflamación y de combustión (ASTM D 92), contenido de carbón (ASTM D 189) y el calor de combustión o poder calorífico (ASTM D 240). También se aplicó la técnica de decantación gravitacional.

Los ALU's empleados en este estudio provienen de tres contenedores de aceites de seis mil litros de capacidad (6000 L) ubicados en el patio de hidrocarburos usados de la empresa Orinoco Iron, y fueron caracterizados en el laboratorio de Química Orgánica y en el Laboratorio de Hidrocarburos del departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Oriente y las propiedades obtenidas se muestran en la tabla 4.4, en la que también se incluyen las propiedades de un combustible comercial con propiedades fisicoquímicas similares a la de un ALU.

Es importante resaltar que estos análisis se realizaron únicamente al aceite sobrenadante contenido en los tanques de almacenamiento, es decir sin el agua emulsionada lodos y sedimentos del fondo del contenedor.

La caracterización realizada a los ALU's en este estudio, se complementó con una caracterización que la empresa SIDOR realizó a sus ALU's, y con ella se obtuvieron propiedades y características sumamente importantes que poseen los ALU's (contenido de metales, de hidrocarburos aromáticos y compuestos clorados) que no se pudieron realizar en este trabajo debido a factores económicos y a la falta de reactivos y de equipos de los laboratorio necesarios para realizar las pruebas.

3.2.1. Recolección de las muestras

Se recolectaron dos juegos de muestras de ALU's, el primer juego estuvo conformado por tres muestras representativas de 500 ml de todo el contenido de los tanques 1, 2 y 3 del patio de hidrocarburos usados (Figura D.1), mientras que el segundo juego estuvo conformado por tres muestras de 1.100 ml de aceite del tanque 1, 2 y 3.

El primer juego de muestras se tomó para determinar el contenido porcentual de agua, sedimentos y aceite en cada uno de los tanques. En la tabla 3.2 se muestran la cantidad y tipo de aceite recolectado para la determinación del porcentaje de agua y sedimentos.

El segundo juego de muestras de ALU's se tomó sólo del sobrenadante de cada uno de los tanques para que se le realizara la caracterización fisicoquímica de sus propiedades. En la tabla 3.3 se reportaron las cantidades de ALU recolectadas. Cabe destacar que la muestra de aceite

tomada de cada tanque se recolectó con la finalidad de obtener la menor cantidad posible de agua y sedimentos.

Tabla 3.2. Cantidad de ALU's recolectada para la determinación del contenido de agua y sedimentos de los tanques dealmacenamiento

| <i>Tanque/ Muestra</i> | <i>Tipo de ALU en el tanque</i> | <i>Cantidad de ALU's (l)</i> |
|----------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| 1 | ALUa | 0,5 |
| 2 | ALUi | 0,5 |
| 3 | ALUi | 0,5 |

Tabla 3.3. Cantidad de ALU's recolectada para la realización de la caracterización fisicoquímica

| <i>Tanque/ Muestra</i> | <i>Tipo de ALU en el tanque</i> | <i>Cantidad de ALU's (l)</i> |
|----------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| 1/ALUaT1 | ALUa | 1,1 |
| 2/ALUiT2 | ALUi | 1,1 |
| 3/ALUiT3 | ALUi | 1,1 |

3.2.2. Decantación gravitacional

Consistió en dejar reposar los aceites contenidos en los recipientes por un lapso de 24 horas aproximadamente y de ser necesario, retirar el sobrenadante (con ayuda de una pipeta), para poder realizar las pruebas de caracterización antes mencionadas, a excepción de la determinación agua y sedimentos.

3.2.3. Determinación de la densidad, densidad relativa y gravedad API, aplicando la norma ASTM D 287

La muestra de ALU fue agitada vigorosamente durante un poco más de un minuto, se midió su temperatura y una porción de 500 ml fue transferida al un cilindro graduado de 500ml de capacidad, evitando la formación de burbujas y evaporación de componentes volátiles (debe eliminarse cualquier burbuja de aire, tocando con un trozo de papel limpio antes de introducir el hidrómetro), luego se colocó el cilindro con la muestra en una superficie plana y en un lugar libre de corrientes de aire se procedió a medir la temperatura antes y después de introducir el hidrómetro (si variaba en 1°F se debía repetir el análisis hasta que permanezca constante la temperatura de la muestra). El hidrómetro adecuado, también a una temperatura similar, se introdujo suavemente dentro del cilindro graduado. Después, la escala del hidrómetro y la temperatura de la muestra fueron leídas; y los datos se reportaron en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Valores de la gravedad API, a la temperatura de medición.

| Muestra | °API | T (°F) | T (°C) |
|---------|------|--------|--------|
| ALUaT1 | 29,7 | 87,8 | 31 |
| ALUiT2 | 30 | 89,6 | 32 |
| ALUiT3 | 30,7 | 88,7 | 31,5 |

Donde:

°API: Gravedad API (adimensional).

T: Temperatura.

ALUaT1: Aceite lubricante usado grado automotor proveniente del tanque de almacenamiento temporal 1.

ALUiT2: Aceite lubricante usado grado industrial proveniente del tanque de almacenamiento temporal 2.

ALUiT3: Aceite lubricante usado grado industrial proveniente del tanque de almacenamiento temporal 3.

Tal como se describe en la norma ASTM D 287-80, la lectura registrada en el hidrómetro fue corregida a la temperatura de referencia de 60°F (15,56°C) mediante la tabla E.1 del anexo E. La corrección se hizo interceptando el valor de la gravedad API a 60°F. Para el ALUaT1 la lectura registrada del hidrómetro fue de 29,7°API a una temperatura observada de 87,8°F (tabla 3.4 ubicada en este capítulo) y la gravedad API corregida es de 27,92°API. Para efectuar dicha corrección de la gravedad API, en la tabla E.1 se reportó la temperatura a la cual fue medida la gravedad API y luego se realizó una interpolación lineal, asumiendo que el comportamiento de la gravedad API estándar es lineal, se realizó el cálculo como se muestra a continuación:

Interpolación de los datos tomados de la tabla

Gravedad API a la temperatura observada a 87,8°F

| | | |
|----|-------------|----|
| 29 | 29,7 | 30 |
|----|-------------|----|

Gravedad correspondiente a 60 °F

| | | |
|-------|----------|------|
| 27,22 | X | 28,2 |
|-------|----------|------|

X=27,92 API

Las gravedad API obtenida para las otras dos muestras de ALUi se reportaron en las tabla 4.4.

Con las gravedades API corregidas de la tabla 4.4 y utilizando la ecuación 3.1 se pudo calcular la gravedad específica 60/60°F ($G_{60/60}^{\circ F}$).

$$G_{60/60}^{\circ F} = \frac{141,5}{131,5 + {}^{\circ}API} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Para la gravedad API corregida del ALUa se obtuvo:

$$G_{60/60}^{\circ F} = \frac{141,5}{131,5 + 27,92} = 0,8876$$

La gravedad específica correspondiente a las otras dos muestras de aceite se reportó en la tabla 4.4.

3.2.4. Determinación de la densidad, aplicando la norma ASTM D 100.

Este ensayo se realizó pesando un picnómetro (figura E.2) seco y vacío, luego se llenó con ALU a la temperatura ambiente y se tapó, permitiendo que el exceso de aceite llenara completamente al capilar del picnómetro; el exceso de aceite se limpió con papel absorbente y finalmente se procedió a pesar. Se repitió el ensayo para la misma muestra a las temperaturas de 25,6, 40 y 100°C colocando subsecuentemente el picnómetro en un baño térmico a la temperatura deseada, limpiando paulatinamente el exceso de ALU saliente del capilar debido al incremento volumétrico del líquido; cuando el ALU dejaba de salir por el capilar, se retiró el picnómetro del baño, se secó, se introdujo en un desecador (para retirar la humedad) durante 10 minutos y finalmente se pesó. Se determinó la

densidad del ALU con los datos dispuestos en la tabla 3.5 a través de la ecuación 3.4, desarrollada en la muestra de cálculo.

Tabla 3.5. Valores de volumen y masa del picnómetro lleno y vacío.

| | <i>T</i> (°C) | <i>V_p</i> (ml) | <i>mp_{Vacio}</i> (g) | <i>Mp_{lleno}</i> (g) |
|--------|---------------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| ALUaT1 | | 50 | 32,3698 | 76,5807 |
| ALUiT2 | 25,6 | 25 | 22,8094 | 44,7898 |
| ALUiT3 | | 50 | 31,7474 | 75,6618 |
| ALUaT1 | | 50 | 32,3698 | 76,2581 |
| ALUiT2 | 40 | 25 | 22,8094 | 44,6182 |
| ALUiT3 | | 50 | 31,7474 | 75,3366 |
| ALUaT1 | | 50 | 32,3698 | 74,2046 |
| ALUiT2 | 100 | 25 | 22,8094 | 43,5957 |
| ALUiT3 | | 50 | 31,7474 | 73,2753 |

Donde:

V_p: Volumen del picnómetro (ml).

mp_{Vacio}: masa del picnómetro vacío (g).

mp_{lleno}: masa del picnómetro lleno (g).

Para el cálculo de la densidad de la muestra a 60°F se utilizaron los valores de gravedad específica, obtenidos por medio de la ecuación 3.1. Sabiendo que la gravedad específica se define como:

$$G.E = \frac{\rho_{@T}}{\rho_{referencia}} \quad \text{Ec. (3.2)}$$

Se procedió a desejar la densidad de la muestra de la ecuación 3.2 para obtener:

$$\rho_{@T} = G.E \times \rho_{referencia} \quad \text{Ec. (3.3)}$$

Donde:

G.E: gravedad especifica (adimensional).

$\rho_{@T}$: densidad de la muestra a una temperatura(g/ml).

$\rho_{referencia}$: densidad de referencia, agua a 4°C (g/ml).

Para la muestra de ALUaT1, la densidad a una temperatura de 60°F se calculó con la ecuación 3.3 de la siguiente forma:

$$\rho_{60F} = 0,8876 \times 1 \frac{g}{ml}$$

$$\rho_{60F} = 0,8876 \frac{g}{ml}$$

Los demás resultados de densidad a 60°F se encuentran reportados en la tabla 4.4.

Para el cálculo de la densidad a 25,6, 40, y 100 °C se utilizo el método del picnómetro (ASTM D 100). Para la densidad de la muestra ALUaT1 se introdujeron en la ecuación 3.4 los datos del volumen, masa del picnómetro lleno y masa del picnómetro vacío a 25,6°C (Tabla 3.5).

$$\rho = \frac{mp_{lleno} - mp_{vacio}}{V} \quad \text{(Ec. 3.4)}$$

Donde:

ρ : densidad (g/ml).

mp_{lleno} : masa del picnómetro lleno (g).

mp_{vacio} : masa del picnómetro vacío (g).

V: volumen del picnómetro (ml).

$$\rho = \frac{(76,5807 - 32,3698)g}{50ml}$$

$$\rho = 0,8842 \frac{g}{ml}$$

Los valores obtenidos para la densidad a 25,6, 40, y 100 °C se reportaron en la tabla 4.4.

3.2.5. Determinación de agua y sedimentos, aplicando la norma ASTM-D 96

En este análisis se añadió Xileno hidrosaturado en un tubo de centrifuga hasta 5 mL, luego se agregaron 5 mL de la muestra de ALU a analizar, se colocó un tapón al tubo y se agitó vigorosamente durante un minuto aproximadamente, seguidamente se introdujeron hasta la marca de 10 mL en un baño de calentamiento (Figura E.3, anexo E) tapado con papel aluminio (para evitar pérdida de los componentes volátiles), por un tiempo mínimo de 10 minutos a una temperatura de 130°F (54,44°C), luego se tapó y se agitó el tubo, para garantizar una mezcla uniforme de la muestra con el solvente. Finalmente se colocaron los tubos en la centrifugadora (Figura E.4), a una velocidad de 1.500 rpm durante 10 minutos, una vez finalizado este tiempo, se anotó el volumen combinado de agua y sedimentos leído en el fondo del tubo. En caso de que existiera emulsión al extraer los tubos de la centrifugadora, se procede a agregar 3 gotas de solución desemulsionante concentrada (NALCO EC2365A) y se repite todo el procedimiento anteriormente mencionado. Con el volumen combinado de agua y sedimento obtenido se utilizó la ecuación 3.5 para obtener el porcentaje de agua y sedimentos. En la tabla 3.6 fueron reportados los datos obtenidos para determinar el contenido de agua y sedimentos de los tanques, mientras que

en la tabla 3.11 se tabularon los datos obtenidos para las muestras tomadas al sobrenadante de los tanques.

Tabla 3.6. Volumen de agua y sedimentos presente en los tanques de almacenamiento temporal.

| <i>Muestra</i> | <i>Corrida</i> | <i>Volumen de ALU (ml)</i> | | <i>Volumen de agua y sedimentos (ml)</i> | | <i>Volumen de Sedimentos (ml)</i> | |
|----------------|----------------|----------------------------|--------------|--|--------------|-----------------------------------|--------------|
| | | <i>T.C 1</i> | <i>T.C 2</i> | <i>T.C 1</i> | <i>T.C 2</i> | <i>T.C 1</i> | <i>T.C 2</i> |
| ALUaT1 | Sin | 5 | 5 | 1,1 | 1,0 | 0,4 | 0,3 |
| ALUiT2 | demulsificante | 5 | 5 | 1,5 | 1,5 | 0,3 | 0,35 |
| ALUiT3 | | 5 | 5 | 2,2 | 2,2 | 0,4 | 0,35 |
| ALUaT1 | Con | 5 | 5 | 1,1 | 1 | 0,4 | 0,3 |
| ALUiT2 | demulsificante | 5 | 5 | 1,5 | 1,5 | 0,3 | 0,35 |
| ALUiT3 | | 5 | 5 | 2,2 | 2,2 | 0,4 | 0,35 |

Donde:

T.C 1: tubo centrifugo 1.

T.C 2: tubo centrifugo 2.

El cálculo del porcentaje en volumen de agua y sedimentos total de las muestras se realizó de la siguiente manera con la ecuación 3.5 y los datos de las tablas 3.10 y 3.11.

$$\% AyS = \frac{V_{TC1} + V_{TC2}}{V} \times 100 \quad \text{(Ec. 3.5)}$$

Donde:

$\% AyS$: porcentaje de agua y sedimentos en la muestra de ALU (%V/V).

V_{TC1} : volumen de agua y sedimento del Tubo centrifugo 1 (ml).

V_{TC2} : volumen de agua y sedimento del tubo centrifugo 2 (ml).

V : volumen de ALU utilizado.

Para la corrida con demulsificante, el volumen leído para la muestra de ALUaT1 en el tubo de centrifuga 1 y 2 fue de 1,1 y 1 mL respectivamente (ver tabla 3.6), y el porcentaje de agua y sedimentos se calculó con la ecuación 3.5 de la siguiente manera:

$$\%AyS = \frac{1,1ml + 1ml}{10ml} \times 100$$

$$\%AyS = 21\% \frac{V}{V}$$

El resto de los porcentajes en volumen de agua y sedimentos de las muestras analizadas de la tabla 3.6 se encuentran reportados en la tabla 4.3 y los de la tabla 3.7 se tabularon en la tabla 4.4.

Tabla 3.7. Volumen de agua y sedimento presente en el ALU sobrenadante de los tanques de almacenamiento temporal.

| Lecturas | Volumen de ALU (ml) | | Volumen de agua y sedimentos (ml) | | Observaciones |
|----------|---------------------|-------|-----------------------------------|-------|---|
| | T.C 1 | T.C 2 | T.C 1 | T.C 2 | Tubo 1 y 2 |
| ALUaT1 | 5 | 5 | <<0,1 | <<0,1 | Agua y muy poca emulsión Trazas de sedimento |
| ALUiT2 | 5 | 5 | <<0,1 | <<0,1 | Todo mayoritariamente está representado por sedimento |
| ALUaT3 | 5 | 5 | <<0,1 | <<0,1 | Todo mayoritariamente está representado por sedimento |

Debido a que el contenido de sedimentos fue representativo en las muestras analizadas para la determinación de la situación actual de los

tanques de almacenamiento temporal de ALU's, se determinó el porcentaje de sedimentos con la ecuación 3.5 pero sustituyendo en ella los datos del volumen de sedimentos obtenidos en los tubos centrífugos (Tabla 3.6).

Para la corrida con demulsificante, el volumen de sedimento leído para la muestra de ALUaT1 en el tubo de centrifuga 1 y 2 fue de 0,4 y 0,3 mL respectivamente (Tabla 3.6, el porcentaje de sedimentos se calculó con la ecuación 3.5 de la siguiente manera:

$$\%S = \frac{0,4ml + 0,3ml}{10ml} \times 100$$

$$\%S = 7\% \frac{V}{V}$$

Los demás porcentajes en volumen de sedimentos de las muestras analizadas de la tabla 3.6 se encuentran reportados en la tabla 4.3.

Para obtener el porcentaje de agua contenido en los ALU's analizados, se restó al porcentaje de agua y sedimentos (%AyS) el porcentaje de sólidos (%S) correspondientes a la corrida con demulsificante (en donde no había presencia de emulsión), y los resultados se expresaron en la tabla 4.3.

3.2.6. Determinación del punto de fluidez, aplicando la norma ASTM D 97

Esta prueba se aplica a lubricantes y combustibles. Para la ejecución de este análisis se procedió primeramente a colocar los tres recipientes cilíndricos de acero dentro de un recipiente cubico hermético y después se llenó con hielo seco picado. Inmediatamente después se procedió a agitar

durante 1 minuto los recipientes contenedores de las tres muestras de ALU y se agregó aceite hasta la línea marcada en unos recipientes cilíndricos de vidrio que posteriormente se introdujeron dentro de los recipientes de acero previamente dispuestos en el recipiente hermético con el hielo seco. Se procedió a colocarle tapón a los tres tubos de vidrio y a través de su orificio se colocó un termómetro (cuidando que el bulbo del termómetro no tocara el fondo del recipiente); luego cada 2°C se procedió a sacar e inclinar ligeramente los recipientes de vidrio, si el ALU fluía se procedía a colocar nuevamente el recipiente de vidrio dentro del recipiente de acero. Lo anterior se repitió hasta llegar a la temperatura en la que el ALU no fluía al momento de sacar el recipiente de vidrio e inclinarlo como se muestra en la figura 3.1. La temperatura a la cual el ALU deja de fluir es conocida como el punto de fluidez y está reportado en la tabla 3.8.

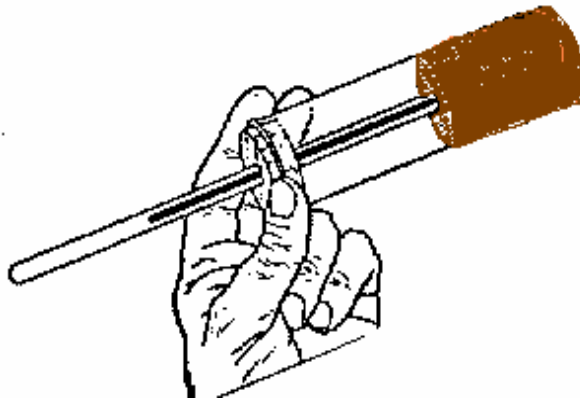


Figura 3.1. Prueba para la determinación del punto de fluidez, ASTM D

3.2.7. Determinación del punto de inflamación y de combustión, en copa abierta o Cleveland (ASTM D 92)

La muestra de ALU extraída se introdujo en la *copa* (cápsula de bronce) hasta la marca de referencia, que descansa sobre una lámina de metal dispuesta de tal forma que los vapores no suban alrededor de la *copa*. Se eliminaron las burbujas de aire en la superficie del ALU, se colocó la *copa* sobre la parrilla del equipo copa abierta Cleveland y luego se colocó el termómetro de 300°C de capacidad en posición vertical mediante un soporte anexo al equipo y cuidando que el bulbo del termómetro quedara en el punto situado entre el centro y el fondo de la *copa*. Se encendió la parrilla para calentar a la muestra de aceite, y por cada 2°C de aumento de temperatura se pasó lentamente una pequeña llama de gas (generada por un soplete anexo al equipo) sobre la superficie del ALU en la *copa*, para probar la inflamabilidad de los vapores de la muestra de ALU conforme al aumento de la temperatura. Cuando la temperatura se iba acercando al punto de inflamación se regulaba el aumento de temperatura a unos 5°C por minuto. La temperatura en la cual ocurre una llama instantánea sobre la superficie del aceite se registra como “punto de inflamación, copa Cleveland abierta”.

El punto de combustión o de fuego se obtuvo continuando el calentamiento hasta que se obtuviera una ignición de la mezcla aire y aceite vaporizado que mantenga una llama en el seno del aceite por al menos 5 segundos, generada al pasar la pequeña llama del soplete a gas por sobre la superficie del ALU; esta temperatura se reporta como “Punto de Combustión”. Esta técnica se aplicó a las muestras de ALU_i y ALU_a recolectadas en Orinoco Iron y los valores obtenidos se encuentran en la tabla 3.8.

Tabla 3.8. Punto de fluidez, de inflamación y de combustión de las muestras de ALU recolectadas para la caracterización fisicoquímica.

| <i>Muestra</i> | <i>Punto de Fluidez (°C)</i> | <i>Punto de Inflamación (°C)</i> | <i>Punto de Combustión (°C)</i> |
|----------------|------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| ALUaT1 | -25 | 206 | 228 |
| ALUiT2 | -8 | 224 | 244 |
| ALUiT3 | -7 | 220 | 246 |

3.2.8. Determinación del carbón Conradson, aplicando la norma ASTM D 189

El contenido de carbón residual se determinó sometiendo a las muestras de ALU a una evaporación completa seguida de un proceso moderado de pirólisis o quemado. Recuérdese que este método da como resultado la tendencia relativa a la formación de carbón de dichos aceites. Para la realización de esta prueba 5g de una muestra de aceite se colocaron dentro de un crisol de porcelana previamente pesado, luego se colocó sobre la rejilla de un trípode y se tapó la capsula de porcelana con su tapa (dejando una pequeña abertura para que salgan los vapores). Se aplicó calor con un mechero de gas hasta que comenzara a salir humo, inmediatamente después se acercó la llama del mechero a los vapores emitidos para que estos comenzaran a quemarse. Cuando el fuego se ha extinguido, se procedió a someter los restos de la muestra de ALU a pirólisis durante unos 7 minutos, entonces se dejó enfriar, se introdujo el crisol dentro de un desecador durante 15 minutos y luego se procedió a pesar. En base a la diferencia de peso con respecto al valor inicial, se calculó el residuo de carbón a través de la ecuación 3.6 desarrollada más adelante en la muestra de cálculos.

Se calculó la tendencia a formar carbón residual de las muestras de ALU con el método de carbón Conradson de la siguiente manera:

$$\%C = \frac{mc_{Final} - mc_{Vacio}}{mc_{lleno} - mc_{Vacio}} \times 100 \quad (\text{Ec. 3.6})$$

Donde:

%C: Carbón Conradson (%P/P).

mc_{Vacio}: masa del crisol de porcelana vacío (g).

mc_{Lleno}: masa del crisol de porcelana lleno (g).

mc_{Final}: masa del crisol de porcelana después de incinerar la muestra de ALU (g).

Tabla 3.9. Valores de la masa del crisol vacío, lleno y después de incinerar la muestra contenida en el, para determinar la tendencia a formar carbón durante la quema de las muestras de ALU analizadas.

| Muestra | mc_{Vacio} (g) | mc_{Lleno} (g) | mc_{Final} (g) |
|----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| ALUaT1 | 24,0221 | 30,2144 | 24,0441 |
| ALUiT2 | 24,2015 | 29,8494 | 24,2198 |
| ALUiT3 | 27,2443 | 32,3255 | 27,2611 |

Donde:

mc_{Vacio}: masa del crisol de porcelana vacío (g).

mc_{Lleno}: masa del crisol de porcelana lleno (g).

mc_{Final}: masa del crisol de porcelana después de quemar la muestra (g).

Se determinó el porcentaje de carbón residual (carbón Conradson) para la muestra ALUaT1, introduciendo los valores extraídos de la tabla 3.9 en la ecuación 3.6:

$$\% C = \frac{24,0441 - 24,0221}{30,2144 - 24,0221} \times 100$$

$$\% C = 0,3553$$

El carbón Conradson se calculó de la misma manera para las otras dos muestras de ALU analizadas en la tabla 3.9, y los valores se reportaron en la tabla 4.4.

3.2.9. Determinación del calor de combustión, aplicando la norma ASTM D 240

Para determinar el poder calorífico de las muestras de ALU analizadas, primeramente se procedió a determinar la capacidad calorífica del calorímetro, para lo cual se colocó una pastilla de ácido benzoico previamente pesada en el crisol de la bomba, se cortó un fragmento de 10 centímetros de alambre de ignición y se conectaron firmemente a los electrodos de la misma (el alambre debe estar en contacto con el combustible a fin de producir la quema), se cerró y luego se presurizó la bomba con oxígeno puro a 25 atmósferas; luego se introdujo un recipiente dentro de la camisa adiabática y se llenó con 1.450 ml de agua, se introdujo la bomba con sumo cuidado dentro del recipiente (para evitar que la pastilla pierda contacto con el alambre) con agua, se conectaron los electrodos de la bomba a la fuente de poder, se cerró la camisa adiabática con su tapa, se introdujo y posteriormente se encendió el termómetro digital, se anotó la temperatura, luego se encendió el agitador durante 5 minutos (con el fin de alcanzar el equilibrio térmico entre los distintos componentes del sistema) anotando la temperatura cada minuto.

Al inicio del minuto 6 se encendió la bomba presionando el botón de ignición y se registraron los valores de temperaturas minuto a minuto (temperaturas reportadas en la tabla E.2 del anexo E) y cuando no se presentaron mas cambios en ella se procedió a desmontar los equipos con cuidado y finalmente se procedió a examinar el interior de la bomba calorimétrica, si en ella no hubo indicios de combustión incompleta, entonces, la corrida se tomaba como correcta.

Para determinar el poder calorífico de los aceites se lleva a cabo el mismo procedimiento explicado anteriormente sustituyendo la pastilla de ácido benzoico por aproximadamente 2 o 3 ml de ALU, pesando el crisol antes y después de introducirse la muestra de aceite. En la tabla 3.10 se muestran los datos recolectados para las pruebas de calibración del calorímetro y en la tabla 3.11 se muestran los datos recolectados para la determinación del poder calorífico de los ALU's.

Tabla 3.10. Valores necesarios para la determinación de la capacidad calorífica del calorímetro con ácido benzoico.

| Corrida | $PC_{Ac.B}$ (kj/kg) | m_{cal} (g) | V_{H_2O} (ml) | $m_{Ac.B}$ (g) | T_i (°C) | T_f (°C) | Ac (cm) |
|---------------------|---|-------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------|
| Calibración1 | | | 1450 | 1,0053 | 27,4 | 30,7 | 7 |
| Calibración2 | 26.454 | 3930,83 | 1200 | 1,0169 | 28,6 | 32,4 | 8 |
| Calibración3 | | | 1200 | 0,9920 | 32 | 35,6 | 8,4 |

Donde:

m_{cal} : masa de calorímetro (g).

V_{H_2O} : volumen de agua agregado(ml).

$m_{ac.B}$: masa de la pastilla de ácido benzoico empleada para la corrida (g).

T_i : temperatura inicial al momento de presionar el botón de ignición (°C).

T_f : temperatura final y máxima alcanzada (°C).

Ac: longitud del alambre de ignición (cm).

PC_{Ac.B:} poder calorífico del ácido benzoico (kJ/kg).

El poder calorífico de los aceites se determinó realizando un balance de energía en la bomba calorimétrica (ecuación 3.7); primeramente para determinar la capacidad calorífica del calorímetro, y luego con ella determinar el poder calorífico de cada una de las muestras de ALU analizadas.

$$Q_{Liberado} = -Q_{Absorbido} \quad (\text{Ec. 3.7})$$

Donde:

Q_{Absorbido:} calor absorbido (%P/P).

Q_{liberado:} calor liberado (g).

Tabla 3.11. Valores de masa de combustible, alambre consumido, temperatura inicial y final, necesarios para la determinación del poder calorífico de los ALU's.

| ALU / C# | m_{cal} (g) | V_{H_2O} (ml) | m_{ci} (g) | m_{cf} (g) | T_i (°C) | T_f (°C) | Ac (cm) | |
|------------|---------------|-----------------|--------------|--------------|------------|------------|---------|-----|
| ALUa T1 | 1 | | 1450 | 13,9966 | 16,2678 | 32,1 | 44,6 | 6,5 |
| | 2 | | 1200 | 13,9947 | 15,2674 | 32,1 | 39,9 | 6 |
| | 3 | | 1200 | 13,9958 | 15,9241 | 32,7 | 44,8 | 7 |
| ALUj T2 | 1 | | 1450 | 13,9949 | 16,479 | 27,1 | 40,8 | 4 |
| | 2 | 3930,83 | 1200 | 13,9972 | 16,1988 | 28 | 41,5 | 4 |
| | 3 | | 1200 | 13,9474 | 15,8473 | 29,8 | 42 | 5 |
| ALUj T3 | 1 | | 1450 | 13,9952 | 16,4408 | 33,9 | 47,5 | 6 |
| | 2 | | 1200 | 14,0022 | 15,7548 | 27,4 | 38,5 | 7,5 |
| | 3 | | 1200 | 13,955 | 15,8471 | 29,5 | 41,5 | 6 |

Donde:

C#: numero de corrida.

m_{ci} : masa del crisol antes de introducir la muestra de ALU.

m_{cf} : masa del crisol luego de introducida la muestra de ALU.

El calor liberado por el alambre de ignición y las muestras analizadas es absorbido solamente por el agua, la bomba y los accesorios del calorímetro (termómetro, agitador y balde de agua), en el cual, debido a su especial diseño, se puede asumir que no hay pérdidas de calor (o de masa) hacia los alrededores durante el tiempo en el que se hacen las mediciones permitiendo asegurar que la bomba calorimétrica y el agua en el que se sumerge constituyen un sistema cerrado, debido a que no entra ni sale calor durante el proceso, y es a volumen constante. Partiendo de lo dicho anteriormente se obtuvo la ecuación 3.8.

$$Q_m + Q_{Ac} = -(Q_{H_2O} + Q_{ByAcc}) \quad (\text{Ec. 3.8})$$

$$Q_m = PC_m \cdot m_m \quad (\text{Ec. 3.9})$$

$$Q_{Ac} = C_{Ac} \cdot L_{ac} \quad (\text{Ec. 3.10})$$

$$Q_{H_2O} = m_{H_2O} \cdot Cp_{H_2O} \cdot \Delta T \quad (\text{Ec. 3.11})$$

$$Q_{ByAcc} = m_{ByAcc} \cdot Cp_{ByAcc} \cdot \Delta T \quad (\text{Ec. 3.12})$$

$$\Delta T = T_f - T_i \quad (\text{Ec. 3.13})$$

Donde:

Q_m : calor liberado por la muestra quemada en el calorímetro (kj).

Q_{Ac} : calor liberado por el alambre de ignición (kj).

Q_{H_2O} : calor absorbido por el agua (kj).

Q_{ByAcc} : calor absorbido por la bomba y los accesorios del calorímetro (kj).

PC_m : poder calorífico de la muestra quemada en el calorímetro (kJ/kg).

m_m : masa de muestra empleada para realizar su quema en el calorímetro (kg).

C_{Ac} : calor de fusión del alambre de ignición, cuyo valor es 2,3 cal/cm (9,62964E-3 kJ/cm), y fue extraído de la figura E.9.

L_{Ac} : longitud del alambre de ignición consumido en la combustión (cm).

m_{H_2O} : cantidad de agua empleada para en el calorímetro (kg).

$C_{P_{H_2O}}$: capacidad calorífica del agua, cuyo valor promedio es 4,177 Kj/Kg·°C (tabla E.2).

ΔT : diferencial de temperatura (°C).

T_i : temperatura inicial del calorímetro (°C).

T_f : temperatura final del calorímetro (°C).

m_{ByAcc} : masa de la bomba calorimétrica y accesorios del calorímetro

$C_{P_{ByAcc}}$: capacidad calorífica del calorímetro (kJ/ kg·°C)

En la ecuación 3.7 y 3.8 el signo negativo indica que el calor se está liberando hacia el agua, la bomba y los accesorios, de tal forma que para fines de cálculo, dicho signo se puede omitir, y al sustituyendo las ecuaciones 3.9, 3.10, 3.11 y 3.12 en la ecuación 3.8 se obtiene:

$$PC_m \cdot m_m + C_{Ac} \cdot L_{Ac} = m_{H_2O} \cdot C_{P_{H_2O}} \cdot \Delta T + m_{ByAcc} \cdot C_{P_{ByAcc}} \cdot \Delta T \quad (\text{Ec. 3.14})$$

De la ecuación 3.14 se despejó la capacidad calorífica del calorímetro y el poder calorífico de la muestra quemada en el crisol de la bomba calorimétrica, obteniéndose las siguientes ecuaciones:

$$Cp_{ByAcc} = \frac{PC_m \cdot m_m + C_{Ac} \cdot L_{Ac} - m_{H2O} \cdot Cp_{H2O} \cdot \Delta T}{m_{ByAcc} \cdot \Delta T} \quad (\text{Ec. 3.15})$$

$$PC_m = \frac{m_{H2O} \cdot Cp_{H2O} \cdot \Delta T + m_{ByAcc} \cdot \overline{Cp}_{ByAcc} \cdot \Delta T - C_{Ac} \cdot L_{Ac}}{m_m} \quad (\text{Ec. 3.16})$$

Donde:

\overline{Cp}_{ByAcc} : Capacidad calorífica promedio de la bomba calorimétrica.

Para la corrida de calibración 1 se calculó la capacidad calorífica del calorímetro (datos Obtenidos de la tabla 3.10) a través de la ecuación 3.15.

$$Cp_{ByAcc} = \frac{26454 \frac{kJ}{kg} \cdot 1,0053 Kg \cdot \frac{1kg}{1000g} + 2,3 \frac{cal}{cm} \cdot \frac{4,1868j}{1cal} \cdot \frac{1kj}{1000j} \cdot 7cm - m_{H2O} \cdot Cp_{H2O} \cdot \Delta T}{3930,83g \cdot \frac{1kg}{1000g} \cdot (30,7 - 27,4)^\circ C}$$

$$Cp_{ByAcc} = \frac{26,6616135 kj - 1450 ml \cdot \frac{1m^3}{1000000 ml} \cdot 994,9 \frac{Kg}{m^3} \cdot 4,174 \frac{kJ}{Kg} \cdot ^\circ C \cdot (30,7 - 27,4)^\circ C}{12,971739 kg \cdot ^\circ C}$$

$$Cp_{ByAcc} = \frac{26,6616135kj - 19,87073kj}{12,971739kg \cdot ^\circ C}$$

$$Cp_{ByAcc} = 0,523513762 \frac{kJ}{kg} \cdot ^\circ C$$

Este cálculo se repitió para las otras dos corridas de calibración con los datos de la tabla 3.10, tabulando los resultados en la tabla E.3; y se procedió a sacar un valor promedio entre las tres capacidades caloríficas obtenidas a través de la ecuación 3.15:

$$\overline{Cp}_{ByAcc} = \left(\frac{0,523513762 + 0,538371651 + 0,548526065}{3} \right) \frac{kJ}{kg} \cdot ^\circ C$$

$$Cp_{ByAcc} = 0,536803826 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$\overline{Cp}_{ByAcc} = 0,536804 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

El valor de la capacidad calorífica promedio se encuentra tabulado en las tablas E.3 y E.4. Para la corrida 1 de la muestra de ALUaT1, el poder calorífico se determinó introduciendo los valores de la tabla 3.11 y la capacidad calorífica promedio (obtenida por medio de la ecuación 3.15) en la ecuación 3.16.

$$PC_m = \frac{1450 \text{ ml} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000000 \text{ ml}} \cdot 994,9 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 4,174 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot \Delta T + m_{ByAcc} \cdot \overline{Cp}_{ByAcc} \cdot \Delta T - C_{Ac} \cdot L_{Ac}}{(16,2678 - 13,9966) \text{ g} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}}$$

$$PC_m = \frac{6,02143327 \frac{\text{kJ}}{^\circ\text{C}} \cdot \Delta T + 3930,83 \text{ g} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \cdot 0,536804 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot \Delta T - C_{Ac} \cdot L_{Ac}}{0,002712 \text{ kg}}$$

$$PC_m = \frac{6,02143327 \frac{\text{kJ}}{^\circ\text{C}} \cdot \Delta T + 2,11008 \frac{\text{kJ}}{^\circ\text{C}} \cdot \Delta T - 2,3 \frac{\text{cal}}{\text{cm}} \cdot \frac{4,1868 \text{ J}}{1 \text{ cal}} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ J}} \cdot 6,5 \text{ cm}}{0,002712 \text{ kg}}$$

$$PC_m = \frac{6,02143327 \frac{\text{kJ}}{^\circ\text{C}} \cdot (44,6 - 32,1)^\circ\text{C} + 2,159659 \frac{\text{kJ}}{^\circ\text{C}} \cdot (44,6 - 32,1)^\circ\text{C} - 0,0625927 \text{ kJ}}{0,002712 \text{ kg}}$$

$$PC_m = \frac{75,267915 \text{ kJ} + 26,3760658 \text{ kJ} - 0,06259266 \text{ kJ}}{0,002712 \text{ kg}} = 44.725,8697 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$PC_m = 44725,87 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Para todas las de mas corridas se realizó un cálculo similar extrallendo los datos desde la tabla 3.11, y los valores obtenidos se registraron en la tabla E.4 del anexo E; luego se calculó el valor promedio del poder calorífico de las tres corridas de cada muestra analizada (ALUaT1, ALUiT2 y ALUIT3) como sigue:

$$\overline{PC}_{ALUaT1} = \left(\frac{44.725,87 + 43.427,58 + 44.475,45}{3} \right) \text{kJ/kg}$$

$$\overline{PC}_{ALUaT1} = 44.209,63 \text{ kJ/kg}$$

Todos los valores obtenidos para el poder calorífico, se encuentran reportados en las tablas 4.4 y E.4.

3.2.10. Determinación de la viscosidad absoluta con el viscosímetro Brookfield rotacional DV-E

Para la ejecución de este análisis fue necesaria la selección del rotor adecuado para el viscosímetro Brookfield DV-E (figura E.5), el cual fue el s61(figura E.6), ya que éste mide viscosidades en el rango de la muestra de ALU a analizar. Seguidamente se encendió el equipo y la muestra se ajustó la temperatura deseada o simplemente se le midió a la temperatura del lugar, para este caso 30°C (81,5°F). Se agregó aproximadamente 600 ml de la muestra de ALU en un beaker de 500 ml y para medir la viscosidad absoluta a una temperatura superior se colocó sobre una plancha térmica por aproximadamente 10 minutos con la finalidad que la muestra alcanzara la temperatura fijada. Una vez obtenida la temperatura deseada, se colocó el cilindro con la muestra en el rotor previamente acoplado al equipo. Luego se inició el funcionamiento del equipo el cual registró automáticamente los

valores de viscosidad absoluta en centipoise (cP) para diferentes revoluciones por minutos del rotor, tomando aquel valor de viscosidad con el mayor porcentaje de torsión. Se repitió el ensayo para la misma muestra a las temperaturas de 40, 50 y 100°C. En la tabla 3.12 se presentan los valores de la viscosidad absolutas obtenidas a las revoluciones por minuto con mayor porcentaje de torsión.

Tabla 3.12. Valores de viscosidad absoluta obtenidos utilizando el viscosímetro rotacional Brookfield a varias temperaturas.

| <i>Muestra</i> | <i>T (°C)</i> | <i>S</i> | <i>r.p.m</i> | <i>Torque (%)</i> | <i>Viscosidad (cP)</i> |
|----------------|---------------|----------|--------------|-------------------|------------------------|
| ALUaT1 | | | | 89 | 165 |
| ALUiT2 | 30 | 61 | 30 | 98 | 198,5 |
| ALUiT3 | | | | 88 | 178,5 |
| ALUaT1 | | | | 74 | 90 |
| ALUiT2 | 40 | 61 | 50 | 88,1 | 106,2 |
| ALUiT3 | | | | 70,6 | 83,8 |
| ALUaT1 | | | | 84 | 50,4 |
| ALUiT2 | 50 | 61 | 100 | 97 | 58,1 |
| ALUiT3 | | | | 88 | 55 |
| ALUaT1 | | | | 20 | 6 |
| ALUiT2 | 100 | 61 | 100 | 23 | 8 |
| ALUiT3 | | | | 21 | 7 |

Donde:

S: numero correspondiente al tipo de rotor utilizado.

T: Temperatura (°C).

r.p.m: revoluciones por minuto seleccionado.

Se sabe que la viscosidad cinemática es el cociente entre la viscosidad y la densidad de un fluido, ambas propiedades determinadas a una misma temperatura y presión, por tanto:

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{Ec. 3.17})$$

Donde:

v : viscosidad cinemática (cSt).

ρ : densidad (g/cm^3).

μ : viscosidad absoluta (cP).

Se calculó la viscosidad cinemática a 40°C de la muestra ALUaT1 substituyendo la densidad (contenida en la tabla E.6) y la viscosidad absoluta (tabla 3.12 y E.6), a esa temperatura, en la ecuación 3.17, de la siguiente forma:

$$v = \frac{90cp}{0,877766 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}$$

$$v = \frac{90cp * \frac{1p}{100cp}}{0,877766 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}$$

$$v = \frac{\frac{90p}{100}}{0,877766 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}$$

$$v = \frac{0,9 \frac{\text{g}}{\text{cm} * \text{s}}}{0,877766 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}}$$

$$v = 1,02553302 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \cdot \frac{10^2 \text{mm}^2}{1 \text{cm}^2} = 102,53302 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$$

$$v_{\text{ALUaT1-40}^\circ\text{C}} = 102,533 \text{cSt}$$

Se repitió el cálculo para la misma muestra pero a 100°C y se obtuvo que:

$$v_{ALUaT1-100^{\circ}C} = 10,757cSt$$

Los valores de viscosidad cinemática de las demás muestras a 40 y 100°C fueron determinados de la misma manera y los resultados se encuentran en las tablas 4.4 y E.6.

El índice de viscosidad para las muestras de ALU se determinó con la ecuación 3.18, utilizando su viscosidad cinemática obtenida a 40 y 100°C en el punto anterior y la metodología de cálculo expresada en la norma COVENIN 889:1995.

$$IV = \frac{L-U}{L-H} \times 100 \quad \text{(Ec. 3.18)}$$

Donde:

IV: índice de viscosidad.

L: es la viscosidad cinemática a 40°C de un aceite con índice de viscosidad cero (0), que tenga la misma viscosidad cinemática a 100°C que la de la muestra cuyo índice de viscosidad va a ser calculado en mm²/s (cSt).

H: es la viscosidad cinemática a 40°C de un aceite con índice de viscosidad cero (100), que tenga la misma viscosidad cinemática a 100°C que la de la muestra cuyo índice de viscosidad va a ser calculado en mm²/s (cSt).

U: es la viscosidad cinemática a 40°C de la muestra cuyo índice de viscosidad va a ser calculado en mm²/s (cSt).

Como la viscosidad cinemática a 100°C de todas las muestras es menor que 70 cSt, los valores de *L* y *H* se obtienen de la tabla E.5 del anexo E; los valores que no están listados en la tabla se obtuvieron por medio de

una interpolación lineal. De esa forma sabiendo que $v_{ALUaT1-100^{\circ}C} = 10,757cSt$, se interpolando entre 10,7 y 10,8 cSt en la tabla E.5 (Anexo E) para obtener los siguientes valores de L y H:

$$L = 167,339 \text{ cSt}$$

$$H = 92,113 \text{ cSt}$$

Los valores de L y H obtenidos para las otras dos muestras de ALU, se encuentran tabulados en la tabla E.6.

Se calculó el índice de viscosidad de la muestra ALUaT1 interpolando en la tabla E.5 su valor de viscosidad cinemática a 100°C para hallar los valores de L y H (registrados en la tabla E.6), que posteriormente se introdujeron junto con el valor de U (que es igual a la viscosidad cinemática a 40°C contenida en la tablas E.6), en la ecuación 3.18.

$$IV = \frac{167,339 - 102,533}{167,339 - 92,113} \times 100$$

$$IV = 86,148$$

$$IV = 86$$

El índice de viscosidad de las otras dos muestras de ALU se calcularon de la misma manera y los resultados se encuentran reflejados en las tablas 4.4 y E.6.

3.3. Determinación de la factibilidad técnica para la quema eficiente de los aceites en las cámaras de combustión

Se revisó el perfil de temperatura en las cámaras de combustión del secador de lecho fluidizado de la planta de secado de mineral de hierro, empleando para ello el *PHD (Process History Database)*, que recolecta y almacena los datos en tiempo real de los sistemas de control de la planta, y la aplicación cliente *Process Trend*, que permite realizar tareas (tales como gráficas) para la mejor visualización de los valores historiados por el *PHD* (Honeywell, 1999); con la intención de verificar si la temperatura a lo largo de la cámara de combustión era lo suficientemente elevada para garantizar la quema eficiente de los ALU's en ella.

Adicionalmente a esto, también se calculó el tiempo de residencia y la turbulencia de los gases dentro de la cámara de combustión a las condiciones de operación de la planta de secado de mineral de hierro.

3.3.1. Temperatura de la cámara de combustión del secador de lecho fluidizado de la planta de secado mineral de hierro de Orinoco Iron

La temperatura de la cámara de combustión se determinó extrayendo del registro histórico de las variables de proceso (*PHD*) los valores de las temperaturas registradas por los cuatro indicadores de temperatura que poseen las cámaras de combustión. En la figura 3.2 y 3.3 se ilustra en un esquemático de los secadores A y B el trayecto de los gases de combustión con las temperaturas aproximadas y la localización de los indicadores de temperatura dentro de la cámara de combustión.

Con el *PHD (Process History Database)* se extrajeron los valores de temperatura, hora a hora, del registro otorgado por los indicadores de temperatura del secador B desde la 1 am del 23 de mayo del 2008 hasta la 1 am del 3 de junio de ese mismo año (duración de la corrida 11 días), se colocaron en una hoja de cálculos de Excel y se representaron en la tabla F.1 del anexo F. Se repitió el mismo procedimiento para el *Secador A* y los valores obtenidos se colocaron en la tabla F.2.

Con ayuda de Excel se graficó, tanto para el secador A como para el secador B, el perfil de temperatura registrado por cada uno de los medidores de temperatura de la cámara de combustión correspondiente.

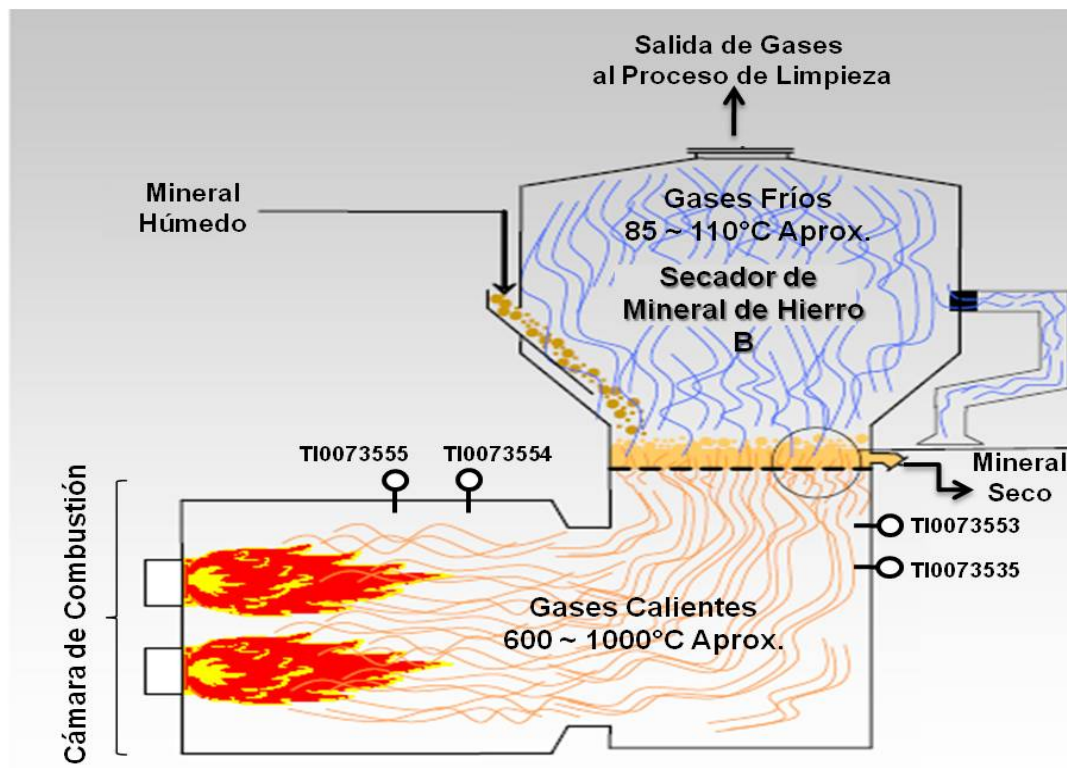


Figura 3.2. Esquemático de la cámara de combustión del secador B de la planta de secado de mineral de hierro, ilustrando la ubicación de los indicadores de temperatura bajo parrilla (Orinoco Iron, 2006).

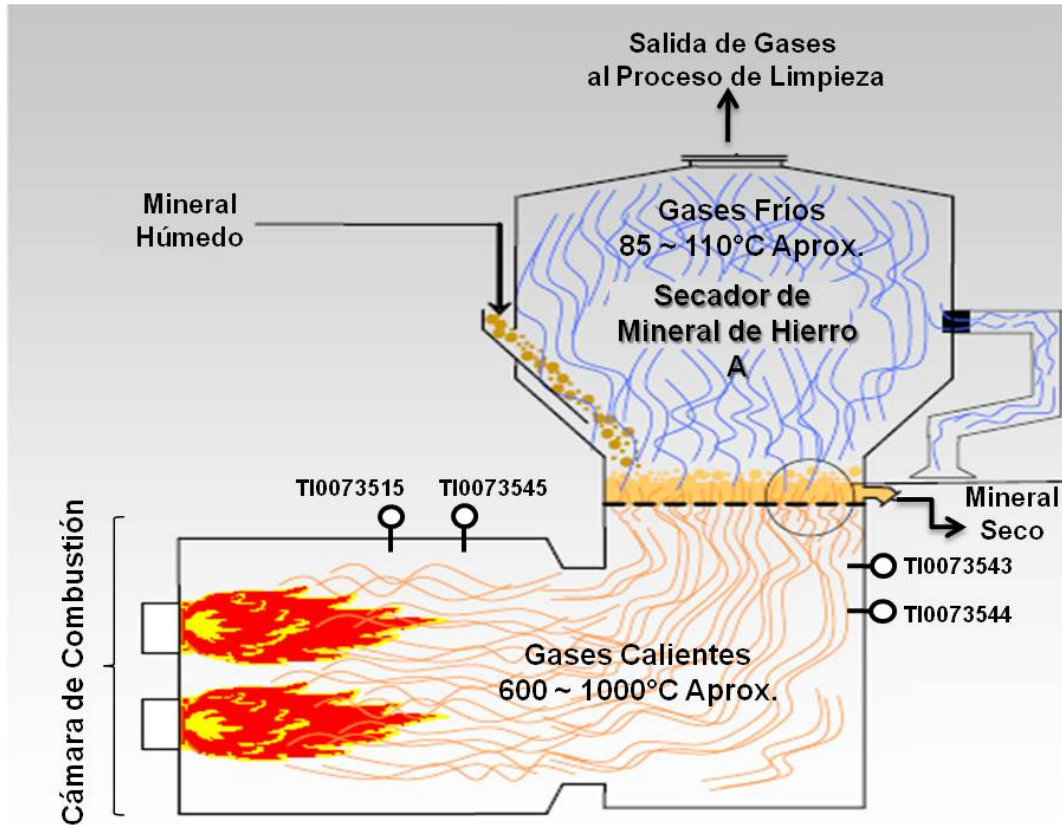


Figura 3.3. Esquemático de la cámara de combustión del secador A de la planta de secado de mineral de hierro, ilustrando la ubicación de los indicadores de temperatura bajo parrilla (Orinoco Iron, 2006).

3.3.2. Caracterización de las corrientes gaseosas de las cámaras de combustión de los de secadores de mineral de hierro

Existen tres corrientes principales involucradas al proceso de combustión del gas natural en las cámaras de combustión de los secadores de mineral de hierro y una cuarta que ocasionalmente se utiliza como combustible complementario con la finalidad de disminuir el consumo del gas natural. Dichas corrientes son: corriente de gas natural, corriente de aire de

combustión, corriente de aire de fluidización y corriente de Let Down Gas (LDG, gas de baja capacidad calorífica).

Con los datos de la tabla 3.13 y 3.14 se calcularon principalmente los moles (flujo molar) de cada una de esas corrientes a condiciones normales (a 1 atm de presión y a 25°C de temperatura), con la ayuda de la ecuación de Van Der Waals. Los datos de los flujos molares sirvieron de base para calcular el flujo volumétrico de dichas corrientes a las condiciones reales de presión (1.206 atm) y temperatura (800, 870, y 950°C) a la que se encuentran las cámaras de combustión de la planta de secado de mineral de hierro.

De acuerdo a la filosofía del proceso, la corriente de gas natural se mezcla con la corriente aire de combustión a una relación aproximada de 1:10. Con los moles de las corrientes de gas natural, *Let Down Gas* (opcional) y aire de combustión se realizaron las reacciones de combustión completa correspondiente a cada componente del gas natural, obteniendo así una nueva corriente principalmente formada de dióxido de carbono (CO₂), vapor de agua (H₂O), nitrógeno (N₂) Argón (Ar); a esta nueva corriente se le adiciono la de aire de fluidización y se forma la *corriente de gases de combustión*, como se representa en la figura 3.4.

Tabla 3.13. Corrientes normalizadas que intervienen en las cámaras de combustión de los secadores de mineral de hierro cuando operan con Gas Natural y con *Let Down Gas* (Orinoco Iron, 2006).

| | | | | G.N | G.N+LDG | |
|----------|--|----------------------|--------------|---------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | | Corrientes | T(°C) | P(atm) | Q (Nm³/h) | Q (Nm³/h) |
| 1 | | Gas Natural | | | 2.700 | 1.900 |
| | | Aire de Combustión | 800 | 1,206 | 32.000 | 32.000 |
| | | Aire de fluidización | | | 95.000 | 95.000 |
| | | Let Down Gas | | | - | 1.800 |
| 2 | | Gas Natural | | | 3.000 | 2.200 |
| | | Aire de Combustión | 870 | 1,206 | 32.000 | 32.000 |
| | | Aire de fluidización | | | 95.000 | 95.000 |
| | | Let Down Gas | | | - | 1.800 |
| 3 | | Gas Natural | | | 3.300 | 2.500 |
| | | Aire de Combustión | 950 | 1,206 | 32.000 | 32.000 |
| | | Aire de fluidización | | | 95.000 | 95.000 |
| | | Let Down Gas | | | - | 1.800 |

Donde:

Q: caudal de la corriente de gas a 25°C y 1 atm de presión.

G.N: Gas natural.

LDG: Let Down Gas, Corrientes de gases rica en hidrogeno y pobre en metano, proveniente del área de reactores de la planta.

A la corriente de *gases de combustión* se le determinó a 1.206 atmosferas de presión y a las temperaturas de 800, 870 y 950°C el volumen molar, la densidad y el flujo volumétrico con la ecuación de Van Der Waals y la viscosidad con la ecuación de Dean y Stiel.

Tabla 3.14. Composición molar del gas natural, del aire de combustión y de fluidización y del *Let Down Gas* empleados en las cámaras de combustión de la planta de secado de mineral de hierro (Orinoco Iron 2006).

| | Componentes | <i>Y_i</i> |
|--------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| Gas Natural | CH ₄ | 0,87048 |
| | C ₂ H ₆ | 0,06521 |
| | C ₃ H ₈ | 0,00496 |
| | iC ₄ H ₁₀ | 0,00056 |
| | nC ₄ H ₁₀ | 0,00091 |
| | iC ₅ H ₁₂ | 0,00038 |
| | nC ₅ H ₁₂ | 0,00037 |
| | C ₆ H ₁₄ | 0,00047 |
| | CO ₂ | 0,05331 |
| | N ₂ | 0,00335 |
| LDG | H ₂ | 0,617579 |
| | CO | 0,106064 |
| | CO ₂ | 0,081343 |
| | N ₂ | 0,091679 |
| | CH ₄ | 0,103336 |
| Aire | O ₂ | 0,2097 |
| | N ₂ | 0,781 |
| | Ar | 0,0093 |

Donde:

Y_i: fracción molar de cada componente.

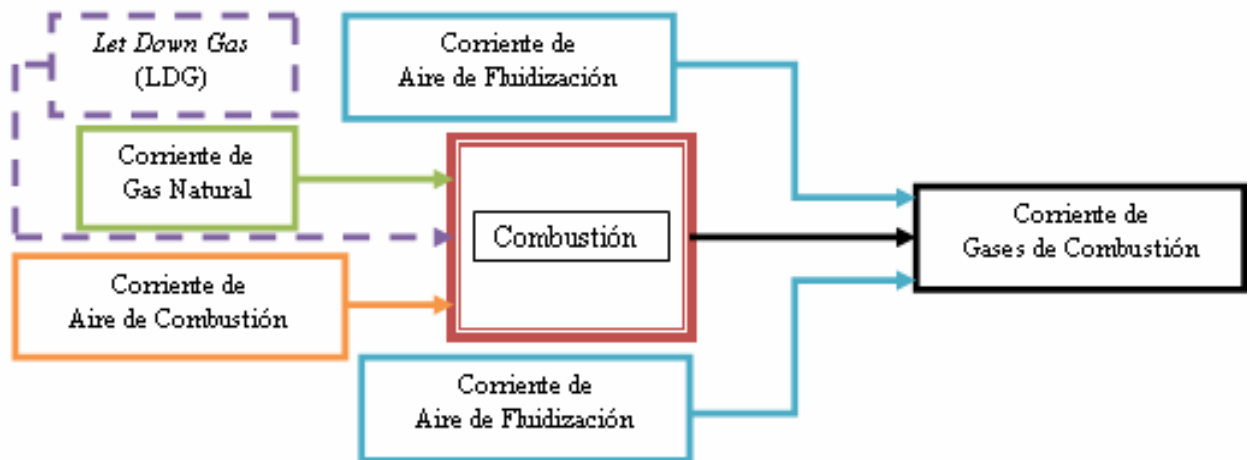


Figura 3.4. Esquemático de las corrientes vinculadas al proceso de combustión del gas natural en la Planta de Secado de Mineral de Hierro de Orinoco Iron.

3.3.2.1. Cálculo del volumen molar de las corrientes gaseosas a condiciones normales

Como en Orinoco Iron toda la información técnica referente a los caudales que manejan los equipos están registradas a condiciones normales ($P=1$ atm y $T=298,15$ K), se procedió a calcular el volumen molar a las condiciones normales, con la ecuación de Van Der Waals (ecuación 3.19), y luego se calculó el flujo molar de las corrientes necesarias para luego convertir ese flujo molar al flujo volumétrico a las condiciones de presión y temperatura requeridas con la ayuda de la ecuación de Van Der Waals.

$$P = \frac{R \cdot T}{\bar{V} - b} - \frac{a}{\bar{V}^2} \quad (\text{Ec. 3.19})$$

$$\bar{V} = \frac{V}{n} \quad (\text{Ec. 3.20})$$

$$a = \frac{27 \cdot R^2 \cdot T_c^2}{64 \cdot P_c} \quad (\text{Ec. 3.21})$$

$$b = \frac{R \cdot T_c}{8 \cdot P_c} \quad (\text{Ec. 3.22})$$

Donde:

P: Presión (atm)

R: Constante de los gases (82,052 cm³atm/gmol K)

T: Temperatura (K)

\bar{V} : Volumen molar (cm³/gmol)

V: Volumen (cm³)

n: moles (gmol)

a: Constante que depende de las propiedades críticas (cm⁶atm/gmol²)

b: Constante volumétrica que depende de las propiedades críticas (cm³/gmol)

T_c: Temperatura crítica (K).

P_c: Presión crítica (atm).

De la ecuación 3.19 se despejó el volumen molar y se obtuvo la ecuación 3.23 y con ella se realizó un proceso iterativo que se inició con el cálculo de un valor inicial del volumen molar a través de la ecuación 3.25 proveniente de la ecuación de los gases ideales (ecuación 3.24). Fue necesario, calcular el porcentaje de desviación entre cada uno de los valores obtenidos, pues si este es mayor al uno por ciento, se debe realizar un proceso iterativo hasta obtener una desviación menor al 1 %, esto a través de la ecuación 3.26.

$$\bar{V}_{i+1} = \frac{R \cdot T}{P + \frac{a}{\bar{V}_i^2}} + b \quad (\text{Ec. 3.23})$$

$$P \cdot \bar{V} = R \cdot T \quad (\text{Ec. 3.24})$$

$$\bar{V}_o = \frac{R \cdot T}{P} \quad (\text{Ec. 3.25})$$

$$\% \text{ Error} = \left| \frac{\bar{V}_{i+1} - \bar{V}_i}{\bar{V}_{i+1}} \right| \cdot 100 \quad (\text{Ec. 3.26})$$

Donde:

\bar{V}_o : Volumen molar inicial a introducir en la ecuación de Van Der Waals (cm³/gmol).

Se calculó el volumen molar de cada uno de los componentes de las corrientes de gases involucradas al proceso de combustión de la planta de secado de mineral de hierro de Orinoco Iron hasta que el porcentaje de desviación de cada uno de los componentes fuese menor al 1%, y luego aplicando la *Regla de Kay* (que consiste en tratar la mezcla de gases reales como una sustancia pseudopura, ecuación 3.27) se calculó el volumen molar neto de cada una de las corrientes involucradas a condiciones normales de presión y temperatura.

$$\bar{V} = \sum (\bar{V}_i \cdot Y_i) \quad (\text{Ec. 3.27})$$

Donde:

Y_i : fracción molar de cada componente

\bar{V}_i : volumen molar de cada componente

Para el cálculo del valor de a y b de cada componente, se introdujeron los datos correspondientes al metano en la tabla G.1 en las ecuaciones 3.21 y 3.22 respectivamente, Obteniéndose:

$$a = \frac{27 \cdot \left(82,082 \text{ cm}^3 \text{ atm} / \text{gmol} \cdot \text{K} \right)^2 \cdot (190,7 \text{ K})^2}{64 \cdot 45,8 \text{ atm}}$$

$$a = 2.255.322,37 \text{ cm}^6 \text{ atm} / \text{gmol}^2$$

$$b = \frac{\left(82,082 \text{ cm}^3 \text{ atm} / \text{gmol} \cdot \text{K} \right) \cdot 190,7 \text{ K}}{8 \cdot 45,8 \text{ atm}}$$

$$b = 42,7061 \text{ cm}^3 / \text{gmol}$$

Los demás valores de a y b fueron calculados para los demás componentes de la *corriente de gas natural* en la tabla G.1 y los resultados se colocaron en esa misma tabla. Con los datos de las tablas G.2 y G.3 se calculó a y b para el resto de los componentes de las demás corrientes involucradas (las de aire y la de *Let Down Gas* respectivamente), repitiendo el procedimiento previo y colocando los resultados en la misma tabla de la cual se extrajo los datos.

Se calculó el volumen inicial (\bar{V}_o) introduciendo los datos de presión y temperatura Normales (1 atmosfera y 25°C respectivamente) en la ecuación 3.25:

$$\bar{V}_o = \frac{82,082 \text{ cm}^3 \text{ atm} / \text{gmol} \cdot \text{K} \cdot (25 + 273,15) \text{ K}}{1 \text{ atm}}$$

$$\bar{V}_o = 24.464,10 \text{ cm}^3 / \text{gmol}$$

El valor previo se colocó en la tabla G.4, G.5 y G.6 y se usó como punto de partida para el cálculo del volumen molar a condiciones normales de las corrientes gaseosas involucradas al proceso de combustión en la planta de secado de mineral de hierro de Orinoco Iron.

Se inició el proceso iterativo introduciendo el valor de \bar{V}_o de la tabla G.4 junto con los valores de a y b del metano (tabla G.1) en la ecuación 3.23:

$$i = 0$$

$$\bar{V}_{0+1} = \frac{R \cdot T}{P + \frac{a}{\bar{V}_o^2}} + b$$

$$\bar{V}_1 = \frac{82,082 \text{ cm}^3 \text{ atm} / \text{gmol} \cdot \text{K} \cdot (25 + 273,15) \text{ K}}{1 \text{ atm} + \frac{2.255.322,37 \text{ cm}^6 / \text{gmol}^2}{\left(24.464,10 \text{ cm}^3 / \text{gmol}\right)_i^2}} + 42,7061 \text{ cm}^3 / \text{gmol}$$

$$\bar{V}_1 = 24.414,67 \text{ cm}^3 / \text{gmol}$$

El valor de \bar{V}_1 , calculado previamente, se introdujo en la tabla G.4 y con el valor de \bar{V}_o (de esa misma tabla) se calculó el porcentaje de error a través de la ecuación 3.26:

$$i = 0$$

$$\% Error = \left| \frac{\bar{V}_1 - \bar{V}_o}{\bar{V}_1} \right| \cdot 100$$

$$\% Error = \left| \frac{(24.414,67 - 24.464,10) \text{ cm}^3/\text{gmol}}{24.414,67 \text{ cm}^3/\text{gmol}} \right| \cdot 100$$

$$\% Error = 0,2025$$

El proceso iterativo se detuvo cuando el porcentaje de error (*%Error*) de todos los componentes de la corriente gaseosa estuviese por debajo del uno porcentual, entonces cuando eso ocurrió se utilizó la *Regla de Kay* para calcular el volumen molar de cada una de esas corrientes gaseosas. Se calculó el volumen molar neto de las corrientes de aire (*aire de fluidización* y *aire de combustión*) introduciendo los valores de la última iteración y de la fracción molar correspondiente a los componentes de la corriente (tabla G.5) en la ecuación 3.27:

$$\bar{V} = \sum (23.823,23 \cdot 0,2097 + 24.447,29 \cdot 0,781 + 24.441,08 \cdot 0,0093)$$

$$\bar{V} = 24.316,37 \text{ cm}^3/\text{gmol}$$

En las tablas G.4, G.5 y G.6, se encuentran los resultados y se ilustra el proceso iterativo realizado para calcular el volumen molar a condiciones normales de presión y temperatura de cada una de las corrientes gaseosas involucradas al proceso de combustión de la planta de secado de mineral de hierro de Orinoco Iron. También se colocaron los valores de los volúmenes molares obtenidos en la tabla G.7.

3.3.2.2.- Cálculo de los flujos molares

El flujo molar a las condiciones normales se calcula ya que este flujo debe ser el mismo a las verdaderas temperaturas y presión de operación de las cámaras de combustión, y con este se puede obtener el caudal o flujo volumétrico a esas temperaturas (800, 870 y 950°C). El flujo molar para cada corriente se calculó a través de la ecuación 3.28, y para obtener el flujo por componente se utilizó la ecuación 3.29.

$$F_y = \frac{Q}{V} \quad (\text{Ec. 3.28})$$

$$F_{y_i} = Y_i \cdot F_y \quad (\text{Ec. 3.29})$$

Donde:

F_y : Flujo molar de la corriente gaseosa (gmol/h).

F_{y_i} : Flujo molar de un componente de la corriente (gmol/h).

Q : Caudal de la corriente gaseosa (Nm³/h).

Se calculó el flujo molar de la corriente de gas natural a condiciones normales de presión y temperatura, introduciendo el caudal de gas natural cuando se usa *LDG* (como combustible complementario) de la sección 2 de la tabla 3.13, y el volumen molar de esta misma corriente (extraído de la tabla G.7 o G.4) en la ecuación 3.28:

$$F_y = \frac{2200 \text{ Nm}^3/h \cdot \frac{1.000.000 \text{ cm}^3}{1 \text{ Nm}^3}}{24.401,62 \text{ cm}^3/\text{gmol}}$$

$$F_y = 90.157,960 \text{ gmol/h}$$

Este valor se reportó en la tabla G.7, y analógicamente se realizó el cálculo para el resto de las corrientes, cuando se usa *LDG* como combustible complementario, de la sección 2 de la tabla 3.17, y cuyos resultados también fueron colocados en la tabla G.7.

Se calculó el flujo molar del metano perteneciente a la corriente de gas natural introduciendo el valor del flujo total de dicha corriente (tabla G.7) y la fracción molar del metano (tabla G.7) en la ecuación 3.29:

$$F_{y_{CH_4}} = 0,87048 \cdot 90157,960 \text{ gmol/h}$$

$$F_{y_{CH_4}} = 78.439,949 \text{ gmol/h}$$

De igual manera se calculó el flujo molar del resto de los componentes de las demás corrientes, cuando se usa *LDG* (como combustible complementario) de la sección 2 de la tabla 3.17, y los valores se colocaron en la tabla G.7 y G.11.

Se repitió todo el procedimiento de este punto para calcular los demás flujos molares de las corrientes y de sus componentes, usando los caudales o flujos volumétricos de la tabla 3.16, y los resultados se colocaron en la tabla G.11.

3.3.2.3. Balance másico de los flujos molares de las corrientes bajo parrilla del secador de mineral de hierro con reacción química

Una vez obtenidos los flujos molares de cada uno de los componentes de las corrientes gaseosas involucradas al proceso de combustión (figura

3.5), se realizaron los balances de materia correspondientes para calcular el flujo y composición molar de la corriente “F” (Corriente de gases de combustión), y a dicha corriente gaseosa se le calculó el tiempo de residencia y turbulencia dentro de las cámaras de combustión de los secadores de mineral de hierro de Orinoco Iron.

Se asumió combustión completa a cada uno de los compuestos combustibles pertenecientes a las corrientes (A, B, y C de la figura 3.5) que entran al quemador, y se les aplicó la estequiometría de combustión, para finalmente aplicar las ecuaciones a 3.30 y 3.31, respectivamente, a cada uno de los componentes de las corrientes A, B y C para así obtener el flujo y composición molar de la corriente E (figura 3.5).

$$n_{Entran} - n_{Consumidos} = n_{Salen} - n_{Generados} \quad (\text{Ec. 3.30})$$

$$Y_i = \frac{n_i}{n_T} \quad (\text{Ec. 3.31})$$

$$n_T = \sum n_i \quad (\text{Ec. 3.32})$$

Donde:

n_{Entran} : moles que entran (gmol).

$n_{Consumidos}$: moles consumidos (gmol).

n_{Salen} : moles que salen (gmol).

$n_{Generados}$: moles generados (gmol).

n_i : moles del componente que compone a la corriente.

n_T : cantidad total de moles de la corriente.

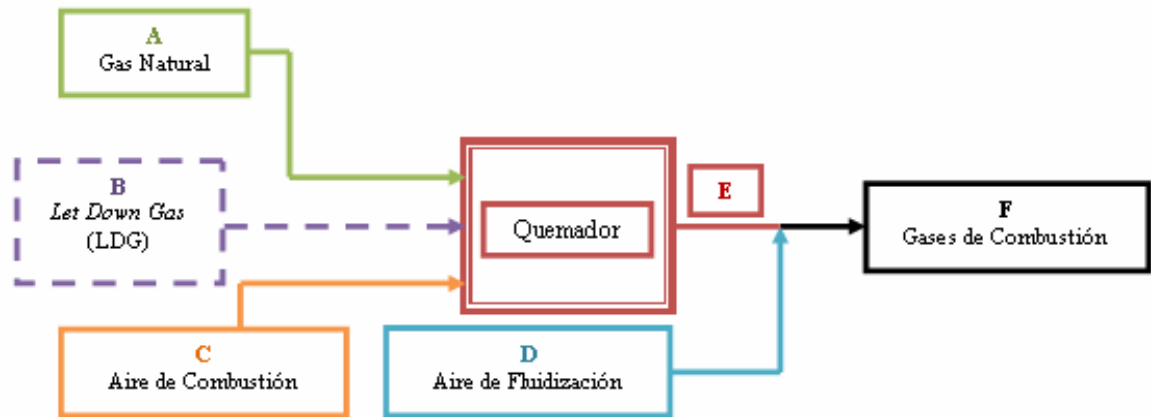


Figura 3.5. Corrientes de gases vinculadas al proceso de combustión del gas natural en la planta de secado de mineral de hierro de Orinoco Iron.

También se aplicó la ecuación 3.30 a cada uno de los componentes de las corrientes E y D, y se obtuvo la composición y flujo de la corriente F (ver figura 3.5).

Se realizó el balance de materia, y las relaciones estequiometrias cuando se emplea en las cámaras de combustión de los secadores de mineral de hierro LDG y gas natural como combustible. Aplicando la ecuación 3.30 a los moles metano (del gas natural y del LDG de la tabla G.7):

Base de cálculo: 1 h de proceso

$$(67.743,59 \text{ gmol} + 7.618,66 \text{ gmol})_{\text{Entran}} - n_{\text{Consumidos}} = n_{\text{Salen}} - n_{\text{Generados}}$$

Como se considera combustión completa de todos los componentes combustibles dentro de la cámara de combustión, los moles de metano que

salen se hacen igual a cero; y los moles generados también se hacen cero puesto que no se genera metano en proceso de combustión, quedando que:

$$(75.362,26\text{gmol})_{\text{Entran}} = n_{\text{Consumidos}}$$

Este valor se colocó en la tabla G.9 y se le aplicó la estequiometría de la reacción de combustión completa (ver ecuación (a) en la figura G.1) para así obtener la cantidad de oxígeno gastado, y la cantidad de agua y dióxido de carbono generado.

En la tabla G.8 se ilustran los moles de reactantes consumidos y los moles de productos generados para la combustión del metano (cuando se usa *LDG* y gas natural como combustible), todos ellos calculados por la estequiometría de la reacción y los datos fueron extraídos de la tabla G.7 y G.9.

Se repitió el procedimiento del balance molar (con la ecuación 3.30) y del balance estequiométrico (con las reacciones de la figura G.1) de los demás compuestos que sufren combustión completa y los resultados se colocaron en la tabla G.9.

Se calculó la cantidad de aire total consumido estequiométricamente por combustión sumando los moles de nitrógeno, oxígeno y de argón total de la tabla G.9, y en la misma tabla se colocó el valor obtenido.

Nuevamente se utilizó la ecuación 3.30 para calcular los moles de cada uno de los componentes (Oxígeno, nitrógeno, dióxido de carbono, argón y

monóxido de carbono) de la corriente E (figura 3.5) contenidos en cada una de las corrientes involucradas después del proceso de combustión.

Se calcularon los moles de oxígeno de la corriente E introduciendo los moles de oxígeno consumido (tabla G.9) y los que entran (tabla G.7) en la ecuación 3.30, en la que los moles generados de oxígeno se hacen igual a cero:

Para el oxígeno:

$$(281.674,66\text{gmol})_{\text{Entran}} - (194.815,0849)_{\text{Consumidos}} = n_{\text{Salen}} \big]_{\text{O}_2}$$

$$n_{\text{Salen}} \big]_{\text{O}_2} = 86.859,57\text{gmol}$$

$$Fy_{\text{O}_2} = 86.859,57 \text{ gmol/h}$$

Para el dióxido de carbono:

$$(4.814,760\text{gmol} + 6010,84\text{gmol})_{\text{Entran}} = n_{\text{Salen}} \big]_{\text{CO}_2} - (87.718,92\text{gmol})_{\text{Generados}}$$

$$n_{\text{Salen}} \big]_{\text{CO}_2} = 97.887,96\text{gmol}$$

$$Fy_{\text{CO}_2} = 97.887,96 \text{ gmol/h}$$

Se repitió el procedimiento anterior con los demás componentes de la corriente E, usando los valores de los flujos molares de la tabla G.7 y los moles consumidos o generados (según sea el componente) de la tabla G.9. Los moles de cada uno de los componentes de la corriente E, obtenidos por este procedimiento, se colocaron en la tabla G.10.

Con la ecuación 3.32 se calculó el flujo molar total de la corriente E, con los valores de los flujos molares de la tabla G.10, y el resultado obtenido se colocó en la misma tabla:

$$n_T = \sum (1.029.291,26 + 97.887,96 + 12.176,22 + 86859,57 + 214192,33 + 7.810,37) \text{gmol}$$

$$n_T = 1.448.217,72 \text{gmol}$$

$$F_{y_T} = 1.448.217,72 \text{ gmol/h}$$

En la ecuación 3.31 se introdujeron los datos de la tabla G.10 y se calcularon las fracciones molares de cada uno de los componentes de la corriente E, dichas fracciones arrojadas por la ecuación se colocaron en la misma tabla. Se calculó la fracción molar del nitrógeno:

Para el nitrógeno:

$$Y_{N_2} = \frac{1029291,26 \text{ gmol}}{1.448.217,72 \text{ gmol}}$$

$$Y_{N_2} = 0,71073$$

Se calculó el flujo y composición molar de cada uno de los componentes de la corriente F, "*corriente de gases de combustión*" (figura 3.5), realizando balance molar entre los componentes de la corriente E y de la corriente D (*Aire de Fluidización*).

Se calcularon los moles de oxígeno de la corriente F introduciendo los moles de oxígeno que se mezclan de las corrientes D y E (tabla G.11 y tabla

G.10 respectivamente) en la ecuación 3.30, en la que los moles generados y consumidos se hacen igual a cero, puesto que no existe reacción química:

Para el oxígeno:

$$(836.221,64 \text{ gmol} + 86.859,57 \text{ gmol})_{\text{Entran}} = n_{\text{Salen}} \downarrow_{O_2}$$

$$n_{\text{Salen}} \downarrow_{O_2} = 923.081,22 \text{ gmol}$$

$$F_{y_{O_2}} = 923.081,22 \text{ gmol/h}$$

Se repitió el procedimiento a los demás componentes de la corriente F afectados por la mezcla de las corrientes E y D (nitrógeno y argón), usando los valores de los flujos molares de la tabla G.11 y G.10 respectivamente, y los moles resultantes de la mezcla de las dos corrientes se colocaron en la tabla G.12.

Se calculó el flujo molar total de la corriente F y las fracciones molares de sus componentes, con la ecuación 3.32 y 3.31 respectivamente, y los resultados se colocaron en la tabla G.12.

Siguiendo, análogamente, todo el procedimiento anterior, se calcularon las corrientes F de las otras dos secciones de la tabla 3.13 cuando el secador opera únicamente con gas natural y cuando opera con LDG y gas natural en conjunto. Todos los resultados se colocaron en la tabla G.12.

3.3.2.4. Cálculo de la densidad de la corriente de gases de combustion

Una vez obtenidos los flujos molares y composición de la corriente de gases de combustión (corriente F) bajo parrilla del secador de mineral de

hierro de Orinoco Iron a la presión y temperaturas (800, 870 y 950°C) de la tabla 3.13, se calculó (para cada una de ellas) el volumen molar y el flujo volumétrico de cada una de las corrientes F de la tabla G.12 a través de las ecuaciones 3.23 y 3.33 respectivamente. También se calculó la densidad de la mezcla de gases y de sus componentes a través de la ecuación 3.34.

$$Q = Fy \cdot \bar{V} \quad (\text{Ec. 3.33})$$

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{PM}{\bar{V}} \quad (\text{Ec. 3.34})$$

$$v = \frac{\bar{V}}{PM} \quad (\text{Ec. 3.35})$$

Donde:

Q: Flujo volumétrico (m³/h).

Fy: Flujo molar (gmol/h).

ρ_{-} : Densidad (kg/m³).

v : Volumen específico (cm³/gmol).

PM: Peso molecular de la corriente de gases de combustión (g/gmol).

Se calculó el volumen molar de la corriente F a 1,2064 atm y a 800, 870 y 950 °C repitiendo el proceso iterativo realizado con la ecuación de Van Der Waals (ecuación 3.23), pero utilizando los datos contenidos en las tablas G.12 y G.13 del anexo G, los valores obtenidos a través del proceso iterativo se colocaron en la tabla G.14.

Se calculó el flujo volumétrico (Q) de la *corriente de gases de combustión* a 870°C y $1,2064$ atm cuando se usa gas natural y *LDG* introduciendo el flujo molar total de la tabla G.12 y el volumen molar total de la tabla G.14 en la ecuación 3.33:

$$Q = \left(5.368.303,39 \frac{\text{gmol}}{\text{h}} \cdot 78.001,29 \frac{\text{cm}^3}{\text{gmol}} \right) \cdot \frac{1\text{m}^3}{1.000.000\text{cm}^3}$$

$$Q = 418.734,57 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Se repitió el procedimiento de cálculo para el resto de los valores totales de las tablas G.12 y G.14, y los resultados del flujo volumétrico obtenido con la ecuación 3.33 se colocaron en la tabla G.15.

Se calculó la densidad la *corriente de gases de combustión* a 870°C y $1,2064$ atm , y de sus componentes, cuando se usa gas natural y *LDG* como combustible complementario en la planta de secado de mineral de hierro, introduciendo los volúmenes molares y pesos moleculares de la tabla G.14 en la ecuación 3.34:

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{28,6802 \frac{\text{g}}{\text{gmol}}}{78.001,29 \frac{\text{cm}^3}{\text{gmol}}} \cdot \frac{\frac{1\text{kg}}{1.000 \text{g}}}{\frac{1\text{m}^3}{1.000.000\text{cm}^3}}$$

$$\rho = 0,36769 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

De igual manera se calculó la densidad para el resto de las corrientes y de sus componentes, colocando los resultados en la tabla G.15.

3.3.2.5. Cálculo de la viscosidad de los gases bajo parrilla a las condiciones de operación del secador de mineral de hierro de O.I

Para una presión de 1.2064 atm se realizó la predicción de la viscosidad de la mezcla de gases que conforma a la *corriente de gases de combustión* bajo parrilla de los secadores de mineral de hierro de Orinoco Iron a 800, 870 y 950°C, utilizando la ecuación de Dean and Stiel (ecuación 3.36).

$$\bar{\mu} - \bar{\mu}_o = 5.0 \times 10^{-8} \frac{PM^{1/2} P_c^{2/3}}{T_c^{1/6}} \left[\exp(1.439 \rho_r) - \exp(-1.11 \rho_r^{1.858}) \right] \quad (\text{Ec. 3.36})$$

$$\rho_r = \frac{\rho}{\rho_c} \quad (\text{Ec. 3.37})$$

$$\rho_c = \frac{1}{V_c} \quad (\text{Ec. 3.38})$$

Donde:

$\bar{\mu}$: viscosidad de la mezcla de gases a la presión y temperatura de trabajo (cp).

$\bar{\mu}_o$: viscosidad de la mezcla de gases a 1 atmosfera de presión y temperatura de trabajo (cp).

PM : peso molecular de la mezcla de gases (g/gmol).

T_c : temperatura crítica (K).

P_c : presión crítica (atm).

ρ_r : densidad reducida.

ρ : densidad (kg/m³).

ρ_c : densidad crítica (gmol/cm³).

\bar{V}_c : volumen crítico (cm³/gmol)

El valor de $\bar{\mu}_o$ de la mezcla de gases fue obtenido a partir de la ecuación 3.39, donde los μ^o de cada uno de los componentes de la *corriente de gases de combustión* se extrajeron a 800, 870 y 950°C del nomograma de viscosidades para gases a 1 atm (figura G.2).

$$\bar{\mu}_o = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\mu_i^o \cdot Y_i \cdot PM^{1/2} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(Y_i \cdot PM^{1/2} \right)} \quad \text{(Ec. 3.39)}$$

Donde:

μ_i^o : viscosidad de a 1 atmosfera y a la temperatura de operación de un componente de la mezcla de gases de combustión (cp).

Y_i : fracción molar de un componente de la mezcla de gases.

Se extrajeron las viscosidades absolutas a 800, 870 y 950°C de cada uno de los componentes ubicando las coordenadas de X y Y de la tabla G.16 en la figura G.2, colocando los valores obtenidos en la tabla G.18.

Se calculó la viscosidad absoluta de la mezcla de gases de combustión a 870°C cuando se usa *LDG* y gas natural como combustible en las cámaras de combustión de los secadores de mineral de hierro de Orinoco Iron, introduciendo la viscosidad absoluta extraída del nomograma (de la tabla

G.17), el peso molecular (tabla G.14) y la fracción molar (tabla G.14) de cada uno de los componentes en la ecuación 3.39:

$$\bar{\mu}_o = \frac{\left(0,046 \cdot 0,75708 \cdot 28,020^{1/2} + 0,051 \cdot 0,02071 \cdot 44,010^{1/2} + \dots + 0,046 \cdot 0,00145 \cdot 28,01^{1/2}\right) cp \cdot \left(\frac{g}{gmol}\right)^{1/2}}{\left(0,75708 \cdot 28,020^{1/2} + 0,02071 \cdot 44,010^{1/2} + \dots + 0,00145 \cdot 28,01^{1/2}\right) \left(\frac{g}{gmol}\right)^{1/2}}$$

$$\bar{\mu}_o = \frac{0,2538124}{5,3446381} cp$$

$$\bar{\mu}_o = 0,047489 cp$$

Se repitió el procedimiento para calcular las viscosidades absolutas de las restantes mezclas de gases de combustión a 1 atm y a 800, 870 y 950°C, y los resultados (al igual que el procedimiento de cálculo) se colocaron en la tabla G.18.

Se calculó la densidad molar de la mezcla de gases de combustión a 870°C cuando se usa LDG y gas natural como combustible en las cámaras de combustión de los secadores de mineral de hierro de Orinoco Iron, introduciendo el volumen molar (tabla G.14) de esa mezcla de gases en la ecuación 3.38:

$$\rho = \frac{1}{78001,29 \text{ cm}^3 / \text{gmol}}$$

$$\rho = 1,2820\text{E-}05 \text{ gmol} / \text{cm}^3$$

Se repitió el procedimiento para calcular las restantes densidades molares, introduciendo los volúmenes de la mezcla de gases de la de la tabla G.14 en la ecuación 3.38, y los resultados de colocaron en la tabla G.20.

Se calculó la densidad reducida de la mezcla de gases de combustión a 870°C cuando se usa *LDG* y gas natural como combustible en las cámaras de combustión de los secadores de mineral de hierro de Orinoco Iron, introduciendo la densidad molar (tabla G.20) y la densidad crítica (tabla G.19) de esa mezcla de gases en la ecuación 3.37:

$$\rho_r = \frac{1,2820E - 05 \text{ gmol/cm}^3}{0,00675176 \text{ gmol/cm}^3}$$

$$\rho_r = 0,0018988$$

Se repitió el procedimiento para calcular las restantes densidades reducidas, introduciendo las densidades críticas (tabla G.19) y las densidades molares (tabla G.20) de la mezcla de gases combustión en la ecuación 3.37, y los resultados de colocaron en la tabla G.20.

Se calculó la viscosidad absoluta de la mezcla de gases de combustión a 870°C y 1.206 atm cuando se usa *LDG* y gas natural como combustible en las cámaras de combustión de los secadores de mineral de hierro de Orinoco Iron, introduciendo la densidad reducida (tabla G.20), peso molecular promedio (tabla G.14), temperatura crítica (tabla G.19), la viscosidad a 1 atm (tabla G.18) y la presión crítica (tabla G.19) de esa mezcla de gases (tabla G.14) en la ecuación 3.36:

$$\bar{\mu} - 0,047489 \text{ cp} = 5.0 \times 10^{-8} \frac{28,6802^{1/2} 51,52^{2/3}}{210,76^{1/6}} \left[\exp(1.439 \cdot 0,00189881) - \exp(-1.11 \cdot 0,00189881^{1.858}) \right]$$

$$\bar{\mu} = 0,047504 \text{ cp}$$

Se repitió el procedimiento para calcular las restantes viscosidades absolutas a 800, 870 y 950°C a 1.2064 atm de presión, introduciendo las densidades reducidas (tabla G.20), pesos moleculares promedio (tabla G.14), temperaturas críticas (tabla G.19) y la presiones críticas (tabla G.19) de esas mezcla de gases de combustión en la ecuación 3.36, y los resultados de colocaron en la tabla G.21.

3.3.3. Cálculo de la velocidad de los gases bajo parrilla a las condiciones de operación del secador de mineral de hierro de O.I

Para una presión de 1.2064 atm se calculó la velocidad de la *corriente de gases de combustión* bajo parrilla de los secadores de mineral de hierro a 800, 870 y 950°C, la cual luego se utilizo para calcular el tiempo de residencia y la turbulencia de los gases dentro de la cámara de combustión, utilizando la ecuación 3.40.

$$v = \frac{Q}{Af} \quad \text{(Ec. 3.40)}$$

$$Af = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \quad \text{(Ec. 3.41)}$$

Donde:

v: velocidad de la corriente de gases (m/s).

Q: flujo volumétrico (m³/h).

Af: área de flujo (m²).

D : diámetro de la cámara de combustión.

En las figura G.3 se observa la cámara de combustión del secador de mineral de hierro de Orinoco Iron, notándose que se divide en dos secciones. Las dimensiones de la sección 1 y de la sección 2 se encuentran bien detalladas en las figuras G.4 y G.5 respectivamente, y los valores del diámetro y longitud de cada sección se colocaron en la tabla G.22.

Para efectos de cálculo se considero que la cámara de combustión como si fuese de una sola sección cilíndrica uniforme, cuyas dimensiones se encuentran en la tabla G.23.

Se calculó el área de flujo de la cámara de combustión, introduciendo el diámetro de la tabla G.23 en la ecuación 3.41:

$$A_f = \pi \cdot \frac{(3,292\text{m})^2}{4}$$

$$A_f = 8,5116\text{m}^2$$

El resultado fue reportado en la tabla G.23.

Se calculó la velocidad de la mezcla de gases de combustión a 870°C y 1.206 atm cuando se usa *LDG* y gas natural como combustible en las cámaras de combustión de los secadores de mineral de hierro de Orinoco Iron, introduciendo el área de flujo estimada para cámara de combustión (tabla G.23) y el flujo volumétrico de dicha corriente (tabla G.21) en la ecuación 3.40:

$$v = \frac{418.734,57 \text{ m}^3/\text{h}}{8,5116 \text{ m}^2} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}$$

$$v = 13,6655 \text{ m/s}$$

Se repitió cálculo para las restantes velocidades a 800, 870 y 950°C con 1.2064 atm de presión, , introduciendo el área de flujo estimada para cámara de combustión (tabla G.23) y el flujo volumétrico de dicha corriente en la ecuación 3.40, y los resultados de colocaron en la tabla G.24.

3.3.4. Cálculo del tiempo de residencia de los gases dentro de la cámara de combustión de la planta de secado de mineral

El tiempo de residencia de los gases es el tiempo que tardan en salir de la cámara de combustión bajo la parrilla del secador de lecho fluidizado de la planta de secado de mineral de hierro, dicho tiempo deberá ser el mismo que aproximadamente tarden los ALU's y sus gases dentro de la cámara.

Para una presión de 1.2064 atm se calculó, con la ecuación 3.42, el tiempo de residencia de la *corriente de gases de combustión* bajo parrilla de los secadores de mineral de hierro de Orinoco Iron a 800, 870 y 950°C.

$$t_r = \frac{L}{v} \quad \text{(Ec. 3.42)}$$

Donde:

t_r : tiempo de residencia de los gases en la cámara (ms).

L : longitud de la cámara de combustión (m).

Se calculó el tiempo de residencia de la mezcla de gases de combustión a 870°C y 1.206 atm cuando se usa *LDG* y gas natural como combustible en las cámaras de combustión de los secadores de mineral de hierro de Orinoco Iron, introduciendo la longitud estimada para cámara de combustión (tabla G.23) y la velocidad de dicha mezcla de gases en la ecuación 3.42:

$$t_r = \frac{10,000 \text{ m}}{13,6655 \text{ m/s}}$$

$$t_r = 0,7318 \text{ s} \cdot \frac{1.000 \text{ ms}}{1 \text{ s}}$$

$$t_r = 731,8 \text{ ms}$$

Los tiempos de residencia restantes se encuentran reportados en la tabla G.24 y 4.8.

3.3.5. Cálculo la turbulencia de los gases dentro de la cámara de combustión de la planta de secado de mineral

El número de Reynolds es aquel número adimensional que indica la turbulencia de un fluido cuando fluye; cuanto más alto, mayor es la turbulencia del fluido. A la corriente de gases de combustión se le calculó el número de Reynolds a 1.2064 atm y a 800, 870 y 950°C utilizando la ecuación 2.2, para ver que tan turbulento era el régimen de flujo de los gases calientes dentro de las cámaras de combustión; el diámetro de la cámara de combustión se obtuvo de los planos de la misma (tabla G.23 y figuras G.3, G.4 y G.5), mientras que la viscosidad, densidad y velocidad de la *corriente de gases de combustión* están tabuladas en las tablas G.21 y G.24.

Se calculó el número de Reynolds de la mezcla de gases de combustión a 870°C y 1.206 atm cuando se usa *LDG* y gas natural como combustible en las cámaras de combustión de los secadores de mineral de hierro de Orinoco Iron, introduciendo el diámetro estimado para cámara de combustión (tabla G.23), la velocidad (tablas G.24 o 4.8), densidad (tabla G.21) y viscosidad (tabla G.21) de dicha mezcla de gases en la ecuación 2.11:

$$Re = \frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu}$$

$$Re = \frac{3,292 \text{ m} \cdot \frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} \cdot 13,6655 \text{ m/s} \cdot \frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} \cdot 0,00036769 \text{ g/cm}^3}{0,047504 \text{ g/s} \cdot \text{cm}}$$

$$Re = 348209,1$$

Los números de Reynolds restantes se calcularon de igual manera y se reportaron en la tabla G.24 y 4.8.

3.4. Selección de los equipos y la ubicación del nuevo sistema de alimentación de combustible líquido en la planta de secado mineral de hierro de ORINOCO IRON S.C.S

Se realizó un estudio técnico que comprendió el análisis, la determinación del tamaño y la localización óptima del sistema para la quema de ALU's en las cámaras de combustión de los secadores de mineral de hierro en Orinoco Iron, tomando en consideración la legislación ambiental que rige su reutilización como combustible (decreto 2.635), la experiencia

aportada por otras empresas y las condiciones mismas del proceso de secado de mineral de hierro.

Para cumplir con el objetivo se realizó una visita técnica a la planta de cal de SIDOR, planta que desde el año 2000 hasta la fecha practica exitosamente la quema de ALU's en sus hornos rotatorios, dándole así una adecuada disposición final a este pasivo ambiental. La planta de cal de SIDOR emuló el sistema de inyección de aceites implementado en los hornos de clinker de la empresa CEMEX. En base a la información aportada por SIDOR, se realizó el análisis y la selección de los equipos necesarios para implementar la quema ecoeficiente de los ALU's la planta de secado de mineral de hierro de Orinoco Iron S.C.S.

Una vez seleccionados y dimensionados los equipos necesarios, se conceptualizó el sistema de inyección de ALU's a implementar, se realizaron los diagramas de flujo y se describió la filosofía de operación y el funcionamiento del mismo.

También se determinó la ubicación física más idónea y favorable, dentro del perímetro de la planta secado de mineral de hierro de Orinoco Iron, para realizar la instalación de los equipos y líneas de tuberías constituyentes del sistema de inyección de ALU's.

3.4.1. Selección de los equipos para el sistema de inyección de ALU's

La selección de los equipos necesarios se hizo teniendo en cuenta la información, detalles operacionales y de proceso aportados por SIDOR, que el funcionamiento del sistema será manual y su instalación se daría en dos etapas.

La primera etapa, *etapa de prueba*, comprende un ensamblado de un sistema de inyección sencillo y con pocos materiales y equipos; esto con la intención de permitir el análisis de la afectación que la quema de ALU's en las cámaras de combustión de la planta de secado podría causar al proceso, equipos e instalaciones involucradas, además permitirá realizar mejoras al sistema definitivo de inyección de ALU's, que se propone en este trabajo de grado. En la tabla 4.10 se muestran la lista de equipos, materiales y accesorios requeridos para la instalación del sistema de inyección de ALU's de prueba, y en las figuras 4.5 y 4.7. se ilustra, respectivamente, el diagrama del sistema de inyección y la ubicación propuesta en planta.

La segunda etapa, *etapa final*, comprende el ensamblado del sistema de inyección de ALU's definitivo, el cual estará sujeto a las posibles modificaciones que podría arrojar los conocimientos y oportunidades de mejora adquiridos en la primera etapa.

Puede que la totalidad o parte de los equipos y materiales (válvulas, tuberías, etc.) utilizados para ensamblar el sistema de inyección de prueba, formaran parte del sistema de inyección de aceites a instalar de forma definitiva en la planta de secado de mineral de hierro de Orinoco Iron. En la tabla 4.11 se muestran la lista de equipos, materiales y accesorios requeridos para la instalación del sistema de inyección de ALU's definitivo, y en las figuras 4.6 y 4.8. se ilustra, respectivamente, el diagrama del sistema de inyección y la ubicación propuesta en planta.

3.5. Realización de un estimado de costos al sistema propuesto para el reuso de aceites lubricantes

Se determinó el valor de los recursos necesarios para la implantación del sistema de inyección definitivo de los ALU's como combustible complementario, ordenando y sistematizando toda la información de índole monetaria obtenida.

Se contactaron a proveedores localizados en Puerto Ordaz para obtener el valor de los equipos esenciales (bomba, tanque de almacenamiento, etc.) que constituyen al sistema de inyección, mientras que el costo de los materiales y accesorios (válvulas, tuberías e instrumentación) se obtuvo a partir de los inventarios llevados por el almacén de Orinoco Iron, para así obtener el valor referencial de los ítems necesitados y darle mayor exactitud al costo global del sistema. Los valores de costo unitario obtenidos se colocaron en la tabla 3.15.

Se realizó un *estimado costo clase V* (la exactitud probable de esta estimación es de $\pm 50\%$), en base a las especificaciones propuestas y a los costos unitarios obtenidos directamente con el proveedor. En la tabla 4.12 se colocó el costo total para la implantación del sistema de inyección de aceite en Orinoco Iron.

Con la ecuación 3.43 se calculó el costo de cada ítem en la tabla 3.15. Para calcular el costo total para las bombas de engranaje, se sustituyó el costo unitario obtenido y la cantidad requerida para ese ítem en la ecuación 3.43:

$$\text{Costo}_{ITEM} = \text{Costo}_{UNITARIO} \cdot \text{Cantidad}_{ITEM} \quad (\text{Ec. 3.43})$$

$$\text{Costo}_{ITEM} = 12.320 \text{ Bs/Item} \cdot 2 \text{ Item}$$

$$\text{Costo}_{ITEM} = 24.640 \text{ Bs}$$

Tabla 3.15. Costo unitario obtenido para los materiales, equipos y accesorios requeridos para la instalación del sistema de inyección de ALU's definitivo.

| Equipo, Material o accesorio | Referencia | Cantidad | Costo Unitario (Bs) |
|--|-------------------|-----------------|----------------------------|
| Tanque de almacenamiento | TINACA | 1 Und | 23.000 |
| Filtro de aceite | TINECA | 1 Und | 4.000 |
| Filtro de aceite | TINECA | 1 Und | 6.000 |
| Bomba de engranaje | HIDROBOMBAS C.A. | 2 Und | 12.320 |
| Tobera para la pulverización del ALU | RICA | 4 Und | 1.000 Bsf |
| Pulmón de Aire | -- | 1 Und | -- |
| Indicadores de Presión | Orinoco Iron | 2 Und | 700 |
| Indicador de Presión | Orinoco Iron | 3 Und | 1.000 |
| Flujometro | Orinoco Iron | 1 Und | 1.000 |
| Válvulas de Bola de 1" | Orinoco Iron | 8 Und | 400 |
| Válvula Check De 1" | Orinoco Iron | 4 Und | 400 |
| Válvula de tres vías con flujo ajustable | Orinoco Iron | 1 Und | 2.500 |
| Válvula de Solenoide De 1" | Orinoco Iron | 2 Und | 1.500 |
| Tuberías, acero al carbón 1" Sh40 | Orinoco Iron | 80 m | 76,78 Bsf/m |
| Lanza de inyección Acero inoxidable de 1" Sh80 | Orinoco Iron | 2 m | 197,81 Bsf/m |

El procedimiento anterior se repitió para los demás ítems los resultados se reportaron en la tabla 4.12.

También se determinó el costo para la construcción de la losa sobre el terreno seleccionado, con la colaboración del personal de la gerencia técnica de Orinoco Iron, se estimó en 800 Bs el metro cuadrado. El costo total de la losa incluye el costo de los materiales de construcción y se calculó a través de la ecuación 3.44.

$$Costo_{LOSA} = 800 \frac{Bs}{m^2} \cdot Area_{LOSA} \quad \text{(Ec. 3.44)}$$

Como se requieren 49 m² para la implantación del sistema de inyección en la planta de secado de mineral, el costo para la losa es el siguiente:

$$Costo_{LOSA} = 800 \frac{Bs}{m^2} \cdot 49 m^2$$

$$Costo_{LOSA} = 39.200 Bs$$

El valor obtenido se colocó en la tabla 4.12

Para obtener el costo total estimado para realizar la implantación del sistema de inyección, se sumó el costo obtenido para cada ítem con el costo obtenido para la losa. Para lo anterior se empleó la ecuación 3.45 y el resultado se colocó en la tabla 4.12.

$$Costo_{TOTAL} = \sum (Costo_{ITEM}) + Costo_{LOSA} \quad \text{(Ec. 3.45)}$$

Vale la pena recalcar que en este estudio económico solo se realizó únicamente tomando en cuenta los la instalación del sistema de inyección de ALU's definitivo, ya que el *sistema de prueba* se construirá y pondrá en marcha con materiales, equipos y accesorios que ya se encuentran

disponibles en Orinoco Iron, y las boquillas de pulverización de aceite (único ítem no disponible en la empresa) serán suministradas por *RICA* (rociadores industriales C.A), quien se ofreció a colaborar con la selección de la boquilla que mejor se ajuste al sistema, RICA también colaboro en la selección de la tobera de pulverización que actualmente emplean en el sistema de inyección de ALU's de SIDOR.

3.6. Análisis del impacto que generaría el reuso de los aceites como combustible complementario en los secadores, desde el punto de vista técnico, económico y ambiental

Con los resultados y conocimientos adquiridos en las etapas anteriores se procedió a analizar los efectos negativos y positivos desde el punto de vista técnico, económico y ambiental, que podrían generarse como consecuencia o beneficio de la adaptación de un sistema de inyección de ALU's en las cámaras de combustión de la planta de secado de mineral de Orinoco Iron S.C.S., dichos efectos servirán de complemento para la toma de decisiones sobre la implantación del sistema de inyección.

3.6.1. Aspectos ambientales

En esta parte se discutió sobre los diversos aspectos que garantizan la ecoeficiencia de la quema de ALU's en las cámaras de combustión del secador de mineral de hierro de Orinoco Iron, sobre la eliminación del pasivo ambiental reflejada en la reducción del inventario de ALU's en Orinoco Iron, sobre la contaminación por concepto de emisión de gases de combustión generados por los aceites y sobre la formación de dioxinas y furanos.

3.6.2. Aspectos técnicos

Entre los aspectos técnicos a discutir estará la afectación estructura interna del secador de mineral de hierro (parrilla distribuidora de gases de combustión y el refractario de la cámara de combustión), la afectación a la calidad del producto (mineral de hierro seco) y la dualidad de los quemadores.

3.6.3. Aspectos económicos

En esta parte se discutió sobre los ahorros monetarios que generara Orinoco Iron S.C.S por concepto de la reducción en el consumo de gas natural y por concepto del no pago por la disposición final del ALU a una empresa tercera, ya que el mismo lo estaría consumiendo como combustible dentro de su proceso productivo. Y partiendo de estos ahorros y del estudio económico, se realizó una evaluación económica en la que se demostró si la inversión a realizar para el sistema de inyección de ALU's propuesto en este trabajo de grado será económicamente rentable o no.

3.6.3.1. Determinación de la relación consumo gas-aceite

Cuando se sustituye un combustible por otro, el contenido energético debe mantenerse, de donde tenemos que:

$$Q_{genALU} = Q_{genGN} \quad (\text{Ec. 3.46})$$

Donde:

Q_{genALU} : calor generado por la quema de ALU.

Q_{genGN} : calor generado por la quema de Gas Natural.

Se sabe que el calor generado por un combustible se calcula con su poder calorífico y la cantidad empleada en la combustión, como indica la ecuación 3.47.

$$Q_{genComb.} = PC_{Comb.} \cdot V_{Comb.} \quad (\text{Ec. 3.47})$$

Donde:

Q_{genALU} : calor generado por la quema de un combustible.

$PC_{Comb.}$: poder calorífico del combustible.

$V_{Comb.}$: cantidad empleada de combustible.

Sustituyendo la ecuación 3.47 en la ecuación 3.46 se obtiene:

$$PC_{ALU} \cdot V_{ALU} = PC_{GN} \cdot V_{GN} \quad (\text{Ec. 3.48})$$

Donde:

PC_{ALU} : poder calorífico del ALU. (Kcal/L_{ALU})

V_{ALU} : consumo de ALU en la combustión. (L)

PC_{GN} : poder calorífico del ALU. (Kcal/Nm³_{GN})

V_{GN} : cantidad ahorrada de gas natural por efecto de la combustión del ALU. (Nm³)

Despejando V_{GN} de la ecuación 3.48 se llega a:

$$V_{GN} = \frac{PC_{ALU}}{PC_{GN}} \cdot V_{ALU} \quad (\text{Ec. 3.49})$$

$$a = \frac{PC_{ALU}}{PC_{GN}} \quad (\text{Ec. 3.50})$$

$$V_{GN} = a \cdot V_{ALU} \quad (\text{Ec. 3.51})$$

Donde:

a : relación entre el poder calorífico de ALU y el del gas natural (Nm^3_{GN}/L_{ALU})

El valor de a se calculó para ALUiT1 de la siguiente manera, tomando de la tabla 4.3 los valores del poder calorífico y densidad correspondiente y se sustituyeron en la ecuación 3.50. El valor del poder calorífico se obtuvo de la tabla I.3.

$$a = \frac{10559,29 \text{Kcal/Kg} \cdot 0,88422 \text{Kg/L}}{85000 \text{Kcal/Nm}^3}$$

$$a = 9336,735 \text{Nm}^3_{GN}/L_{ALU}$$

Se calculó de la misma manera valores de a para ALUiT3 y ALUiT2 empleando los valores de la tabla 4.3 e I.3 y los resultados obtenidos se tabularon en la tabla I.3 junto con el valor obtenido para ALUaT1.

Se obtiene un valor único para a promediando los tres valores obtenidos a través de la ecuación 3.50 y el resultado se tabuló en la tabla I.3 y se sustituyó en la ecuación 3.51 obteniéndose:

$$V_{GN} = 1,104 \cdot V_{ALU} \quad \text{(Ec. 3.52)}$$

La ecuación 3.52 es la que representa la relación entre el consumo de ALU y el ahorro en el consumo de gas natural, es decir, por cada litro de aceite lubricante que se quema dentro de la cámara de combustión se ahorra 1,104 Nm^3 de gas natural.

3.7. Equipos, materiales y sustancias

3.7.1- Equipos

- Cronómetro digital del celular Sansung Omnia 900-i.
- Balanza digital.
- Bomba calorimétrica de oxígeno (marca Parr) con bomba, balde, camisa, cubierta, motor de agitación y circuito de ignición.
- Termómetro digital ASSY 6775.
- Unidad de corriente de 10 amp.
- Aparato copa abierta o Cleveland. (figura E.7)
- Centrífuga marca Clay Adams, velocidad máxima 1.500 rpm.
- Viscosímetro marca Brookfield, modelo Rotovisco DV-E. Este equipo está compuesto por un cabezal que le imparte movimiento al rotor.
- Plancha de calentamiento de temperatura ajustable y termómetro digital Ikatron ETS-DS.
- Baño térmico marca Polytherm, tipo Py4, temperatura máxima alcanzada 212°F (100°C).

3.7.2. Materiales

- Capsula de porcelana con tapa.
- Trípode.
- Rejilla.
- Mechero.
- Pinzas de metal.
- Recipiente de Anime.
- Tubos cilíndricos de metal.
- Tubos cilíndricos de vidrios.

- Termómetro escala -50 a 50°C.
- Termómetro con escala de -5°F a 125°F.
- Termómetro con escala de 0 a 100°C.
- Termómetro de 300°C de capacidad.
- 6 Tubos de centrifuga de 10 mL.
- 6 Tapones de corcho o goma.
- Gotero.
- Beakers de 10, 50 y 500 ml.
- Picnómetros de 25 y 50 ml.
- Beaker de 50 ml.
- Desecador.
- Hidrómetros de vidrio, graduados en unidades de gravedad API
- Cilindro graduado de 500 y 1000 ml.
- Pipeta de 10 y 20 ml.

3.7.3. Sustancias

- Hielo Seco.
- Ether etílico.
- Oxígeno puro presurizado.
- Pastillas de ácido benzoico.
- Agua destilada.
- Alambre de ignición (marca Parr).
- Aceite lubricante usado industrial (ALUi).
- Aceite lubricante usado de motor (ALUa).
- Xileno, grado reactivo.
- Solución desemulsificante NALCO EC2355A6.

CAPÍTULO 4

DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Revisión de la información sobre regulaciones, manejo, tipo y cantidades de aceites lubricantes usados generados por las empresas ORINOCO IRON y VENPRECAR

4.1.1. Tipo y cantidad de ALU's

En las instalaciones de Orinoco Iron y Venprecar se generan tanto ALUi como ALUa, siendo los ALUi aquellos en mayor proporción. Ambos tipos de aceites se mantienen y almacenan de forma separada en el patio de hidrocarburos usados de Orinoco Iron, pero desafortunadamente no están contabilizados de acuerdo al tipo, pero como se refleja en la tabla 4.1 se estima que del total de ALU's almacenados, el 10 % está representado por ALUa.

Tabla 4.1. Proporción estimada de ALU's de acuerdo al tipo.

| Tipo de ALU | Procedencia | Proporción |
|-------------|--|------------|
| ALUi | Equipos industriales | 90% |
| ALUa | Equipos automotores | 10% |
| ALUd | Condensadores y transformadores eléctricos | ** |

**Los ALUd no son gestionados por el personal de Orinoco Iron.

Tanto los ALUi como los ALUa son considerados materiales peligrosos recuperables de acuerdo al decreto 2.635 que dicta las normas para el

control de la recuperación de materiales y el manejo de los desechos peligrosos, siempre y cuando se mantengan inalterados y no se mezclen con cualquier otra sustancia química que le confiera a estos aceites cualidades de un desecho peligroso; los aceites lubricantes (ALUi) y aceites de motor (ALUa) podrán ser recuperados para su reuso como combustible cuando contengan menos del 10% en volumen de pentaclorofenol, plaguicidas organoclorados o cualquiera de los solventes no halogenados indicados en la tabla D.2; menos de 1000 ppm de los solventes halogenados que figuran en el mismo punto; menos de 50 ppm de bifenilos o terfenilos policlorados ni cualquier otra de las sustancias del Anexo C indicadas con una X que no pueda ser removida mediante los procesos de recuperación previstos a utilizar (Decreto 2635, 1998).

Orinoco Iron y Venprecar son plantas productoras de briquetas de hierro en caliente, las cuales cuentan con equipos mecánicos, hidráulicos, electrónicos, y de equipos automotores; que precisan de aceites para garantizar su eficiente funcionamiento.

Entre los equipos mecánicos de Orinoco Iron existen 217 que emplean aceites en sus sistemas, que requieren el uso constante de este fluido para mantener lubricado y sin fricción a las distintas partes móviles de los mismos; durante el proceso, el aceite lubricante de los equipos se contamina por agua, óxidos, metales y otros agentes ambientales, por lo que se acude al cambio del mismo por otro lubricante nuevo, generándose así el *ALU*.

En la tabla 4.2 se observa el volumen total de ALU generado durante cada año, desde el 2006 hasta el 2009, por Orinoco Iron y Venprecar; de igual manera también se observa el promedio de generación mensual de ALU en cada año. Nótese que la generación de ALU's en Orinoco Iron fue

similar desde el 2006 al 2008 pero disminuyó sustancialmente en el año 2009, ya que durante ese año la empresa operó con un solo tren a la vez; por otro lado, se observa que Venprecar mantuvo su generación anual con pequeñas fluctuaciones a lo largo de los años revisados.

Debido a la crisis económica mundial que prevaleció en el 2008 la demanda de briquetas de hierro disminuyó y en consecuencia su valor en el mercado, por lo que Orinoco Iron se vio forzada a disminuir para el 2009 su capacidad de producción y operó durante todo el año y hasta la fecha con uno solo de sus cuatro trenes; sabiendo esto, y observando la disminución en la cantidad de ALU generado en el 2009 (tabla 4.2), se puede decir que fue debida a la reducción de la capacidad de producción de Orinoco Iron, pero la generación de los ALU's en planta no depende directamente de la cantidad de trenes en operación, ya que los equipos que generan la mayor cantidad de ALU's se encuentran en las áreas comunes de la planta, y que siempre se mantienen operativas independientemente de la cantidad de trenes que estén en funcionamiento.

Tabla 4.2. Cantidad y generación mensual de ALU's generados por Orinoco Iron y Venprecar desde el 2006 hasta el 2009.

| Año | Volumen (l) | | | Generación (l/mes) |
|------|--------------|-----------|---------|--------------------|
| | Orinoco Iron | Venprecar | Total | |
| 2006 | 115.116 | 19.800 | 13.3916 | 11.243 |
| 2007 | 115.300 | 16.900 | 13.2200 | 11.016,7 |
| 2008 | 119.000 | 18.900 | 13.7900 | 11.491,7 |
| 2009 | 102.700 | 21.048 | 12.3748 | 10.312,3 |

Fuente: Balances anuales de los desechos y residuos peligrosos generados por Orinoco Iron y Venprecar del 2006 al 2009.

Por otro lado, vale la pena resaltar que la mayor parte de los ALU's generados anualmente por ambas empresas, está representada principalmente por los ALU's que genera Orinoco Iron, que posee cuatro trenes de producción y es más grande y compleja que Venprecar, que solo posee un solo tren de producción.

La capacidad de producción de Orinoco iron esta reflejada en la cantidad de trenes que esta empresa mantenga operando. Es por ello que en función de la tabla 4.2 se generó la figura 4.1 para reflejar un estimado de la máxima y mínima cantidad de ALU's que Orinoco Iron y Venprecar pueden generar.

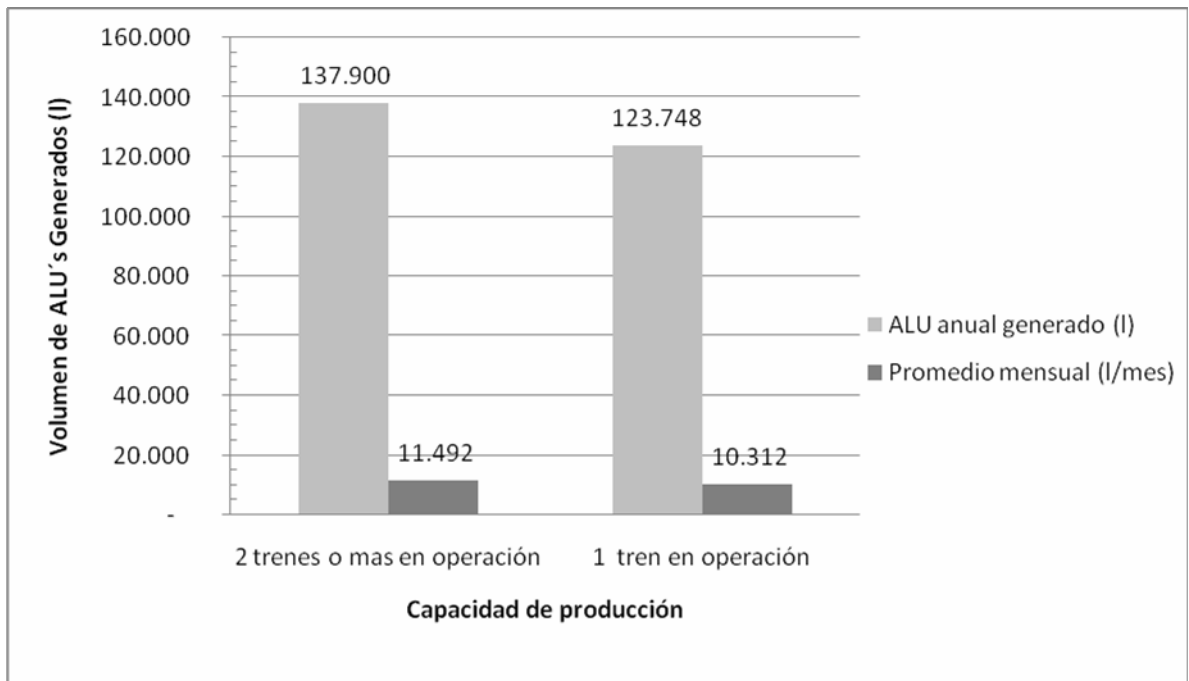


Figura 4.1. Cantidad anual máxima y mínima de ALU's generada por Orinoco Iron y Venprecar en función de la capacidad de producción.

4.1.2. Regulaciones, manejo y almacenamiento

Los ALU's generados en planta son retirados de los equipos y puntos de generación en recipientes, tambores o *unicubos* (recipientes cúbicos de 1000 litros) y luego son llevados a las trampas de aceites y se mantienen allí hasta que la trampa se llene, cuando esto sucede, los ALU's son retirados de la trampa de aceite, trasladados hasta el patio de hidrocarburos y trasegados en los tanques de almacenamiento temporal, tambores o unicubos; y allí se mantienen hasta que se le dé la adecuada disposición final, la cual hasta agosto del 2009 fue realizada por *Ecochemical C.A.*, quien llevaba los ALU's a sus instalaciones para recuperar la base del lubricante y vendía los ALU's a CEMEX (actualmente conocida como VENCEMOS), para que los utilizara como combustible complementario en sus hornos rotatorios de clinker.

El personal de Orinoco Iron realiza rutinas de inspección y medición de las trampas de aceite, para así llevar un control y registro del nivel en las mismas, para posteriormente determinar las necesidades de aplicar el trasegado, traslado y vaciado del ALU's extraído, desde las trampas de aceite hasta los tanques de almacenamiento temporal (figura D.1).

Actualmente, de acuerdo a la unidad de servicios industriales de la gerencia de servicios generales, en las instalaciones de Orinoco Iron y *OrDI* (Operaciones de reducción directa, antigua planta briquetadora, ubicada en Orinoco Iron) se cuentan con 10 trampas de aceites, distribuidas en diferentes áreas de operaciones (Venprecar no tiene trampas de aceite); dicha unidad de servicios industriales no cuenta con una rutina preestablecida, para la inspección, limpieza o achique de dichas trampas de aceite, y esas actividades son realizadas cuando son necesarias y por tal motivo no existe una frecuencia como tal para el mantenimiento y limpieza de

las trampas, generando así fallas en el sistema de gestión de a los ALU. Ver la figura D.2 y tabla D.1 en el anexo D, el primer anexo ilustra de forma esquemática la estructura y funcionamiento de las trampas de aceites utilizadas en Orinoco Iron y OrDI (Operaciones de reducción directa) mientras que el segundo muestra la ubicación de las trampas de aceites.

Una de las fallas en el sistema de gestión que Orinoco Iron le da a los ALU's es que al no contar con una rutina preestablecida, para la inspección, limpieza o achique de sus trampas de aceite, los aceites trasegados en los tanques de almacenamiento temporal terminan llegando con elevadas cantidades de agua, lodos y sedimentos; lo que genera un problema al momento de querer darles una correcta y adecuada disposición final, ya que la presencia de lodos y sólidos dificulta el bombeo (hasta el punto de imposibilitarlo) del ALU fuera del tanque de almacenamiento temporal.

Otra falla en la gestión del ALU se da cuando se realiza el mantenimiento, limpieza y trasegado de las trampas de aceite, ya que no se tiene control y cuidado al momento de extraer todo el contenido (ALU, agua, lodos y sedimentos) de la trampa de aceite, que posteriormente es trasegado a los tanques de almacenamiento temporal y en consecuencia terminan acumulándose. El problema radica en que la cantidad de sólidos en los tanques obstruyen la valvula de desagüe e impide el correcto drenaje del agua, lodo y sedimento acumulado.

En la tabla 4.3 se evidencia la gran cantidad de agua y sedimentos que poseen los ALU's almacenados en Orinoco Iron, lo que lleva a pensar que la gestión que Orinoco Iron y Venprecar le dan a los ALU's que generan no es la mas a decuada. Mientras mayor sea la cantidad de agua y sedimentos en el ALU, mayor será la ineficiencia de su gestión.

Los ALU's generados por Orinoco Iron y Venprecar son almacenados en cuatro (4) tanques de almacenamiento temporal (figura D.1), ubicados en el *patio de hidrocarburos usados* de la primera empresa, sumando entre ellos un total de 38.000 litros de capacidad de almacenamiento. En dicho patio existen tres tanques de 6.000 litros de capacidad y un tanque de 20.000 litros de capacidad. Uno de los tanques de 6.000 litros es utilizado para almacenar únicamente ALUa, mientras que los tanques restantes son utilizados para almacenar ALUi (figura D.1).

Cuando los tanques de almacenamiento temporal se encuentran llenos, los ALU's son almacenados en tambores metálicos o unicubos, en las adyacencias del patio de hidrocarburos usados de Orinoco iron. Lo mismo sucede cuando la trampa de aceite esta llena. En la figura D.3 se puede observar los tambores y unicubos con ALU situados de manera insegura en los alrededores del patio de hidrocarburos usados.

En la tabla 4.3 se observa que los aceites contenidos en los tres tanques de almacenamiento que se estudiaron, presentan elevadas cantidades de agua y sedimentos. Este es un hecho bastante desfavorable, ya que mientras mayor sea el contenido de agua y sedimentos en los aceites menor será el poder calorífico de el mismo, y no solo eso, en líneas generales también causan problemas de corrosión en los equipos implicados y problemas en el proceso de inyección de ALU's.

Tabla 4.3. Valores del porcentaje de agua y sedimentos, y el porcentaje sedimentos de las muestras tomadas de los tanques de almacenamiento temporal de ALU's en Orinoco Iron.

| <i>ALU</i> | <i>Corrida</i> | <i>%AyS (%)</i> | <i>%S (%)</i> | <i>Observaciones</i> |
|------------|----------------|-----------------|---------------|---------------------------------|
| ALUaT1 | Sin | 21 | 7 | Presencia de Emulsión abundante |
| ALUiT2 | demulsificante | 30 | 6,5 | Presencia de Emulsión |
| ALUiT3 | | 44 | 7,5 | Presencia de Emulsión |
| ALUaT1 | Con | 21 | 7 | 14% de H ₂ O |
| ALUiT2 | demulsificante | 30 | 6,5 | 23,5% de H ₂ O |
| ALUiT3 | | 44 | 7,5 | 36,5% de H ₂ O |

Nota: Estos porcentajes están en %V/V.

Cuando se alcanzan a tales cantidades de agua y sedimentos (tabla 4.3) es debido principalmente a la mala gestión (manipulación, transporte y almacenamiento) de los ALU's. Se presume que la cantidad de agua y sedimentos contenida en los aceites residuales de Orinoco Iron son obtenidas por los lubricantes en las trampas y fosas de aceites (lugares en donde se acumulan gran parte de los ALU's durante semanas antes de ser llevados a al patio de hidrocarburos usados).

Actualmente la cantidad de lodos y sedimentos acumulada en el fondo de los tanques de almacenamiento temporal del patio de hidrocarburos usados de Orinoco Iron es tanta que impide el correcto drenaje del agua libre y de los sedimentos que decantan por acción gravitacional en dichos contenedores, también ha sido tanto el tiempo que esos aceites tiene almacenados que se han formado lodos de aspecto bituminoso en el fondo de los tanques, cosa que hace creer al obrero que se encarga de drenar el agua y sedimento de los contenedores que es aceite y el procede a cerrar la válvula de drenaje.

Es importante que la empresa considere en llevar el contenido de agua y sedimentos en los aceites de sus tanques de almacenamiento a valores por debajo del 5 y 1% respectivamente; además la presencia de estos normalmente pueden colmatar filtros del sistema de inyección, taponar la boquilla de aspersión, darle al ALU propiedades de lubricidad menores; el agua podría ocasionar además problemas de corrosión en los componentes del sistema, ya que el agua se acidifica y termina atacando los tanques de almacenamiento; también forman lodos y limos, y además contribuyen al crecimiento de microorganismos que pueden convertir el azufre que puedan contener los ALU's en ácido sulfúrico (Ciria, 2006).

Los sedimentos contenidos en los ALU's almacenados en los tanques son debidos primordialmente a los restos metálicos provenientes de los equipos a los cuales lubricaron en algún momento, o provienen de una contaminación debida a un mal transporte y a mala manipulación de los aceites (gestión). La concentración de metales en un aceite usado forma parte de los sedimentos, y se debe principalmente a la degradación de aditivos órgano metálicos del aceite lubricante nuevo, además de desgastes producidos por rozamientos en las piezas móviles del equipo que lubricó.

El agua en los aceites proviene principalmente de la condensación del vapor presente en la atmósfera o se debe a fugas en los sistemas de enfriamiento del aceite. El agua provoca emulsificación, y lava la película lubricante que se encuentra sobre la superficie metálica provocando así el desgaste de dicha superficie, y al haber desgaste se incrementa el contenido de sedimentos en el aceite (Ciria, 2006).

4.2. Caracterización de los aceites lubricantes usados, midiendo sus propiedades fisicoquímicas

En la tabla 4.4 se colocaron los resultados de la caracterización realizada.

Tabla 4.4. Propiedades fisicoquímicas de las muestras de ALU's determinadas en el laboratorio y datos de las propiedades del Fuel oil 424.

| Propiedad | | ALUaT1 | ALUiT2 | ALUiT3 | Fuel Oil 424 |
|------------------------------------|---------------|-----------|-----------|-----------|--------------|
| Gravedad API | (°API) | 27,92 | 28,04 | 28,76 | - |
| Viscosidad (cP) | a 30°C | 165 | 198,5 | 178,5 | - |
| | a 40°C | 90 | 106,2 | 83,8 | - |
| | a 100°C | 9 | 8 | 7 | - |
| Gravedad Especifica | a 15,6°C | 0,8876 | 0,8869 | 0,8829 | 0,9254 |
| | a 25,6°C | 0,8842 | 0,8792 | 0,8783 | - |
| | a 40°C | 0,8778 | 0,8724 | 0,8718 | - |
| | a 100°C | 0,8367 | 0,8315 | 0,8306 | - |
| Viscosidad Cinemática (cSt) | a 40°C | 102,533 | 118,805 | 96,125 | 470 |
| | a 100°C | 10,757 | 9,405 | 8,428 | 31 |
| Índice de Viscosidad | | 86 | 25 | 30 | - |
| Punto de Inflamación | (°C) | 206 | 224 | 220 | 77 |
| Punto de Combustión | (°C) | 228 | 242 | 246 | - |
| Punto de Fluidez | (°C) | -25 | -8 | -7 | 0 |
| Carbón Conradson | (%peso) | 0,3553 | 0,3240 | 0,3306 | 15 |
| Agua y Sedimentos | (%vol) | <1% | <1% | <1% | 0,5 |
| Poder Calorífico | (kcal/kg) | 10.559,29 | 10.655,11 | 10.750,97 | 10.307 |
| | (kJKg) | 44.209,63 | 44.610,80 | 45.012,15 | 43.100 |

NOTA: Datos del Fuel oil Extraídos del manual de productos PDV, Sección I, año 2001.

De acuerdo a los resultados de esta caracterización fisicoquímica, los ALU's generados por Orinoco Iron y Venprecar presentan características que le confieren propiedades como combustible, y estas pueden ser concatenadas con las de un *fuel oil* (*fuel oil 424*, marca PDV). De lo anterior y de acuerdo a lo expresado en la tabla 4.4, se puede resaltar que los ALU's:

- Son combustibles más livianos que el *fuel oil*, debido a que sus densidades y viscosidades son menores a la del *fuel oil* en cuestión.
- Generan menor cantidad de residuos carbonosos (inquemados solidos) al momento de su combustion.
- Poseen un poder calorífico ligeramente superior al del *fuel oil 424*, y mucho mayor al del gas natural.
- Requerirán menos exigencias de manejo y almacenaje que un combustible corriente, ya que su punto de inflamación es más elevado.

La cantidad de agua y sedimentos contenida en los ALU's analizados es ligeramente superior a la del *fuel oil*. Vale la pena destacar que el porcentaje obtenido de agua y sedimentos estaba mayormente representado por sedimentos para los ALUi y por agua para los ALUa, de lo que se puede inferir que los ALUi tienden a retener más sólidos en su seno y los ALUa retienen mas el agua.

El punto de inflamación del ALUa analizado es ligeramente menor que el obtenido para los ALUi, de acuerdo a los valores reportados en la tabla 4.4 estos ALU's presentan pocos componentes volátiles, ya que su punto de inflamación es elevado.

El punto de combustión obtenido para los ALU's analizados estuvieron aproximadamente 20 °C por encima del punto de inflamación (tabla 4.4); y su valor indica la temperatura por encima de la cual los ALU's comienzan a quemarse. Las cámaras de combustión del secador de Orinoco Iron ofrecen temperaturas superiores a estas.

A continuación se analizan otras propiedades fisicoquímicas que caracterizó SIDOR a los ALU's que genera en sus instalaciones. De acuerdo a lo expresado en la tabla 4.5 se puede resaltar que:

- El contenido de cloruros en los ALU's está muy por debajo de lo exigido por la legislación ambiental venezolana (menos de 1000ppm de solventes organoclorados), y su empleo como combustible generará un ligero impacto ambiental.
- El contenido de cenizas en los aceites que SIDOR caracterizó es inferior al uno porcentual. Lo que evitará la rápida obturación de los filtros y de la boquilla de pulverización del aceite, en el sistema de inyección de ALU's.
- Los ALU's no son corrosivos, los problemas de corrosión son debidos a la acidificación del agua libre que pueda contener el ALU.

El contenido de azufre en los ALU's tiende a ser poco, por lo tanto la generación de SO₂ producto de la combustión de los aceites (100 ppm es el límite de emisión de SO₂ exigido por el decreto 638) y los problemas de corrosión debido a la formación de H₂SO₄, serán mínimos (Kiely, 1999).

Tabla 4.5. Caracterización fisicoquímica determinadas para los ALU's generados en SIDOR. (SIDOR, 2002).

| <i>Parámetro.</i> | <i>Unidad.</i> | <i>Muestra N°1.</i> | <i>Muestra N°2.</i> | <i>Característica</i> |
|------------------------------------|-----------------|---------------------|---------------------|-------------------------------|
| Poder Calórico | <i>Kcal/kg.</i> | 9895 | 9710 | Aprovechable como combustible |
| | <i>MJ/kg</i> | 41.42 | 40.65 | |
| Agua. | <i>%p/p.</i> | 0,40 | 0,46 | |
| Peso específico. | <i>Kg/l.</i> | 0,85 | 0,89 | |
| Viscosidad dinámica. | <i>Poise.</i> | 2,3 | 2,7 | |
| Partículas Sólidas | <i>%p/p.</i> | 0, 3 | 0,40 | |
| Corrosividad | <i>adim</i> | 6,50 | 6,63 | No Reactivo |
| Punto de inflamación | <i>°C.</i> | 177 | 171 | Inflamable |
| Reactividad H₂S. | <i>mg/kg</i> | < 0,1 | < 0,1 | No Explosivo |
| Reactividad HCN. | <i>mg/kg</i> | < 0,1 | < 0,1 | No Corrosivo |
| Azufre. | <i>%p/p.</i> | < 0,01 | < 0,01 | |
| Cloruro. | <i>%p/p.</i> | 0,002 | 0,007 | |
| Cenizas. | <i>%p/p.</i> | 0,11 | 0,25 | |

Por factores económicos no se pudo determinar el paquete metálico que poseen los ALU's de Orinoco Iron y Venprecar, pero se obtuvo una caracterización completa con la concentración de metales que poseen los ALU's que generará SIDOR. En la tabla 4.6 se observa que la concentración de los metales estuvo, en todos los casos, muy por debajo del límite exigido por la normativa ambiental venezolana (Decreto 638, 1995), por lo que el impacto ambiental que generará la quema de los ALU's será leve, por otro lado es probable que estos metales queden, en su mayoría, en el lecho de mineral de hierro en el secador.

Por otro lado, los ALU's no podrán ser reusados como combustible cuando contengan menos del 10% en volumen de pentaclorofenol, plaguicidas organoclorados o cualquiera de los solventes no halogenados indicados en la tabla D.2; menos de 1000 ppm de los solventes halogenados que figuran en el mismo punto; menos de 50 ppm de bifenilos o terfenilos policlorados ni cualquier otra de las sustancias del Anexo C indicadas con una X que no pueda ser removida mediante los procesos de recuperación previstos a utilizar (artículo 13 del decreto 2635). Las concentraciones de los compuestos organoclorados y aromáticos en la tabla 4.7 se encuentran por debajo del límite exigido por el decreto 2635, por lo que dichos aceites pueden ser recuperados sin que generen problemas significativos de contaminación ambiental.

Tabla 4.6. Concentración de metales obtenida para los ALU's generados en SIDOR (SIDOR, 2002).

| Parámetros | Unidad. | Muestra N°1. | Muestra N°2. | Límites |
|-------------------|----------------|---------------------|---------------------|----------------|
| Arsénico. | <i>mg/Kg.</i> | < 1,00 | < 1,00 | 50 ppm |
| Mercurio. | <i>mg/Kg.</i> | 1,16 | 1,04 | 50 ppm |
| Selenio. | <i>mg/Kg.</i> | < 0,10 | < 0,10 | 1000 ppm |
| Bario. | <i>mg/Kg.</i> | 1,74 | 1,63 | |
| Cadmio. | <i>mg/Kg.</i> | 0,60 | <0,53 | 50 ppm |
| Cobre. | <i>mg/Kg.</i> | 2,56 | 2,98 | 1000 ppm |
| Cromo. | <i>mg/Kg.</i> | 11,95 | 7,58 | 50 ppm |
| Plomo. | <i>mg/Kg.</i> | < 0,60 | 12,63 | 1000 ppm |
| Titanio. | <i>mg/Kg.</i> | < 0,60 | <0,53 | |
| Plata. | <i>mg/Kg.</i> | < 0,60 | <0,53 | |
| Zinc | <i>mg/Kg.</i> | 106 | 220 | 1000 ppm |
| Níquel. | <i>mg/Kg.</i> | 1,20 | < 0,53 | 1000 ppm |

El decreto 2635 en su artículo 86 exige que *Para incinerar desechos peligrosos que contengan sustancias orgánicas no halogenados presentes*

en el anexo C, la temperatura de la cámara de combustión debe ser por lo menos de 850 °C y para desechos halogenados que contengan más de 1% de halógenos, la temperatura debe ser superior a los 1100 °C” y en la tabla 4.7 se puede observar que el contenido de halógenos caracterizadas por SIDOR se encuentra alrededor de 500 ppm, valor que está por debajo de lo exigido por la normativa ambiental (1000ppm).

Tabla 4.7. Concentración de hidrocarburos aromáticos y clorados obtenidos para las muestras de ALU´s generados en SIDOR (SIDOR, 2002).

| Compuestos | Parámetros | Unidad. | Muestra N°1. | Muestra N°2. | Límites |
|--------------------------------|------------------|---------|--------------|--------------|-----------|
| Aromáticos Policíclicos | Benzo(a) pireno. | g/Kg. | 404 | 510 | |
| | Pireno. | g/Kg | 350 | 432 | |
| | Antraceno. | g/Kg | 1348 | 1250 | |
| Aromáticos Bicíclicos | Naftaleno. | g/Kg | 102 | 577 | 1000 ppm |
| Aromáticos Monocíclicos | Benceno. | mg/Kg. | < 1,00 | < 1,00 | 10 % vol. |
| | Alquilbenceno. | g/Kg | 2500 | 2151 | |
| | Tolueno. | mg/Kg. | < 1,00 | < 1,00 | 1000 ppm |
| | Xileno. | mg/Kg. | < 1,00 | < 1,00 | 10 % vol. |
| Clorados | HC-CL. | mg/Kg. | 450 | 500 | 1000 ppm |
| Bifenilos Policlorados | PCBs. | g/Kg. | < 50 | < 50 | 50 ppm |

4.3. Determinación de la factibilidad técnica para la quema eficiente de los aceites en las cámaras de combustión

Para garantizar la combustión completa de los ALU´s dentro de las cámaras de combustión de la planta de secado de mineral de hierro de Orinoco Iron, tres factores principales y esenciales deben cumplirse en el proceso de combustión de los ALU´s, tales factores son:

- Temperatura
- Turbulencia
- Tiempo de residencia

Además también existen otros factores que también afectan la correcta combustión del ALU, que no hay que olvidar ni dejar a un lado, estos otros factores son el aire en exceso (suficiente como para garantizar la combustión completa del ALU) y el grado de pulverización, aspersion o atomización que se le pueda dar al ALU, ya que la combustión de éste se realizara más eficientemente si el ALU se inyecta pulverizado (amanera de una niebla o spray) a la cámara de combustión pertinente.

En líneas generales se debe lograr la pulverización optima del ALU en presencia de la cantidad de oxigeno en exceso necesaria para garantizar la combustión completa, además para que los gases generados logren destruirse por completo en la cámara de combustión se requiere de una temperatura adecuada (según el artículo 86 del decreto 2635 la temperatura debe ser superior a 850°C para *desechos peligrosos* que contengan sustancias orgánicas no halogenadas del anexo C, y 1100°C cuando contiene más del 1% de halogenos), de una elevada turbulencia de los gases de combustión (para lo cual el numero de Reynolds debe ser superior a 60.000) y el tiempo de residencia de los gases adecuado (una gotita o niebla de aceite combustible requiere de 1 a 1000 ms para destruirse completamente por combustión).

4.3.1. Análisis de la temperatura en las cámaras de combustión

En la figura 4.2 y 4.3 se muestran los perfiles de temperatura de la cámara de combustión del secador A y del secador B de la planta de secado de mineral de hierro de Orinoco Iron, desde el 23/05/2008 hasta el 03/06/2008 (11 días o 264 horas en las cuales los secadores trabajaron a una capacidad optima puesto que la planta estaba operando con cuatro trenes y era mucha la exigencia en la planta de secado), en donde se observa que el secador A opero a temperaturas más bajas que el secador B, esto debido a que el primero se tomo como secundario, es decir que el fuerte de la producción de mineral de hierro seco lo tuvo el secador B y por ello las temperaturas en él fueron mayores.

Según la información obtenida en los manuales de operación y de los operadores de la planta, se sabe que en las cámara de combustión de la planta de secado de mineral de hierro de Orinoco Iron se pueden alcanzar temperaturas de 1100°C, pero los operadores no permiten que la temperatura suba por encima de los 950°C para así proteger, alargar el tiempo de vida y evitar la deformación de la parrilla distribuidora de gases (específicamente a los *ferrules*, que son una especie de baffles a través de los cuales pasa el gas y sirve para distribuirlo) de los gases de combustión dentro del secador de lecho fluidizado.

En las figuras 4.2 y 4.3 se puede observar que los secadores de mineral de hierro alcanzan temperaturas superiores a 850 °C.

A pesar de que en las figuras 4.2, 4.3 y 4.4 se observan temperaturas superiores a 850°C, el tiempo de permanencia por encima de ese valor fue alrededor de 5 y 7 horas continuas de operación para el secador A (secador

que estuvo trabajando a baja capacidad) y de aproximadamente 5 a 19 horas continuas de operación para el secador B (secador que estuvo trabajando a alta capacidad); además de esto también se observa una variación de la temperatura a lo largo de la cámara de combustión, ya que los indicadores de temperatura en algunos casos muestran valores dispersos entre si; lo anterior puede corroborarse en las tablas F.1 y F.2 del anexo F.

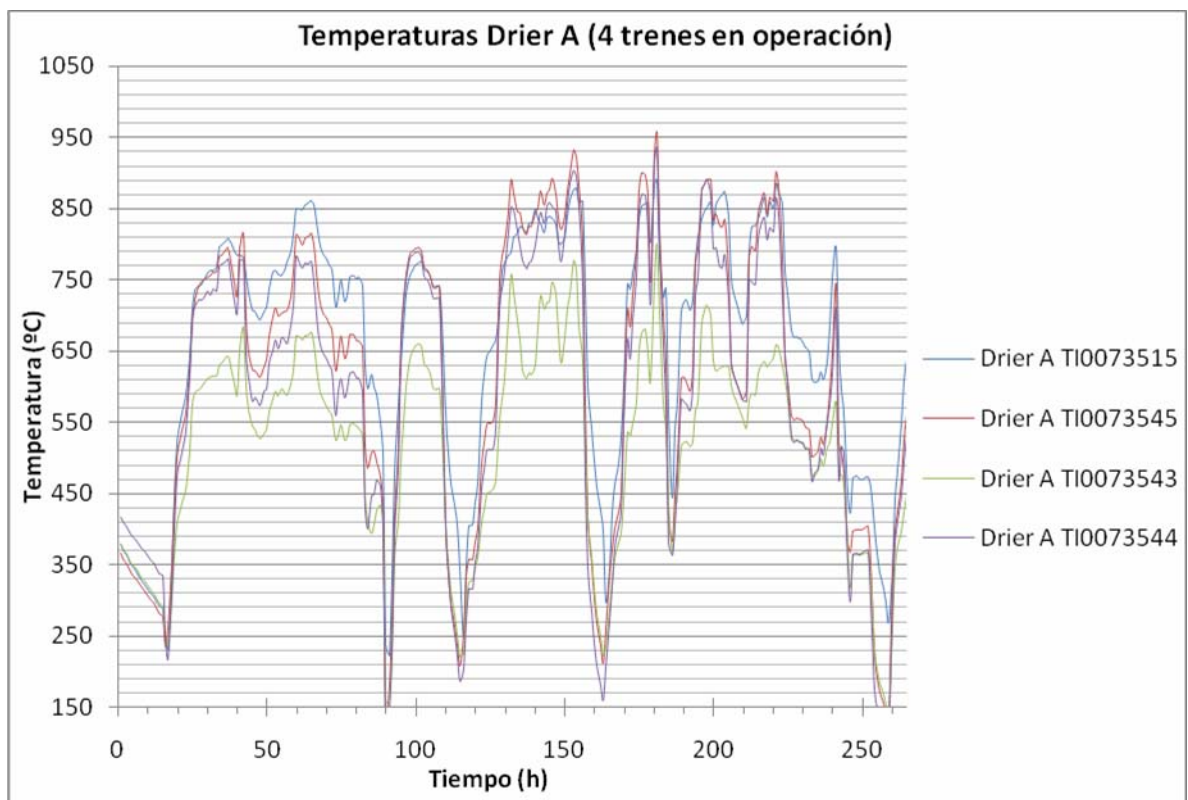


Figura 4.2. Perfil de temperatura arrojado en la cámara de combustión del secador A de la planta de secado de mineral de hierro durante las 264 horas (11 días) con 4 trenes de Orinoco Iron en operación.

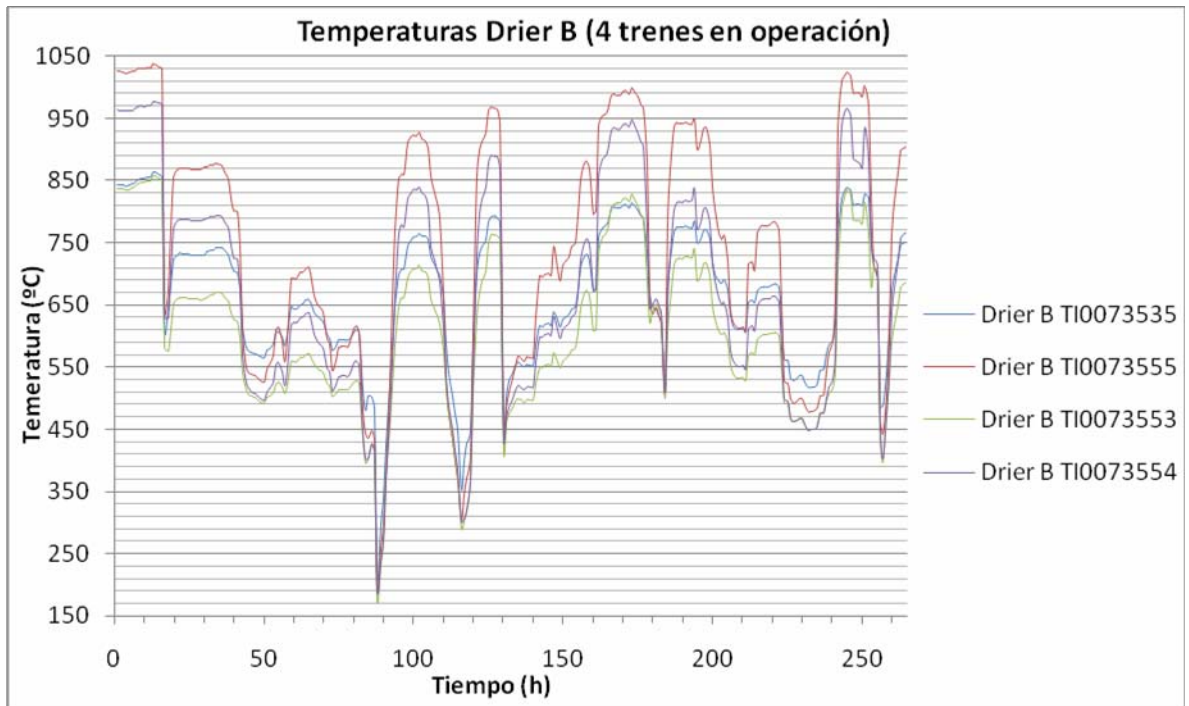


Figura 4.3. Perfil de temperatura arrojado en la cámara de combustión del secador B de la planta de secado de mineral de hierro durante las 264 horas (11 días) con 4 trenes de Orinoco Iron en operación.

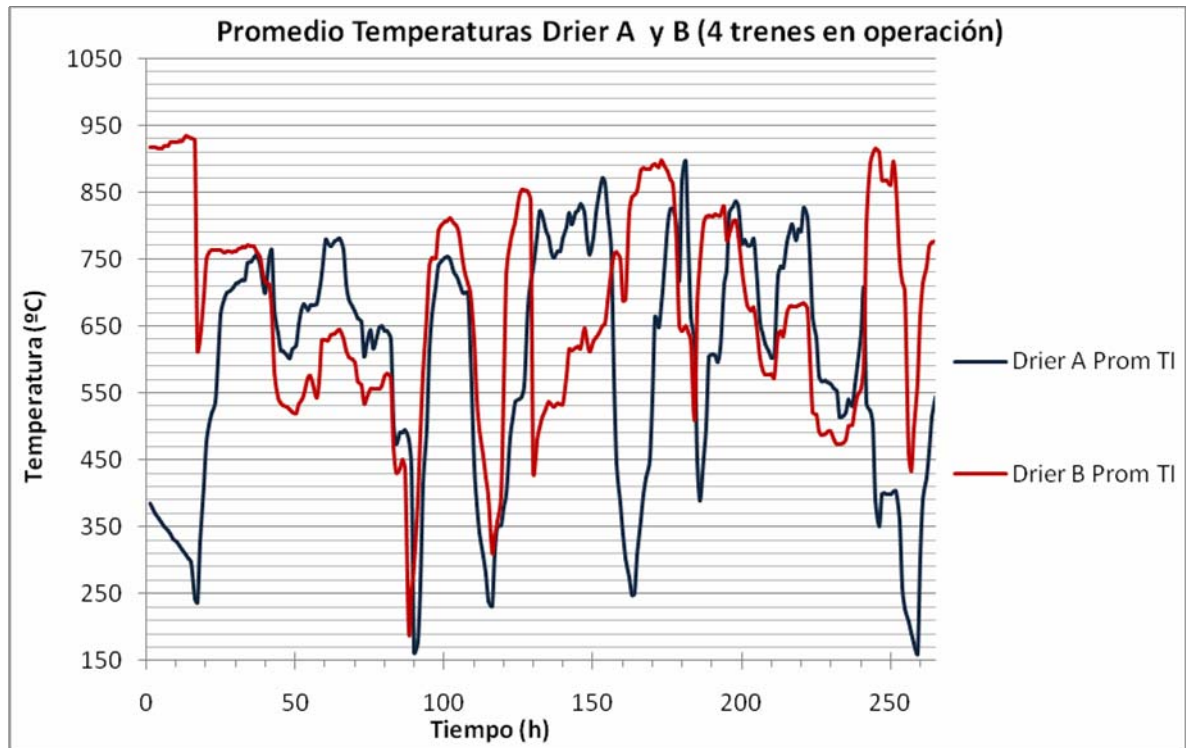


Figura 4.4. Promedio de las temperaturas medidas por los cuatro indicadores de temperatura del secador A y del secador B.

4.3.2. Análisis del tiempo de residencia y de la turbulencia de los gases en la cámara de combustión de los secadores de mineral de hierro

En la tabla 4.8 se encuentran los resultados obtenidos para el número de Reynolds y el tiempo de residencia de los gases de combustión en las cámaras de combustión de los secadores de mineral de hierro a la presión de operación y a 800, 870 y 950 °C, y se observa que el tiempo de residencia va de 781,4 a 682,3 ms y que el número de Reynolds (indicador de la turbulencia de los gases dentro de la cámaras de combustión) está por encima de los 300.000.

Tabla 4.8. Velocidad, tiempo de residencia y turbulencia de los gases de combustión a las condiciones de operación del secador de mineral de hierro de Orinoco Iron.

| <i>P</i> (atm) | <i>T</i> (°C) | <i>LDG + G.N como combustible</i> | | | <i>Solo G.N como combustible</i> | | |
|-------------------|---------------|-----------------------------------|---------------------------|-----------|----------------------------------|---------------------------|-----------|
| | | <i>v</i> (m/s) | <i>t_r</i> (ms) | <i>Re</i> | <i>v</i> (m/s) | <i>t_r</i> (ms) | <i>Re</i> |
| | 800 | 12,7976 | 781,4 | 361.240,2 | 12,7577 | 783,8 | 360.764,3 |
| 1,2064 | 870 | 13,6655 | 731,8 | 348.209,1 | 13,6230 | 734,1 | 347.710,6 |
| | 950 | 14,6573 | 682,3 | 328.749,4 | 14,6118 | 684,4 | 328.285,8 |

Teóricamente el tiempo de quemado para una gotita o niebla de combustible va desde 1 a 1.000 ms (milisegundos) y en la tabla 4.8 se puede notar que el tiempo de residencia de los gases dentro de la cámara de combustión esta dentro del tiempo de quemado exigido teóricamente, pero es importante recalcar que este tiempo será suficiente si y solo si el ALU se introduce dentro de la cámara de combustión a manera de niebla o gólicas (SIDOR, 2001).

En los incineradores de desechos peligrosos el tiempo de residencia a elevadas temperaturas (>1000°C) es típicamente de unos dos segundos, y depende del volumen del incinerador en la cámara de combustión, del contenido de humedad, de sólidos volátiles, del carbono fijo, de los desechos no combustibles y del contenido de energía de las basuras; y obviamente las exigencias serán menores al intentar incinerar un desecho en las cámaras de combustión de los secadores de Orinoco Iron con alto contenido energético y de carbono como lo son los aceites lubricantes usados (Kiely, 1999).

No tiene ningún sentido cumplir con los requisitos de temperatura y tiempo de residencia si el ALU vaporizado no se expone al grado correcto de

mezclado, y tal mezclado es aportado por la turbulencia de los gases; es por esto que una alta turbulencia del fluido es requerida dentro de la cámaras de combustión (Kiely, 1999).

Para satisfacer el ambiente turbulento adecuado dentro de las cámaras de combustión, el número de Reynolds del flujo fluido debe ser mayor a 60.000; y en la tabla 4.8 se observa que el numero de Reynolds obtenido en todos los casos es superior a los 320.000, asegurándose así dentro de las cámaras de combustión el mezclado adecuado de las gólicas o niebla de ALU con el oxigeno y que todos los componentes del ALU alcancen la temperatura necesaria más rápidamente (Kiely, 1999).

4.4. Selección de los equipos y la ubicación del nuevo sistema de alimentación de combustible líquido en la planta de secado de mineral de hierro de ORINOCO IRON S.C.S

En la tabla 4.9 se encuentra el caudal y presión de trabajo para el sistema, mientras que en las tablas 4.10 y 4.11 respectivamente se encuentran los materiales, equipos y accesorios propuestos para la instalación del sistema de inyección de ALU's de prueba y definitivo; Por otro lado en las figuras 4.5 y 4.6 se plantea el diagrama de flujo de los sistemas planteados. Esta separación del proyecto en dos etapas es para que la empresa realice la inversión para la instalación del sistema definitivo de una manera más segura, además esto le permitirá analizar más a fondo todos los aspectos técnicos, económicos y ambientales involucrados a la instalación y puesta en marcha del sistema de inyección de ALU's en la planta de secado de mineral de hierro, lo que permitirá ratificar la viabilidad del proyecto y estudiar la posible afectación que la quema de ALU's podría ocasionar al proceso e instalaciones.

4.4.1. Selección de las variables operacionales para el sistema de inyección

Las variables operacionales esenciales requeridas para lograr el ecoeficiente funcionamiento del sistema de inyección de ALU's a las cámaras de combustión de los secadores de mineral de hierro de Orinoco Iron, son dos: la presión de inyección del ALU y el volumen de flujo con el que se dosificara al interior del recinto de combustión, en el cual se debe asegurar una temperatura superior a 850°C.

Además en las cámaras de combustión de acuerdo a los valores de la tabla 4.8, para el rango de temperatura de 800 a 950°C, tanto la turbulencia como el tiempo de residencia de los gases dentro de ella son óptimas y garantizaran la combustión completa de las micro gotas de ALU que se introducirán a través del sistema de inyección a la cámara de combustión del secador de mineral de hierro de Orinoco Iron (Kiely, 1999 y SIDOR 2001).

En la tabla 4.9 se ilustra el valor y rango de las variables operacionales del sistema de inyección de ALU's.

Tabla 4.9. Volumen de flujo y presión seleccionada para la inyección de ALU's a la cámara de combustión del secador de mineral de hierro de Orinoco Iron.

| <i>Variable operacional</i> | <i>Volumen de Flujo (L/h)</i> | <i>Presión de inyección (psi)</i> |
|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| Rango | 60-180 | 90-130 |
| Valor de trabajo | 90 | 100 |

Como se ve en la tabla 4.9 básicamente se selecciono un bajo volumen de flujo, 90 L/h, por tres factores: la tasa de generación de ALU's en Orinoco Iron y VPC, aspectos técnicos y aspectos ambientales.

De acuerdo a los históricos, desde el año 2006 al 2009, la generación mensual de ALU's entre Orinoco Iron y Venprecar está entre 5,9 y 9,4 m³/mes, mientras que en SIDOR la generación mensual es de 150 m³. En SIDOR trabajan con un rango de inyección de ALU entre 180 y 600 L/h, el cual se ajusta perfectamente a la generación mensual que dicha empresa tiene entre las instalaciones de sus plantas; por lo que para Orinoco Iron es más conveniente un volumen de flujo pequeño, con el cual se pueda consumir cómodamente la cantidad de ALU's que entre Orinoco Iron y Venprecar se generan.

Los secadores de mineral de hierro de Orinoco Iron, son considerados el pulmon del proceso *finmet*, y un bajo caudal como el seleccionado no afectara la estructura interna de la cámara de combustión, ni la parrilla de distribución de gases de dicho secador, y sus cenizas no afectaran las propiedades del mineral de hierro seco.

Al mantener un bajo caudal de inyección de ALU's a la cámara de combustión del secador de mineral de hierro se asegura la correcta combustión del mismo, no generando así impactos significativos al medio ambiente.

4.4.2. Descripción general del sistema de inyección de ALU's de prueba

El sistema de inyección de ALU's a implementar en la planta de secado de mineral de hierro, consiste en dosificar a manera de *espray* un bajo caudal

de ALU a presión moderada en el interior de la cámara de combustión de los secadores de mineral hierro. El aceite deberá ser inyectado en un rango de presión que ronde entre 90 y 130 psi para que la boquilla de pulverización en la lanza inyecte adecuadamente el spray de aceite, a una tasa de inyección preferiblemente entre 1,5 y 3 L/min (90 y 180 L/h); la quema de ALU deberá ser realizada siempre y cuando la temperatura de la cámara de combustión sea mayor o igual a 850°C.

El sistema de inyección operara de forma manual, y constara básicamente de un pequeño tanque con una capacidad no mayor a los 1000 L, que se colocara en el nivel cero de la planta de secado de mineral de hierro, una tubería de acero al carbono de una pulgada que conectara a todo el sistema de inyección de aceite, sistema de válvulas, medidores de flujo y presión, filtro, bomba de engranaje, lanza de inyección de ALU´s y sistema de barrido de aire; además tendrá una tubería de derivación después de la descarga de la bomba, lo que permitirá regular el volumen de flujo del sistema de inyección, y así poder hacer pruebas a varios caudales. Ver figura 4.5 y tabla 4.10.

A continuación se procederá a describir a detalle los componentes mas resaltantes de este sistema de inyección de ALU´s:

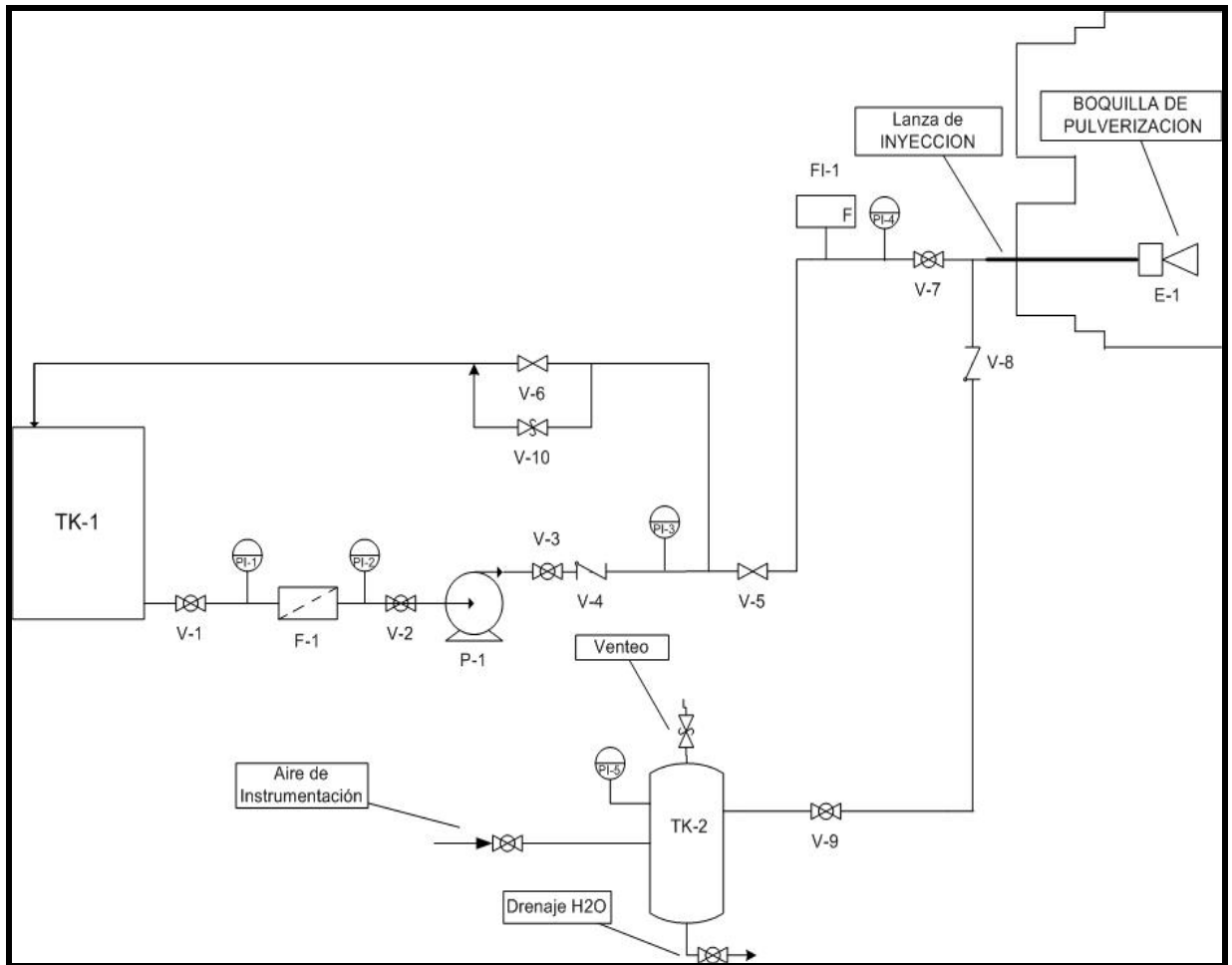


Figura 4.5 Sistema de inyección de ALU's en fase de prueba.

El tanque de almacenamiento es, quizás, el desembolso de capital más grande de todo el sistema de dosificación de ALU's, es por ello que en esta primera etapa del proyecto (*etapa de prueba*) en vez de un tanque como tal, se utilizara cualquier recipiente disponible en la empresa con volumen entre 500 y 1000 litros, al cual se le instalara un sencillo indicador de nivel con flotador y tablero (elaborado por el personal de la empresa). Debido a que en el aire de la planta de secado y sus alrededores existen cantidades considerables de finos de mineral de hierro, el tanque también deberá estar sellado y poseer un respiradero, para así evitar la formación de depósitos

sólidos que al ser succionados por la bomba colmatarían el filtro, generarían problemas de abrasión en la bomba engranes y obstruirían la abertura de la tobera de pulverización de aceite. Un *Unicubo* (recipiente contenedor de 1000L como el de la figura H.1 del anexo H), podría utilizarse como tanque de almacenamiento.

Un filtro colador con malla de 5 micras deberá ser colocado en la tubería de succión de la bomba de engranaje, para proteger a todo el sistema de los sólidos abrasivos y además para impedir que la pequeña abertura de la boquilla en la lanza de inyección de aceite se obstruya.

Tabla 4.10. Propuesta de los materiales, equipos y accesorios requeridos para la instalación del sistema de inyección de ALU's de prueba.

| Ítem | Tag | Cantidad | Equipo/Materiales | Observaciones | Disponibilidad en planta |
|-------------|---------------------------------|-----------------|--------------------------------------|---|---------------------------------|
| 1 | TK-1 | 1 Und | Tanque de almacenamiento | De 1000L de capacidad | Si |
| 2 | F-1 | 1 Und | Filtro de aceite | Tipo colador, De 5 a 10 micras | Si |
| 3 | P-1 | 1 Und | Bomba de engranaje | presión de descarga entre 90 y 130 psi, Caudal entre 90 y 300 L/h | Si |
| 4 | E-1 | 1 Und | Tobera para la pulverización del ALU | De cono lleno y 60° de apertura | No |
| 5 | TK-2 | 1 Und | Pulmón de Aire | | Si |
| 6 | PI-1 PI-2 | 3 Und | Indicador de Presión | Tamaño 4", conexión inferior de 1/2" NPT, rango de (0-10) bar | Si |
| 7 | PI-3 PI-4 | 1 Und | Indicador de Presión | Tamaño 4", conexión inferior de 1/2" NPT, rango de (0-20) bar | Si |
| 8 | FI-1 | 1 Und | Flujometro | Rotametro | Si |
| 9 | V-1 V-2 V-3 V-9 V-7 | 6 Und | Válvula de Bola | De 1" roscable hembra, 800 psi | Si |
| 10 | V-4 V-8 | 2 Und | Válvula Check | De 1" roscable hembra | Si |
| 12 | V-5 V-6 | 2 Und | Válvula de compuerta | De 1" roscable hembra, 800 psi | Si |
| 14 | V-13 | 1 Und | Válvula de alivio | De 1" | Si |
| 15 | - | 24m | Tubería | Acero al carbón de 1" Sh40 | Si |
| 16 | - | 2 m | Lanza de inyección | Acero inoxidable de 1" Sh80 | Si |

Una bomba de engranaje que tenga una capacidad de descarga entre 90 y 130 psi, y que maneje preferiblemente un caudal entre 90 y 300 L/h. La bomba de engranes tiene la peculiaridad de dosificar a caudal constante, y no lo hace por pulsaciones como lo hacen las otras bombas, garantizando un flujo constante.

Una tubería de recirculación que según sean las caídas relativas de presión en esta tubería y en la tubería de alimentación, se podrá dosificar el gasto para el proceso desde cero hasta 100%, es decir que una bomba de engranes manejadora un caudal de 300 L/h podrá dosificar cualquier caudal inferior a este con tan solo regular la caída de presión en el tubo de derivación y en el tubo de alimentación. La *Válvula de derivación*, reguladora de la caída de presión relativa del tubo de derivación, estará en paralelo con una *válvula de alivio* para evitar las sobrepresión en el sistema.

El sistema de barrido con aire estará conformado por un *pulmón de aire* (figura H.2) conectado a través de tuberías antes de la lanza de inyección de aceite, una válvula controlada manualmente permitirá la activación del barrido con aire a una presión de 8 bar una vez finalizado la quema de ALU en la cámara de combustión del secador de lecho fluidizado de mineral de hierro.

Una lanza de inyección de aceite, tubería de acero inoxidable, será insertada en el cuerpo del quemador dual 2 del secador que se seleccione para realizar la prueba (secador A o B); se selecciona el quemador 2 debido a que la cámara de combustión posee una ventanilla de inspección que permite ver la llama de este quemador. Otra opción sería perforar la cámara de combustión y ubicar el rociado de la lanza entre las llamas de ambos

quemadores (véase la figura H.3), pero la primera opción resulta ser menos engorrosa.

La lanza como elemento final y fundamental del sistema de inyección tendrá una *tobera* (Figura H.4) que permitirá la pulverización del ALU a dosificarse en la cámara de combustión, y mientras mejor sea el grado de pulverización con el que se inyecte al aceite mejor será la eficiencia de su combustión. La tobera de pulverización de aceite inyectará el aceite al interior de la cámara de combustión del secador de mineral de hierro a manera de cono lleno con ángulo de apertura de 60°.

En el sistema son seis las válvulas principales (válvulas de actuación): la válvula a la salida del tanque, la que está previo a la bomba, la que habilita la inyección de ALU a la cámara de combustión, la que permite la inyección del barrido de aire y la válvula de derivación que permitirá regular la presión y el caudal del sistema. Todas estas válvulas operarán de forma manual durante la fase de prueba del proyecto. La válvula de inyección y la de derivación pueden ser de acero 316 (Kenneth, 1998).

4.4.2.1. Filosofía de operación del sistema de prueba

Antes de colocar en marcha al sistema primero debe verificarse el nivel del tanque, que todas las válvulas estén cerradas (véase figura 4.5), que la temperatura registrada por los indicadores de temperatura de la cámara de combustión sea mayor a 850°C y que tanto las válvulas como la bomba de engranes estén en condiciones para operar. Los operadores del sistema abren al 100% la válvula de compuerta V-6 y las de bola V-3, V-2 y V-1 en ese orden; y se enciende la bomba de engranes P-1 dando inicio a la *recirculación del sistema* por un tiempo determinado para así homogeneizar

su contenido. Pasado el tiempo de recirculación se comienza a abrir gradualmente la válvula de compuerta V-5 al 100% y al mismo tiempo se va cerrando la válvula de compuerta V-6 hasta un 50%, enviando aceite en dirección a la cámara de combustión del secador. Un operador procederá a aperturar la válvula de bola V-7 una vez alcanzada una presión 1.3 veces mayor a la presión de trabajo deseada para el sistema (presión de trabajo recomendada entre 90 y 130 psi, si se fija una presión de trabajo de 100psi, la presión de apertura de la válvula será 130psi; esto para amortiguar la caída de presión), dando así inicio a la quema de aceites lubricantes usados. Una vez iniciado el proceso de inyección, se procede a regular el flujo de inyección de aceite, aperturando o cerrando un poco más las válvulas de compuerta V-5 y V-6 hasta observar en el rotámetro FI-1 el caudal requerido para la corrida.

Pasada varias horas desde el inicio de la dosificación se procede a detener el suministro de aceite a la cámara de combustión de la planta de secado de mineral de hierro abriendo la válvula V-6 hasta un 100% y gradualmente ir cerrando la válvula V-5, cuando esta última esté totalmente cerrada la válvula de bola V-7 se cierra completamente e inmediatamente la válvula V-10 se abre totalmente para dar inicio a la inyección de aire (proveniente de un pulmón de aire a 8 bar), purgando el aceite residual de la lanza de inyección durante unos 15 minutos, pasado este tiempo dicha válvula se cierra. Una vez que se dio inicio al sistema de barrido con aire, se apaga la bomba de engranes P-1, seguidamente se cierran la válvula de compuerta V-6 y válvulas de bola V-1, V-2 y V-3.

El suministro de ALU a la cámara de combustión deberá ser detenido siempre y cuando:

1. Falle o se dispere alguno de los quemadores.

2. El filtro en la succión de la bomba F-1 este tapado, reflejado en el aumento de la presión en el PI-1.
3. La presión de entrada a la cámara de combustión este elevada
4. Se tapone la boquilla de pulverización de aceite en la lanza de inyección, reflejado el abrupto aumento de la presión en el PI-4.
5. Falle la bomba de engranes P-1.
6. Este bajo el nivel del tanque de alimentación.
7. Falle algún indicador de presión o flujometro.
8. Falle alguna válvula.

En los casos 1, 3, 6 y 7 inmediatamente después de detectada la falla la dosificación de ALU's a la cámara de combustión de la planta de secado de mineral de hierro deberá ser detenida de la siguiente manera: se abre la válvula de recirculación al 100% (válvula de compuerta V-6) al mismo tiempo que se cierra la V-5 y V-7, inmediatamente después se da apertura a la válvula V-10 para dar paso al barrido con aire en la lanza de inyección, luego se apaga la Bomba de engranes P-1 y se cierran las válvulas V-1, V-2, V-3 y V-5. Se cierra la válvula V-10 15 min después de su apertura.

En los casos 2, 4, 5 y 8 inmediatamente después de detectada la falla, se apaga la bomba de engranes P-1, se cierra el paso a aceite al horno (cerrando válvulas V-7 y V-5) y después se da cierre a las restantes válvulas (V-1, V-2, V-3 y V-6). Para el caso 2, 5 y 7 el sistema puede colocarse en el modo de purgado con aire a presión inmediatamente después de detectada la falla.

4.4.3. Descripción general del sistema de inyección de ALU's definitivo

El sistema de inyección de ALU's que se propone implementar en la planta de secado de mineral de hierro, consiste en dosificar a manera de

espray un bajo caudal de ALU a presión moderada en el interior de la cámara de combustión de los secadores de mineral hierro. El aceite deberá ser inyectado en un rango de presión que ronde entre 90 y 130 psi para que la boquilla de pulverización en la lanza inyecte adecuadamente el *espray* de aceite, a una tasa de inyección entre 1,5 y 3 L/min (90 y 180 L/h); la quema de ALU deberá ser realizada siempre y cuando la temperatura de la cámara de combustión sea mayor o igual a 850°C.

Este sistema operara de forma semiautomática, y constara básicamente de un tanque de 15000 litros con indicador de nivel, colocado en un lugar apartado a las cámaras de combustión pero próximo a la planta de secado de mineral de hierro, una tubería de acero al carbono de una pulgada que conectara a todo el sistema de inyección de aceite, sistema de válvulas, medidores de flujo y presión, filtro, bomba de engranes, lanza de inyección de ALU's y sistema de barrido de aire; además tendrá una válvula de tres vías que regulara el volumen de flujo y presión del sistema de inyección dosificando ALU a la cámara de combustión y/o recirculándolo al tanque de almacenamiento. Ver figura 4.6 y tabla 4.11.

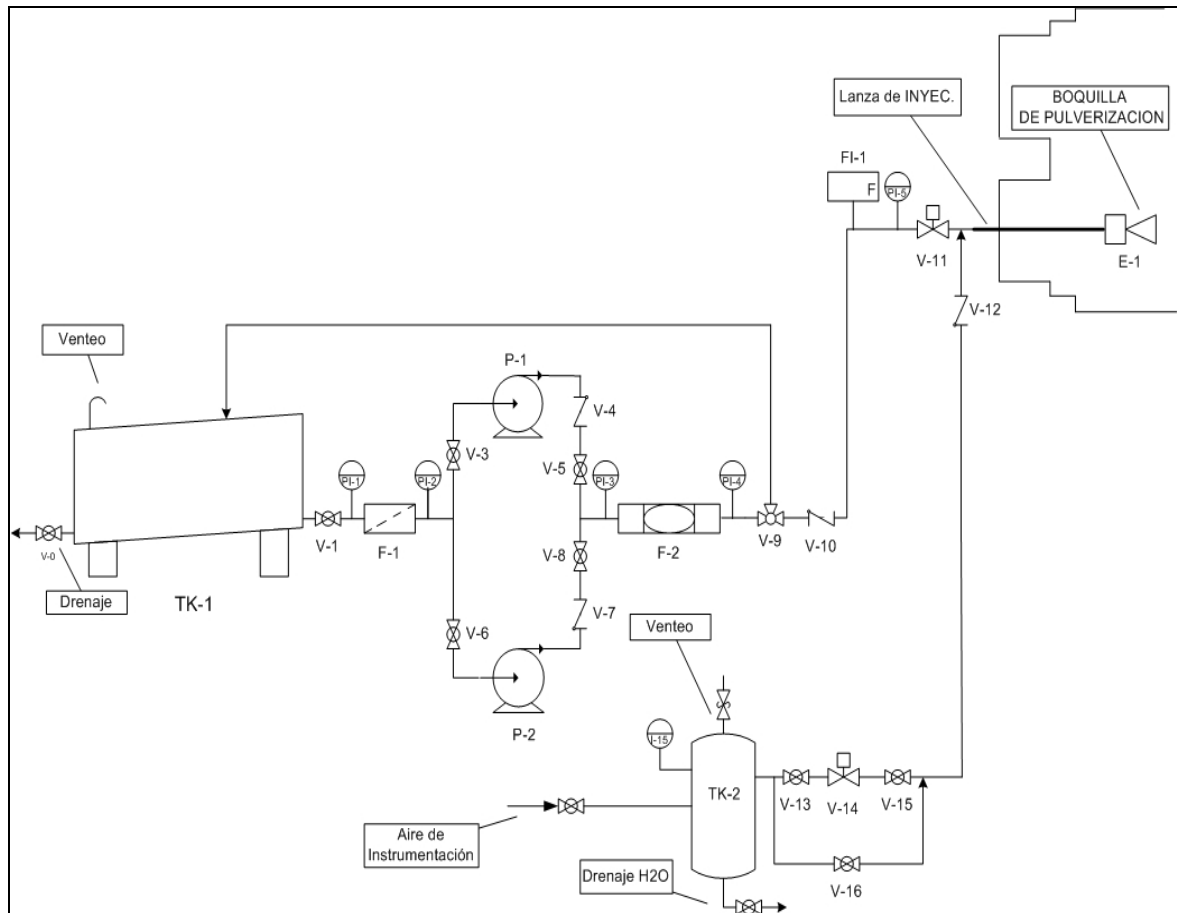


Figura 4.6 Sistema de inyección de ALU`s.

A continuación se describirá de forma detallada las características básicas y fundamentales que deberán tener los materiales, equipos y accesorios a implementar tanto en el sistema de inyección de prueba como en el definitivo, que deben ser tomados en cuenta para que el sistema funcione de manera adecuada. En la tabla 4.11 se desglosan los equipos, materiales y accesorios necesarios.

Un Tanque de almacenamiento horizontal, de acero al carbono (revestido internamente con plastisol aplicado por aspersión) y con inclinación de 4 grados, para que los posibles sólidos contenidos en el aceite

precipiten en el sentido contrario a la succión de la bomba y puedan ser drenados. Deberá tener un drenaje de una pulgada, a través del cual se drenaran los sólidos y el agua libre del sistema, y además la salida para la succión de la bomba también de una pulgada. El tanque también tendrá su respiradero dotado con un filtro removible (con fines de limpieza), para que retenga los sólidos contenidos en el aire que entrará al tanque; y en la parte superior tendrá una abertura con tapa que será utilizada para el llenado del tanque de almacenamiento (ver TK-1 en la figura 4.6).

El tanque de almacenamiento también deberá estar dotado de un indicador de nivel, con alarma de bajo nivel y ha de estar conectado a un circuito eléctrico para que induzca al disparo o apagado de la bomba de engranes cuando el nivel este muy bajo. Además la tubería de recirculación estará del lado del tanque opuesta a la succión de la bomba y sumergida a unas 12 in del fondo del tanque para evitar problemas de aireación, formación de espumas y de acumulación de sólidos por falta de agitación.

Un filtro con malla de 5 micras deberá ser colocado en la tubería de succión de la bomba de engranaje, para proteger a todo el sistema de los sólidos abrasivos y además para impedir que la pequeña abertura de la boquilla en la lanza de inyección de aceite se obstruya. Debido a la gran cantidad de sólidos y sedimentos en los ALU's de Orinoco Iron, sera necesario considerar (dependiendo de los resultados en la *etapa de prueba*) instalar un segundo filtro en la línea de inyección (aguas debajo de la bomba y antes de la válvula de tres vías). El filtro debera ser de acero inoxidable con malla de Monel o Hastelloy C-276 o C-4; se recomienda que la malla del filtro tenga una superficie abierta al menos 1,5 veces mayor al diámetro interior de la tubería (Kenneth, 1998).

La bomba rotatoria de engranes es la base de todo el sistema de inyección de ALU, estará impulsada por un motor de baja velocidad y debe estar en capacidad de dosificar ALU presurizado hasta 100 psi y a una tasa de 90L/h dentro de la cámara de combustión de la planta de secado de mineral de hierro, con una exactitud sin vigilancia del orden de + 2% si el sistema es de cuadro abierto o de + 0,5% o más si el sistema es de cuadro cerrado (Kenneth, 1998).

Las ventajas de la bomba de engranes incluyen, un costo moderado, fácil mantenimiento y flujo sin pulsaciones, que es una ventaja particular en la dosificación, ya que no se alimentan “trozos” de líquido y por lo tanto el volumen de flujo puede ser fácilmente determinado con un rotámetro. El sistema estará dotado de dos de estas bombas colocadas en paralelo.

Tabla 4.11. Propuesta de los materiales, equipos y accesorios requeridos para la instalación del sistema de inyección de ALU's definitivo.

| <i>Ítem</i> | <i>Tag</i> | <i>Cantidad</i> | <i>Equipo/Materiales</i> | <i>Observaciones</i> | <i>Disponibilidad en planta</i> |
|-------------|----------------------------|-----------------|--|---|---|
| 1 | TK-1 | 1 Und | Tanque de almacenamiento | De 15.000L de capacidad | No , pero se puede recuperar uno de 6000 L que está en desuso. |
| 2 | F-1 | 1 Und | Filtro de aceite | De 5 a 10 micras, Para la succión de las bombas | No |
| 3 | F-2 | 1 Und | Filtro de aceite | De 5 micras Para la inyección. | No |
| 4 | P-1 P-2 | 2 Und | Bomba de engranaje | 100 psi y capaz de dosificar 90 L/h | Si |
| 5 | E-1 | 4 Und | Tobera para la pulverización del ALU | De cono lleno y 60° de apertura | No |
| 6 | TK-2 | 1 Und | Pulmón de Aire | De 80 galones | Si |
| 7 | PI-1 PI-2 | 2 Und | Indicadores de Presión | Tamaño 4", conexión inferior de 1/2" NPT, rango de (0-10) bar | Si |
| 8 | PI-3 PI-5 | 3 Und | Indicador de Presión | Tamaño 4", conexión inferior de 1/2", rango de (0-20) bar | Si |
| 9 | FI-1 | 1 Und | Flujometro | Rotametro | Si |
| 10 | | 8 Und | Válvulas de Bola | De 1" roscable hembra, 800 psi | Si |
| 12 | V-4 V-7 V-10 V-12 | 4 Und | Válvula Check | De 1" roscable hembra | Si |
| 13 | V-9 | 1 Und | Válvula de tres vías con flujo ajustable | De 1" roscable hembra, 800 psi | Si |
| 14 | V-11 V-14 | 2 Und | Válvula de Solenoide | De 1" roscable hembra y de 800 psi. | Si |
| 15 | -- | 80 m | Tuberías | Acero al carbón de 1" Sh40 | Si |
| 16 | -- | 2 m | Lanza de inyección | Acero inoxidable de 1" Sh80 | Si |

El sistema de barrido con aire estará conformado por el mismo *pulmón de aire* utilizado en la *etapa de prueba* (disponible en planta, figura H.2) conectado a través de tuberías antes de la conexión con la *lanza de inyección de aceite*, y una electroválvula (válvula de solenoide) controlada automáticamente permitirá la activación del barrido con aire a una presión de 8 bar una vez finalizada la quema de ALU en la cámara de combustión del secador de lecho fluidizado de mineral de hierro.

Las consideraciones para la lanza de inyección de aceite y para la tobera de pulverización de aceite de este sistema serán las mismas que las tomadas para el sistema de inyección de prueba (véase punto 4.4.1.1), a menos que la experiencia obtenida en la *fase de prueba* indique lo contrario.

En el sistema también serán seis las válvulas principales (válvulas de actuación): la válvula a la salida del tanque, la que están previo a las bombas, la que habilita la inyección de ALU a la cámara de combustión, la que permite la inyección del barrido de aire y una válvula de tres vías que permitirá regular la presión y el caudal del sistema, enviando aceite a la cámara de combustión, o recirculándolo al tanque de almacenamiento. En este sistema la válvula de inyección de aceite, la de inyección de aire de barrido y la de tres vías deben ser automáticas.

La válvula de inyección de aire esta comandada por el cierre de la válvula de inyección aceite. Si esta última se cierra, inmediatamente se abrirá el suministro de aire para comenzar a purgar la cañería; esta válvula tendrá una presión de trabajo y una presión de apertura (ambas configurables), si la presión cae a un valor no permitido por el rango de trabajo entonces esta válvula se cerrara hasta alcanzar la presión de apertura y se abrirá nuevamente.

La válvula de tres vías, se maneja con una señal de 4 a 20mA, siendo un valor de 4mA posición cerrada, es decir que todo lo que llega a la misma recirculará al tanque de alimentación. Si se excita con 20mA la válvula abrirá completamente, enviando todo el caudal al horno, y en posición intermedia es una relación entre suministro y recirculación de aceite. La tubería de recirculación del aceite deberá estar en el lado del tanque opuesto a la succión de la bomba y cerca del fondo del tanque para así evitar problemas de aereación y de formación de espumas; la derivación también producirá suficiente agitación y mezclado que evitara la formación y acumulación de sólidos en el fondo del tanque. Se recomienda que la sección de tubo sumergida sea de acero inoxidable 316 cedula 10 o de dicloruro de polivinilo cedula 80, y debe estar entre 12 y 18 pulgadas del fondo del tanque (Kenneth, 1998).

La válvula de salida del tanque debe ser de acero inoxidable tipo 20 o similar, debido a que esta debe funcionar como válvula principal de corte durante el mantenimiento y parada, y en consecuencia no se pueden permitir fugas (Kenneth, 1998).

4.4.3.1. Filosofía de operación del sistema definitivo

Al colocar en marcha al sistema de inyección de aceite de la figura 4.6, sonara una alarma que durara aproximadamente 15 segundos, indicando el inicio de la corrida de quemado. Pasado ese tiempo, se encenderá la bomba seleccionada, P-1 o P-2, y el sistema a través de la válvula de tres vías V-9 comenzara a recircular aceite hasta el tanque de alimentación durante un tiempo determinado (*etapa de homogeneización y filtrado*). Una vez finalizado el tiempo de recirculación comienza la *etapa de suministro* de aceite a la cámara de combustión, en esta etapa la válvula de tres vías V-9

comienza a abrirse enviando aceite en dirección al horno, y una vez alcanzada una presión de aproximadamente 130 psi (presión de apertura) en la entrada de la cámara de combustión, se abre la válvula de inyección de aceite V-11 y de esta forma el sistema se mantiene inyectando aceite al recinto de combustión a una presión constante de 100 psi (presión de trabajo).

Para detener el suministro de aceite se apaga la bomba que este en servicio, P-1 o P-2, se cierra la válvula de inyección de aceite V-11 y automáticamente se abre la válvula de inyección de aire V-14 (el aire proviene de un pulmón de aire TK-2), purgando el aceite residual de la lanza de inyección, esta última válvula permanece abierta durante 15 minutos y se cierra automáticamente.

El sistema se deberá detener automáticamente y pasar al purgado automático con aire ante cualquiera de las siguientes situaciones: falla de alguna de las válvulas, falla de alguna de las bombas en marcha, algún filtro tapado, presión fuera de rango de trabajo, tanque de aceite vacío o falla o apagado del quemador de la cámara de combustión. El sistema también deberá ser detenido si se obstruye la apertura de la tobera de pulverización de aceite.

Si el sistema es detenido se para instantáneamente el funcionamiento de las bombas, y las válvulas que inyectan aceite se cierran aproximadamente 8 segundos después para despresurizar la cañería, pues las válvulas de 3 vías no permiten el flujo en reversa. (SIDOR, 2001).

4.4.4. Permisivos del sistema de inyección de aceite

Estos permisivos aplicaran para cualquiera de los sistemas de inyección de ALU's que se instale en la planta de secado de mineral de hierro de Orinoco Iron. Antes de poner en marcha al sistema se debe verificar:

1. La temperatura de la cámara de combustión sea la adecuada ($T > 850^{\circ}\text{C}$).
2. Que no haya falla en la bomba seleccionada para la inyección.
3. Que las válvulas intervinientes en la inyección estén en condiciones de operar y en posición normal cerrada.
4. El nivel del tanque de alimentación.

Para el buen funcionamiento del sistema y para evitar paradas a media corrida es primordial el chequeo de estos cuatro ítems y así poder dar marcha al sistema de inyección de ALU's a la cámara de combustión del secador de mineral de hierro.

4.4.5. Ubicación del sistema de inyección de ALU's

En la figura 4.7 se ilustra un croquis con la ubicación del área propuesta para la distribución de los equipos en la *fase de prueba*, y del área seleccionada para la colocación definitiva de los equipos que conforman al sistema de inyección de ALU's a las cámaras de combustión del secador de mineral de hierro de Orinoco Iron.

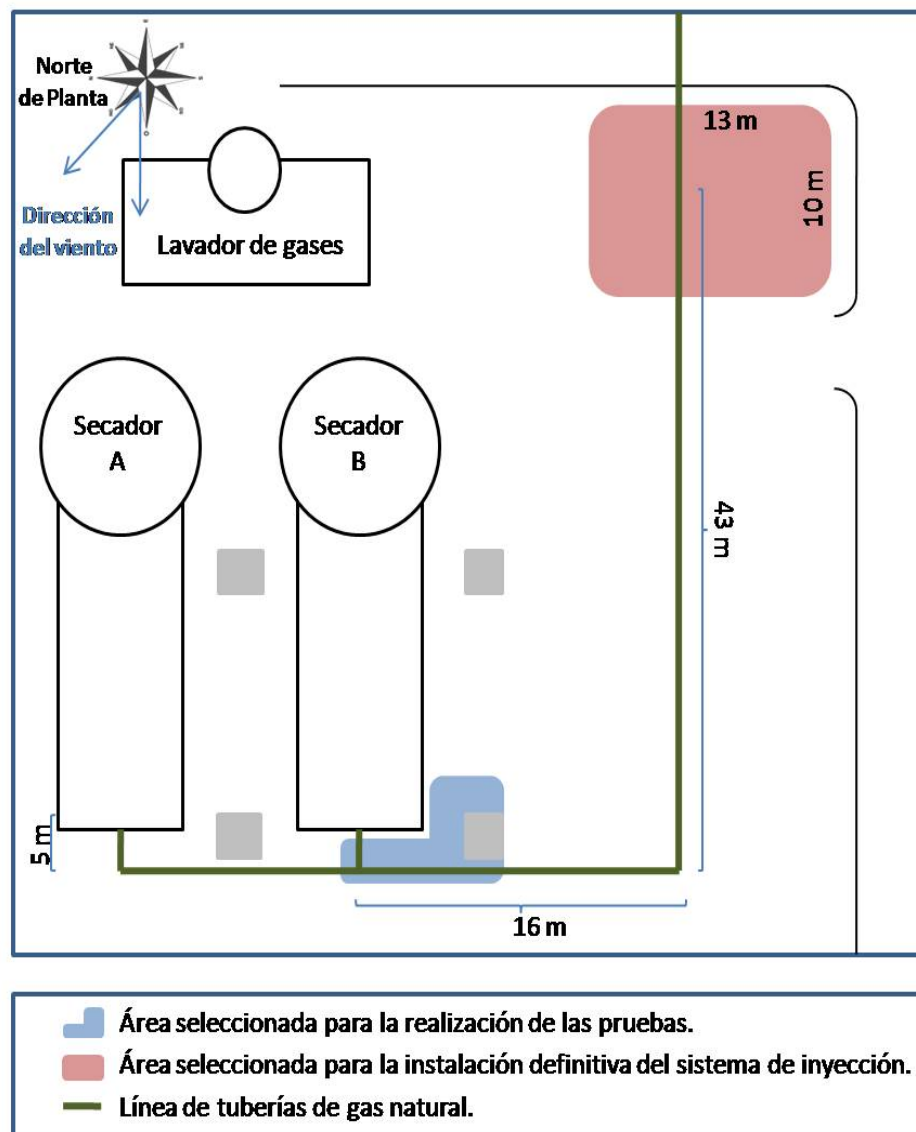


Figura 4.7. Ubicación para el sistema de inyección de ALU definitivo en su etapa de prueba.

Como puede observarse en la figura 4.7 y 4.8, para la *etapa de prueba* se escogió un área cercana a la cámara de combustión del secador B para simplificar la complejidad del sistema, acortando las longitudes de las tuberías y tener a corta distancia las diversas partes que componen al

sistema de inyección de ALU`s (tanque de alimentación, tuberías, derivación, sistema de válvulas, medidores de flujo y presión, filtro, bomba de engranaje, lanza de inyección de ALU`s con tobera de pulverización y sistema de barrido de aire).

Por otro lado la proximidad entre los equipos, sistemas y válvulas permitirá mantener una comunicación más efectiva entre el personal que opere el sistema inyección de ALU`s.

Se decidió proponer la ubicación definitiva del sistema de inyección de ALU`s al sureste del secador de mineral de hierro B (véase la figura 4.7 y 4.9) debido a los siguientes factores:

1. Tamaño: es un terreno lo suficientemente amplio como para instalar los equipos que componen el sistema de inyección de ALU`s. Existe una disponibilidad de aproximadamente 130 m², y teniendo en cuenta que el equipo más grande es el tanque de almacenamiento (3,32 m de largo y 2,4m de diámetro) podría solo requerirse una parcela de tan solo unos 49 m² (7 m de ancho por 7 de largo).
2. Accesibilidad: es una zona de fácil acceso por ser un terreno abierto y no tener estructuras a su alrededor que puedan interferir con la instalación de los equipos o con el adecuado llenado del tanque de alimentación del sistema con un camión tipo cisterna.
3. Dirección del viento: en la planta de secado, cribado y molienda del mineral de hierro de Orinoco Iron existen frecuentes emisiones de ultra finos de mineral hacia la atmosfera, proveniente de las chimeneas de los lavadores de gases que se observan en la figura 4.9 y desde diversas locaciones y equipos en la planta, por lo que la dirección del viento (en la figura 4.7 y H.4 se ilustra la dirección del viento está entre noroeste y

oeste) opuesta al sistema de inyección favorece una atmosfera más limpia para el mismo, y evitando problemas en los equipos y accesorios por acumulación excesiva de finos de mineral por entre sus partes sus partes, esto es tomado en cuenta ya que el sistema estará ubicado a la intemperie.

4. Tránsito vehicular: la instalación del sistema de inyección no influye de ninguna manera la acostumbrada vialidad que se tiene en los alrededores de la planta de secado, cribado y molienda de mineral de hierro.
5. Ampliación de la planta de secado: la locación seleccionada para la instalación de los equipos constituyentes del sistema no influye con el proyecto de adición de un tercer secador de mineral de hierro a la planta.
6. Aprovechamiento del existente soporte para de tuberías: a unos 5 metros por encima del área seleccionada para la instalación de los equipos del sistema de inyección ALU's pasa soporte para tuberías por la que pasa la tubería de gas natural que se dirige hacia los quemadores de las cámaras de combustión de los secadores de mineral de hierro, y fácilmente tal estructura podría ser aprovechada para colocar las tuberías de 1 pulgada intervinientes en el sistema de inyección, En la figura 4.8 y en la 4.9 se observa dicho soporte y la tubería de gas natural.

En la figura 4.10 se ilustra la ubicación de algunos equipos y de la disposición de las líneas de inyección de aceite y del barrido de aire, aprovechando la existencia del soporte para tuberías construido para trasladar la tubería de gas natural que alimenta a los quemadores de las cámaras de combustión de la planta de secado, justamente la misma ruta que tiene que seguir la tubería de inyección de ALU's, permitiendo ahorrar cierta cantidad de dinero por concepto de ahorro por la no construcción de algún soporte para las tuberías del sistema de inyección.

Al terreno seleccionado se le deberá realizar replanteo y nivelación para así poder construir la losa sobre la cual estarán ubicados los equipos, a dicha losa se le tendrá que tener muros de contención para retener el ALU en caso de que ocurra algún derrame y así impedir que llegue hasta los canales pluviales.

Asumiendo que la losa sea de 49m^2 , el muro de contención perimetral deberá tener una altura de 35 cm, para así poder contener cómodamente los 15.000L de aceite que estarán dentro del tanque de almacenamiento en caso de que ocurra algún derrame, ya que el volumen de contención sería 17.150L.



Figura 4.8. Ubicación seleccionada para las pruebas de inyección de ALU en la cámara de combustión del Secador B de Orinoco Iron.



Figura 4.9. Ubicación definitiva para el sistema de inyección de ALU en las cámaras de combustión de Orinoco Iron.

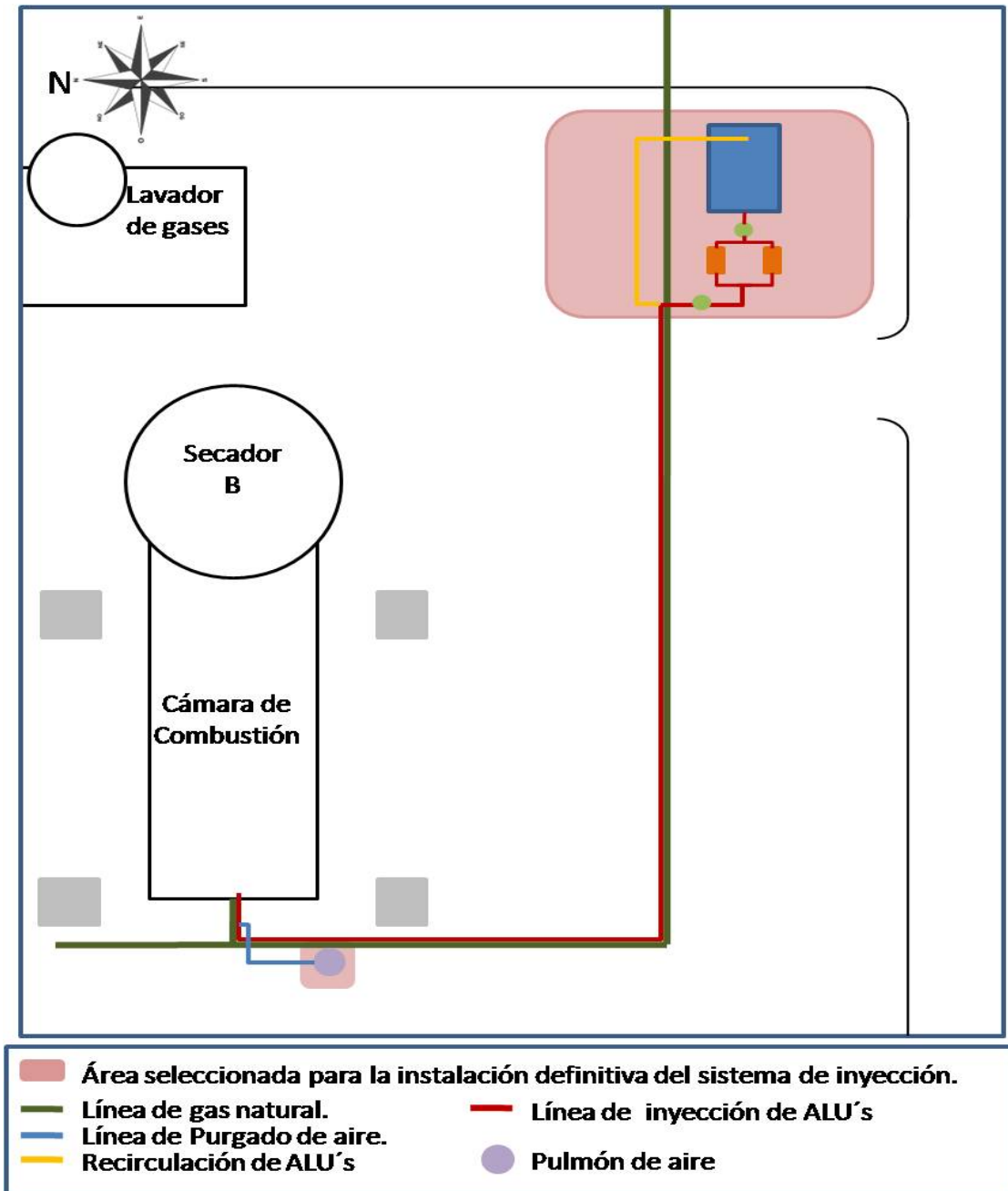


Figura 4.10. Distribución de líneas para el sistema de inyección de ALU's en la planta de secado de mineral de hierro de Orinoco Iron.

4.5. Realización del estimado de costos al sistema propuesto para el reuso de aceites lubricantes usados.

En la tabla 4.12 se encuentra tabulado el costo de cada uno de los recursos principales requeridos para la instalación del sistema de inyección de ALU's propuesto en este trabajo de grado, así como el coste total estimado para todo el sistema. No se consideraron costes de instalación de los equipos y del sistema de inyección como tal en la planta de secado de mineral, porque se asumió que el mismo personal de Orinoco Iron sería el encargado de instalar el sistema en cuestión, con la intención de abaratar el costo global del sistema de inyección de ALU.

Tanto este estudio económico como la selección de los materiales, equipos y accesorios se realizó pensando en la precaria situación económica por la cual atraviesa Orinoco Iron en estos momentos, ya que el sistema de inyección de ALU's pudiera automatizarse tanto como se quiera, pero a mayor grado de automatización mayor será la inversión a realizar, así como la complejidad y control del sistema.

El estimado de costo realizado fue de clase V (Según el manual de presupuesto de inversiones de PDVSA), por tanto la precisión esta dentro de un rango que va desde un 40 a 50% del valor estimado en la tabla 4.12.

Tabla 4.12. Estimado de costo para la losa y materiales, equipos y accesorios requeridos para la instalación del sistema de inyección de ALU's definitivo.

| Equipo, Material o accesorio | Referencia | Cantidad | Costo Unitario (Bsf) | Costo total (BsF) |
|--|-------------------|-------------------|-----------------------------|--------------------------|
| Tanque de almacenamiento | TINACA | 1 Und | 23.000 | 24.000 |
| Filtro de aceite | TINECA | 1 Und | 4.000 | 4.000 |
| Filtro de aceite | TINECA | 1 Und | 6.000 | 6.000 |
| Bomba de engranaje | HIDROBOMBAS C.A. | 2 Und | 12.320 | 24.640 |
| Tobera para la pulverización del ALU | RICA | 4 Und | 1.000 Bsf | 4.000 |
| Pulmón de Aire | -- | 1 Und | -- | -- |
| Indicadores de Presión | Orinoco Iron | 2 Und | 700 | 1.400 |
| Indicador de Presión | Orinoco Iron | 3 Und | 1.000 | 3.000 |
| Flujometro | Orinoco Iron | 1 Und | 1.000 | 1.000 |
| Válvulas de Bola de 1" | Orinoco Iron | 8 Und | 400 | 3.200 |
| Válvula Check De 1" | Orinoco Iron | 4 Und | 400 | 1.600 |
| Válvula de tres vías con flujo ajustable | Orinoco Iron | 1 Und | 2.500 | 2.500 |
| Válvula de Solenoide De 1" | Orinoco Iron | 2 Und | 1.500 | 3.000 |
| Tuberías, acero al carbón 1" Sh40 | Orinoco Iron | 80 m | 76,78 Bsf/m | 6.942,4 |
| Lanza de inyección Acero inoxidable de 1" Sh80 | Orinoco Iron | 2 m | 197,81 Bsf/m | 395,62 |
| Losa para el sistema de inyección de aceite | -- | 49 m ² | 800 Bsf/m ² | 39.200 |
| | | | | 117.935,62 |

4.6. Analisis del impacto que generaría el reuso de los aceites como combustible complementario en los secadores, desde el punto de vista técnico, económico y ambiental

4.6.1. Aspectos ambientales

4.6.1.1. Aspectos garantes de la ecoeficiencia del sistema de inyección de ALU´s

En líneas generales se estima que los niveles de afectación ambiental por concepto de la quema de aceites lubricantes residuales en la cámara de combustión del secador de mineral de hierro de Orinoco Iron, sean muy bajos debido a los siguientes aspectos:

1. La tasa de inyección: el volumen de flujo que se propone para la realización de la inyección de ALU´s dentro de la cámara de combustión es muy bajo (90 litros por hora) en comparación al flujo total de gases que se manejan en el secador de mineral de hierro de Orinoco Iron.
2. La temperatura: para garantizar el quemado ecoeficiente de los ALU´s dentro de las cámaras de combustión de los secadores de mineral de hierro, la temperatura será mantenida por encima de 850 °C y hasta un máximo de 950 °C, ya que a temperaturas mayores el tiempo de vida del refractario y de la parrilla distribuidora de gases del secador, se reduce y degenera rápidamente; manteniendo la temperatura por encima de los 850 °C se cumple con las exigencias legales del decreto 2635, que en su artículo 86 establece que la temperatura de combustión para materiales peligrosos como los ALU´s debe ser superior a 850°C si presenta alguno de las sustancias no halogenadas del anexo C.

Por otro lado, la *temperatura de combustión* de los ALU`s almacenados en Orinoco Iron está entre 228 y 246°C (tabla 4.4), temperatura que está por debajo de la temperatura exigida legalmente.

3. La turbulencia de los gases: la turbulencia es esencial para proporcionar un mezclado adecuado del ALU pulverizado con el oxígeno y asegurar que todos sus componentes alcancen la temperatura necesaria para su combustión completa; y para satisfacer la condición de ambiente turbulento adecuado, el número de Reynolds del flujo fluido en la cámara de combustión debe ser mayor de 60.000, y en la tabla 4.8 claramente se puede evidenciar que en las cámaras de combustión de los secadores de mineral de hierro de Orinoco Iron se maneja un ambiente turbulento adecuado, con número de Reynolds del flujo del fluido por el orden de los 320.000 y 360.000 (Kiely, 1999).
4. La Atomización: el grado de pulverización de un líquido a emplear como combustible juega un papel sumamente importante en su combustión, ya que de ello dependerá la eficiencia del mezclado de las gotitas de líquido con el oxígeno; por tal motivo los ALU's a inyectar en las cámaras de combustión de los secadores de Orinoco Iron se hará garantizando su grado de pulverización en la inyección, con la adquisición de la tobera de pulverización que mejor se adapte a las exigencias del proceso y que garantice la atomización adecuada.
5. Tiempo de residencia: El tiempo que requiere una micro gotita o niebla de combustible para quemarse, garantizada las exigencias de temperatura, niveles de oxígeno y turbulencia, está situado en un rango que va desde 1 a 1000 ms (milisegundos), y en las cámaras de combustión de los secadores de mineral de hierro de Orinoco Iron el tiempo de residencia está entre 780 y 680 ms a 800 y 950 °C respectivamente (véase la tabla 4.8), lo que garantiza que la niebla de ALU a inyectar dentro de la cámara de combustión permanecerá el tiempo suficiente como para que se efectúe su correcta combustión (SIDOR, 2001).
6. Niveles de oxígeno: el oxígeno es un requisito esencial para la combustión y la cantidad necesaria depende de la estequiometría de la

reacción y del aire en exceso. La relación gas-aire empleada en el proceso de combustión del secador de mineral de hierro es de 1:10. Con frecuencia se mide la cantidad de oxígeno en la chimenea de los gases de combustión, si la cantidad de oxígeno en la corriente de gases de combustión de la chimenea está entre 8 y 10%, entonces la relación gas-aire empleada en la combustión es adecuada. En las figuras I.1 e I.2 se puede observar que la cantidad de oxígeno en la corriente de gases saliente del lavador de gases de la planta de secado está entre 17 y 18,30%, lo que da a entender que la cantidad de oxígeno es más que suficiente para abastecer la combustión de los ALU's en la planta de secado de mineral (Kiely, 1998).

4.6.1.2. Eliminación del pasivo ambiental

Desde que la empresa encargada de la disposición final de los ALU's generados en Orinoco Iron y Venprecar suspendió su gratuito servicio de recolección en aras de obtener ingresos por conceptos de su servicio, los ALU's generados en las empresas mencionadas comenzaron a acumularse vertiginosamente, ya que no había maneras de darle disposición final adecuada a los aceites lubricantes, convirtiéndose en un pasivo ambiental.

Tal acumulación fue debida al alto costo que implica el servicio de recolección de ALU's (entre 0,85 y 1,25 Bs por litro) y al severo problema económico por el cual atraviesan ambas empresas. Es por ello que la unidad de ambiente de Orinoco Iron tomó la iniciativa en buscar una manera ecoeficiente en la que se pudiera dar disposición final a los ALU's en cualquiera de los múltiples procesos de combustión que se dan en las instalaciones de la empresa. En la figura D.3 se muestra la manera actual en la que se almacenan los ALU's (en tambores y unicubos ubicados en las

adyacencias del patio de hidrocarburos usados) ya que los tanques de almacenamiento de ALU's de la figura D.1 se encuentran totalmente llenos.

Para el momento de haber finalizado la pasantía, en el patio de hidrocarburos existía alrededor de unos cien mil litros de aceites almacenado entre los tanques, tambores y unicubos; y a través de la implantación del sistema de inyección de ALU's propuesto en este trabajo de grado, el inventario de aceites en el patio de hidrocarburo podrá ser reducido considerablemente entre ocho y cinco meses, realizando la quema de aceites durante 7 horas diarias con un caudal de 90 L/h, tal como se ilustra en la tabla 4.13.

Tabla 4.13. Proyección del consumo del total de ALU's acumulados en el patio de hidrocarburos usados de Orinoco Iron.

| <i>Parámetros</i> | <i>Unidad.</i> | Consumo semanal Continuo | Consumo semanal de lunes a viernes |
|---|----------------|---------------------------------|---|
| Período de Quema | (días/mes) | 30 | 20 |
| Frecuencia de Quema | (días/semana) | 7 | 5 |
| Tiempo de Quema | (hrs/día). | 7 | 7 |
| Tiempo Recirculando | (hrs/día). | 1 | 1 |
| Velocidad de Inyección | (l/h) | 90 | 90 |
| Consumo de Aceite | (l/mes) | 18.900 | 12.600 |
| | (l/año) | 226.800 | 151.200 |
| Total de ALU Almacenado en el Patio | (l) | 100.000 (**) | |
| Tiempo requerido para el Consumo de 100.000 L de ALU | (meses) | 5,3 | 7,94 |

(**)Total de ALUs almacenados en el patio de hidrocarburos usados para el 15 de marzo de 2010.

Por otro lado, la planta de secado de mineral de hierro de Orinoco Iron posee un lavador de gases venturi. para la limpieza de los gases de combustión altamente cargado de partículas solidas de que proviene del secador de mineral de hierro; este limpiador de gases a su vez representa favorece a la quema de ALU's que se propone en este trabajo de grado, ya que actuara como separador de los compuestos ácidos del gas de escape como el SO_2 y el HCL.

4.6.1.3. Contaminación por concepto de emisiones gaseosas

Como en las cámaras de combustión de planta de secado de mineral de hierro de Orinoco Iron se cumplen los aspectos (temperatura, tiempo de residencia y turbulencia) que garantizan la ecoeficiencia de la combustión de los ALU's, se espera que la contaminación atmosférica por concepto de la generación de emisiones contaminantes sea prácticamente nula, ya que las condiciones del horno propician la correcta combustion.

Otro aspecto que da indicios de que no se generaran emisiones toxicas y contaminantes debido a la quema de ALU's, es la baja concentración de metales, hidrocarburos aromáticos y compuestos clorados que los ALU's pueden llegar a contener, y que son los responsables principales de la generación de tales emisiones. En las tablas 4.6 y 4.7 se puede apreciar la poca concentración de las sustancias mencionadas en los ALU's empleados en SIDOR, se espera que la caracterización de los ALU's de Orinoco Iron este proyectada de la misma manera, lo cual es muy probable ya que las formula de los aceites lubricantes es prácticamente la misma, lo que varía en ella son los aditivos que posea, que están orientados a mejorar las cualidades lubricantes del aceite.

Las tablas I.1 e I.2 del anexo I contienen los resultados de la caracterización de emisiones realizada a los gases de combustión generados durante la quema de ALU's en el horno rotatorio de la planta de cal de SIDOR, demostrando que tal práctica no genera impactos significativos al ambiente, ya que todos los gases tóxicos generados se encuentran muy por debajo del límite exigido ambientalmente en la ley venezolana vigente.

Dicho de otro modo, los aceites usados, recuperados por SIDOR, para ser utilizados como combustible en los Hornos Rotatorios de su Planta de Cal, no presentan en su composición elementos químicos en concentraciones suficientes que puedan dar origen o servir de precursores en la formación de contaminantes secundarios a nivel de las emisiones y se espera que los ALU's de Orinoco Iron tampoco los presente (SIDOR, 2001)

4.6.1.4. Formación de dioxinas y furanos

Las dioxinas, cuyo nombre genérico es policloro dibenzo-p-dioxinas (PCDD) son el nombre con el que se conoce a un grupo de 75 compuestos formados por un núcleo básico de dos anillos de benceno unidos por dos átomos de oxígeno en el cual puede haber como sustitutos de uno a ocho átomos de cloro. Los furanos cuyo nombre genérico es policloro-dibenzofuranos (PCDF) son un grupo de 135 compuestos de estructura y efectos similares a las dioxinas y cuyas fuentes de generación son las mismas (ARCA, 2004).

Durante la quema de ALU's en las cámaras de combustión de los secadores de mineral de hierro de Orinoco Iron podrían generarse dioxinas y furanos debido a las pequeñas trazas de compuestos clorados que poseen estos aceites residuales, ya que estos desagradables compuestos tienen a

formarse durante la combustión de desechos peligrosos usados como combustible complementario en los hornos de las cementeras, y las cámaras de combustión de Orinoco Iron no están exentas de esa realidad.

Existe una “zona de riesgo de temperatura”, entre 200 y 800 °C, en donde es muy probable la formación de dioxinas halogenadas y debenzofuranos, por lo que si se mantiene una temperatura por encima de 850 °C en las cámaras de combustión, se inhibiría en gran parte la formación de las dioxinas y furanos (Kiely, 1999).

Pero para inhibir totalmente la formación de estos compuestos además se requiere que los gases de combustión estén el menor tiempo posible dentro de la “zona de riesgo de temperatura”, y sobre la parrilla distribuidora de gases del secador de mineral de hierro la temperatura de los gases de combustión desciende abruptamente desde el rango de 850 a 950 °C (temperatura de la cámara de combustión) hasta un rango de temperatura entre 90 y 130 °C (temperatura de los gases dentro del secador de lecho fluidizado), por lo que de antemano se puede asegurar que la formación de dioxinas y furanos en el proceso de combustión de los ALU's estará totalmente inhibida. Esto es debido a que el lecho de aproximadamente 0,6 m de alto ejerce el efecto de apagado de los gases de combustión empleados para secar el mineral de hierro húmedo en el secador de lecho fluidizado (Kiely, 1999).

Lo anterior en otras palabras quiere decir que el enfriamiento rápido de los gases, entre otras cosas, reducirá el tiempo de permanencia de los gases dentro de la zona crítica de temperatura que favorece la formación de dioxinas y furanos; y que además el proceso dado en el secador de mineral

de hierro favorece la no formación de estos compuestos tan peligroso (Kiely, 1999).

Las dioxinas y furanos son muy *tóxicos*, activos fisiológicamente en dosis extremadamente pequeñas; son *persistentes*, es decir no se degradan fácilmente y pueden durar años en el medio ambiente; son *bioacumulables* en los tejidos grasos de los organismos y se biomagnifican, esto significa que aumentan su concentración progresivamente a lo largo de las cadenas alimenticias (ARCA, 2004).

4.6.1.4. Cumplimiento legal ambiental de los ALU's

De acuerdo al decreto 2.635, que contiene las normas para el control de la recuperación de masteriales peligrosos y del manejo de los desechos peligrosos, los aceites lubricantes y de motor (ALUi y ALUa respectivamente) deben reunir ciertas características fisicoquímicas que le permitan su reuso como combustible, y se sabe que los ALU's de Orinoco Iron complen con las exigencias que se mencionan a continuación:

1. Los aceites lubricantes, aceites de motor pueden ser recuperados para su reuso, como combustible cuando contengan menos del 10% en volumen de pentaclorofenol, plaguicidas organoclorados o cualquiera de los solventes no halogenados indicados en la tabla 4.1, menos de 1000 ppm de los solventes halogenados que figuran en el misma tabla; menos de 50 ppm de bifenilos o terfenilos policlorados ni cualquier otra de las sustancias del Anexo C indicadas con una X que no pueda ser removida mediante algún proceso de recuperación. En las tablas 4.6 y 4.7 se puede apreciar que los ALU's tienen poca tendencia a presentar alguna de las sustancias referidas en este punto (Decreto 2635,1998).

2. Los ALU's pueden ser aprovechados como combustible, siempre y cuando tengan un valor calórico neto superior a 30 MJ/kg o una potencia térmica superior a 3 MW y no presentar contaminación por encima de los límites establecidos en el punto 1. El poder calorífico determinado para los ALU's caracterizados a Orinoco Iron está entre 44 y 45 MJ/kg (véase los resultados de la caracterización en la tabla 4.4), casi 50% por encima de lo exigido por el decreto 2635 (Decreto 2635,1998).
3. Los ALU's son considerados como material peligroso, y para incinerar desechos peligrosos que contengan sustancias orgánicas no halogenados presentes en el Anexo C, la temperatura en la cámara de combustión debe ser por lo menos de 850 °C y para desechos halogenados que contenga más de 1% de halógenos, la temperatura debe ser igual o superior a los 1100 °C (Decreto 2635,1998)., quiere decir que si los ALU's de Orinoco Iron no presentan ninguna de las características mencionadas en este punto, entonces legalmente el quemado de ALU's no tendrá restricción legal en cuanto a temperatura, pero de igual forma la temperatura de la cámara de combustión debe estar por encima de 800 °C para evitar la formación de dioxinas y furanos, recuérdese que los ALU's de Orinoco Iron presentaron punto de combustión entre 225 y 250 °C (véase la caracterización de los ALU's de la tabla 4.4).
4. El diseño y construcción del área destinada para el almacenamiento de los ALU's en Orinoco Iron, reunirá las características y la capacidad acorde al tipo y clase de riesgo, las condiciones peligrosas presentes, la cantidad a almacenar y el tiempo que permanecerá almacenado. Además el tanque de almacenamiento será impermeable y resistente al los ALU's, estará colocado en una fosa con capacidad suficiente para contener un derrame. El tanque estará identificado con su capacidad, contenido y símbolo de peligro (Decreto 2635,1998).

4.6.2. Aspectos técnicos

4.6.2.1. Integridad mecánica interna del secador de mineral de hierro

Técnicamente los secadores de mineral de hierro de Orinoco Iron presentan cualidades que propician el empleo de estos para la realización de la quema ecoeficiente de los ALU's generados en Orinoco Iron y Venprecar, se desconoce el efecto que dicha quema pueda ocasionar a la estructura interna de la cámara de combustión y a la parrilla distribuidora de gases del secador; la podría sufrir daños debido a los componentes del ALU a quemar o a los picos de temperatura que podría generar tal práctica.

Uno de los principales objetivos de la etapa de prueba del sistema de inyección de ALU's es evaluar el efecto que la quema de estos aceites como combustible complementario, al gas natural, en los secadores de mineral de hierro pueda ocasionar a la integridad mecánica del refractario de la parrilla, además determinar el impacto en la temperatura bajo la parrilla, ya que los picos de temperatura afectan tanto al refractario como a la metalurgia de los *ferrules* (estructuras metálicas dentro de la parrilla distribuidora a través de las cuales pasan los gases calientes que distribuye al secador de mineral de hierro) de la parrilla distribuidora de gases.

La temperatura bajo parrilla no puede alcanzar los 950 °C o más, por lo que si ocurre durante el proceso de inyección de ALU's, se deberá manipular alguna condición de operación que permita disminuir la temperatura, como: disminuir la cantidad de gas natural en los quemadores, o disminuir la capacidad del secador con la intención de apaciguar el calor adicional aportado por la combustión del ALU.

Debido al bajo volumen de flujo, 90 L/h, propuesto para el sistema de inyección de ALU's y a la correcta combustión del mismo dentro de la cámara de combustión, se espera un impacto no significativo a la integridad mecánica del refractario y ferrules de la parrilla distribuidora de gases, así como al refractario y estructura interna de la cámara de combustión del secador de mineral de hierro de Orinoco Iron.

4.6.2.2. Calidad del mineral de hierro seco

En la tabla 4.4 se puede observar que la tendencia a la formación de cenizas (carbón Conradson) que poseen los ALU's de Orinoco Iron es relativamente baja y por consiguiente se espera un bajo aporte de cenizas, producto de la combustión de los aceites usados en las cámaras de combustión de Orinoco Iron, y como el volumen de flujo a inyectar dentro de la cámara es muy poco, las cenizas que se generaran se consideran insignificantes respecto al producto terminado, garantizando la inalterabilidad de las propiedades del mineral de hierro seco y por ende el mantenimiento de su calidad.

Se deberá aprovechar la etapa de prueba del sistema de inyección de ALU's para certificar que no haya afectación significativa en la calidad del mineral de hierro seco que sale del secador, a través de la toma de muestras durante la quema de ALU's.

4.6.2.3. Dualidad de los quemadores

Para la introducción y adecuación de la lanza de inyección de aceites en SIDOR fue necesaria la perforación del horno rotatorio, debido a que el quemador que ello emplean no era de tipo dual, en cambio los quemadores

que se emplean en las cámaras de combustión de los secadores de mineral de hierro de Orinoco Iron si son del tipo dual, lo que representa un aspecto positivo ya que no se tendrá que perforar las cámaras de combustión para realizar la introducción del a lanza, en llugar de eso, solo se tendrá que adaptar la lanza de inyección al cuerpo del quemador más conveniente (ambos inclusive), que podría ser el numero 2 (figura H.3) porque la mirilla de inspección permite ver la llama de ese quemador y esto permitirá observar tanto el rociado como la combustión del ALU dentro de la cámara.

4.6.3. Aspectos económicos

4.6.3.1. Ahorros por reducción en el consumo de gas

Los ALU's por presentar un elevado poder calorífico (véase la tabla 4.4), superior al poder calorífico del gas natural, al emplearles como combustible complementario al gas natural en las cámaras de combustión de los secadores de mineral de hierro generaran calor suficiente como para reducir 1,104 Nm³ por cada litro de ALU inyectado; esto quedo demostrado a través de la ecuación 3.49, la cual se empleo junto a la figura 4.1 para obtener la cantidad de de gas natural que se ahorraría anualmente con la quema de ALU's cuando la planta trabaja a alta capaciad o a baja capacidad (figura 4.11).

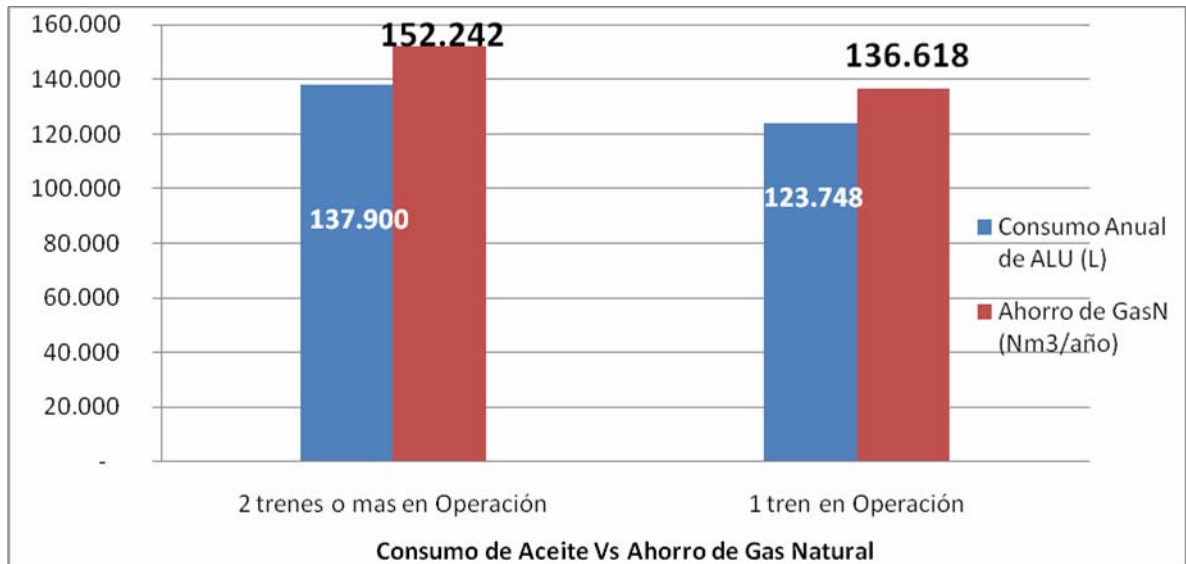


Figura 4.11. Consumo de Aceite Vs Ahorro de Gas Natural.

Anualmente, Orinoco Iron podrá ahorrarse entre 20.400 y 22.800 bolívares fuertes por realizar la quema de ALU's en las cámaras de combustión de sus secadores la mineral de hierro. Este ahorro es muy poco significativo económicamente, ya que la reducción en el consumo de gas natural es muy poco apreciable, aunque ambientalmente hablando la valorización energética de los ALU's es bastante favorable ya que en cierto modo contribuye a la eliminación de los pasivos ambientales de manera ecoeficiente (tabla 4.14).

Tabla 4.14. Estimación del ahorro monetario a generarse por la reducción en el consumo de gas natural debido al empleo de los ALU's como combustible complementario.

| | |
|--|---|
| PC ALUs (Kcal/L) | PC Gas Natural (Kcal/Nm3) |
| 9382,464 | 8500 |
| Relación Gn/Alu (Nm3/L) | |
| 1,104 | |
| Costo de Gas Natural (Bs.F/Nm3) | |
| 0,15 | |
| Ahorro anual a plena capacidad (Nm³/año) | Ahorro anual a baja capacidad (Nm³/año) |
| 152.242,6 | 136.617,8 |
| Ahorro anual a alta capacidad (Bs/año) | Ahorro anual a baja capacidad (Bs/año) |
| 22.836,4 | 20.492,7 |

El la data referente al gas natural fue otorgada por el personal de Orinoco Iron.

4.6.3.2. Ahorros en disposición final

Como ya se ha mencionado en este trabajo de grado, Ecochemical C.A, retiraba gratuitamente los ALU's del patio de hidrocarburos usados de Orinoco Iron, y le daba disposición final en su proceso productivo, pero a finales del primer trimestre del año 2009 suspendio su servicio puesto que pretendían cobrar por retirar dicho material; en el anexo K esta una copia de la cotización ralizada por ellos a Orinoco Iron en donde pretendían cobran hasta 1,45 BsF por litro de ALUa y hasta 1,15 BsF por litro de ALUi, tal como se puede apreciar en la figura 4.12 Ecochemical desglosaba el precio de su

servicio en 2 partes, el coste por transportacion y el costo por coprocesamiento del ALU (retirado del exceso de agua y solidos).

Sabiendo que los ALU's almacenados presentan cantidades de Agua y Sedimentos (tabla 4.3) muy superiores a los exigidos por *Ecochemical C.A* (anexo k) se puede asegurar que el precio para la disposición final de cada litro de aceite deberá incluir el costo por coprocesamiento (1,15 Bs por litro de ALUi y de 1,45 Bs por litro de ALUa), cosa que incrementaría el costo para la disposición final del ALU (Figura 4.12).

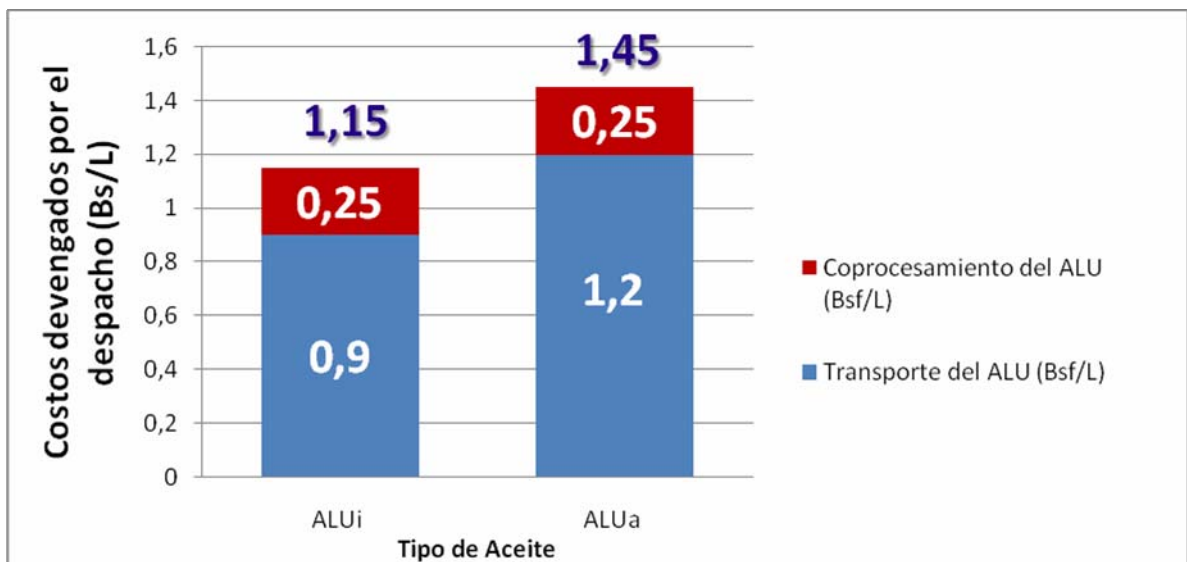


Figura 4.12. Oferta realizada por Ecochemical C.A a Orinoco Iron, por concepto de dar disposición final a sus ALU's, febrero 2010.

En la figura 4.13 se puede apreciar la cantidad total que se puede llegar a ahorrar anualmente si se le aprovecha a los ALU's como combustible en los quemadores duales de los secadores de mineral de hierro de Orinoco Iron, en vez de pagarle a una empresa para que los retire y le dé adecuada

disposición final. Es decir, que anualmente Orinoco Iron se ahorraría de esta manera entre unos 111.000 y 124.000 bolívares fuertes.

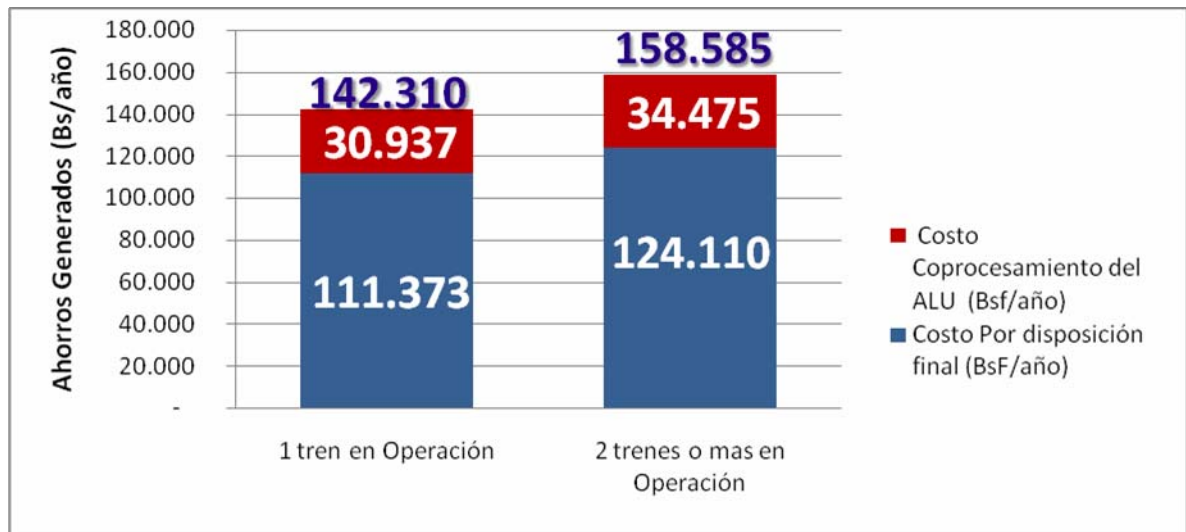


Figura 4.13. Estimado anual del ahorro por concepto del no pago a una empresa tercera certificada para dar disposición final a los ALU's

4.6.3.3. Ahorro total

Si se suma el ahorro energético con el ahorro de la disposición final con empresas terceras, generados al realizar la quema de los ALU's en la planta de secado de mineral, Orinoco Iron se ahorraría entre 165.000 y 179.000 bolívares fuertes anuales (figura 4.14), Notándose que el grueso de tales ahorros viene dado por el hecho de no tener que pagar por un servicio de recolección de ALU's a alguna empresa tercera.

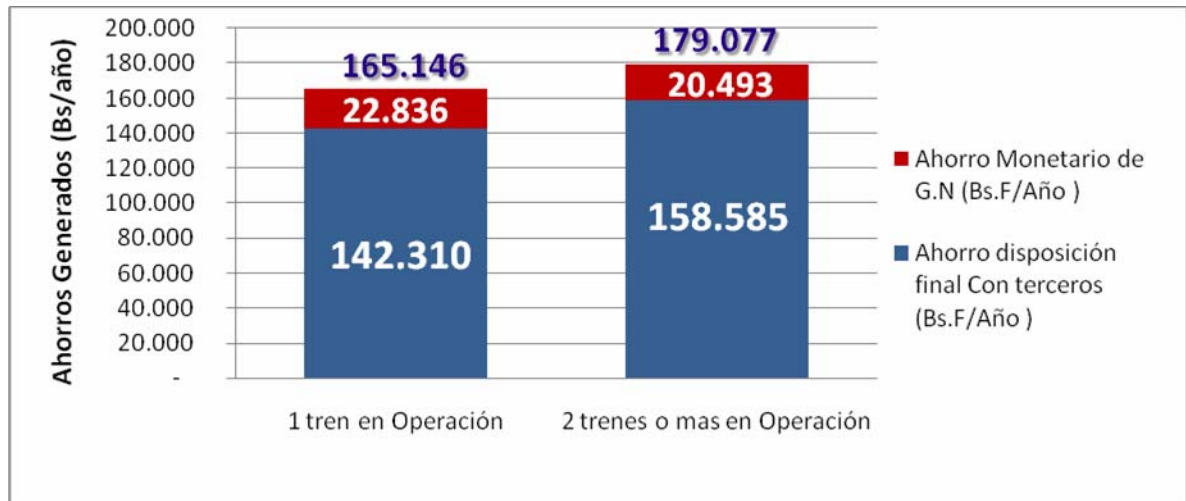


Figura 4.14. Ahorro total anual estimado a generar por concepto del aprovechamiento de los ALU's como combustible complementario.

4.6.3.4. Retorno de la inversión

Como se puede notar en la figura 4.13, Orinoco Iron se ahorraría entre 165.000 y 179.000 bolívares fuertes anuales si toma la decisión de implantar un sistema de inyección de ALU's a las cámaras de combustión del secador de mineral de hierro, y dicho sistema costaría unos 117.935,62 BsF (tabla 4.12) lo que da a entender que en aproximadamente un año se lograría recuperar la inversión realizada para la instalación del sistema de inyección de ALU's propuesto en este trabajo de grado, es decir que el sistema de inyección se pagara solo con el pasar del tiempo.

Ahora bien, se sabe que para marzo de 2010 se tenían alrededor de unos 100.000 litros de ALU's acumulados en el patio de hidrocarburos usados, que de acuerdo a la tabla 4.13 pueden ser consumidos en su totalidad entre 8 o 5,3 meses; y el consumo de tal cantidad de aceite como combustible representa un ahorro o ganancia para la empresa de 131.560

bolívares fuertes (figura 4.15), es decir, que se recobraría la inversión realizada para la instalación del sistema de inyección de ALU's en un tiempo de 8 meses cuanto mucho, y si se cumplen con los parámetros denotados en la tabla 4.12.

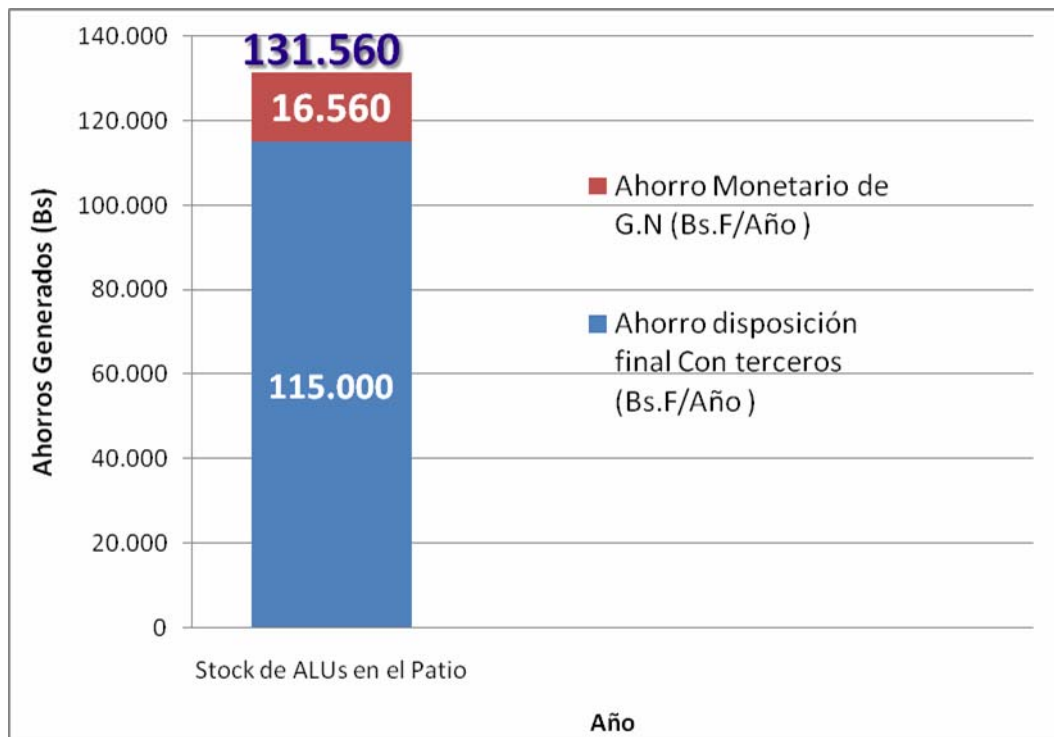


Figura 4.15. Ahorro total anual estimado a generar por concepto del aprovechamiento energético del existente inventario de ALU's de OI.

4.7. CONCLUSIONES

- ✓ Orinoco Iron y Venprecar solo se gestionan y almacenan ALUi y ALUa, anualmente generan entre 123.000 y 137.000 litros de ALU y no tienen un control eficaz en la gestión de los ALU´s que genera.
- ✓ Los ALU´s Almacenados en los tanques del patio de hidrocarburos usados de Orinoco Iron presentan contenido de agua y sedimentos muy por encima del 5 y 1% respectivamente, por tanto son inadecuados para emplearlos como combustible complementario al gas natural.
- ✓ Los ALU´s que se generan en Orinoco Iron y Venprecar presentan cualidades fisicoquímicas aptas que les permiten ser empleados como combustible complementario al gas natural en las cámaras de combustión de la planta de secado de mineral de hierro de Orinoco Iron.
- ✓ La temperatura, el tiempo de residencia y la turbulencia que ofrecen las cámaras de combustión de la planta de secado de mineral de hierro de Orinoco Iron S.C.S ofrecen valores óptimos y adecuados para realizar el quemado ecoeficiente de los aceites lubricantes usados, al emplearlos como combustible complementario al gas natural.
- ✓ El sistema de inyección de ALU´s a instalar en la planta de secado de mineral de hierro de Orinoco Iron estará compuesto básicamente de un tanque de alimentación, dos bombas de engranes, un filtro, una válvula de tres vías, pulmón de aire y la lanza de inyección con la boquilla de pulverización de aceite; que dosificará ALU a 100 psi y a razón de 90 l/h a la cámara de combustión del secador de mineral de hierro de Orinoco

Iron. El sistema será semi-automático y requerirá de un espacio físico de 49 m² al sureste de la planta de secado de mineral.

- ✓ El costo total estimado (clase V) para la instalación del sistema de inyección de ALU's, como combustible complementario, es de 117.935,62 BsF.
- ✓ El aprovechamiento de los aceites usados como combustible además de representar una solución ambientalmente favorable para su disposición final, genera una importante reducción de costos (entre 165.000 y 179.000 Bs/año) tanto por ahorro de gas natural en el proceso de secado del mineral de hierro (entre 20.400 y 22.800 Bs/año), como por concepto de la eliminación de la disposición final con empresas terceras (entre 142.300 y 158.500 Bs/año).
- ✓ La inversión a realizar por concepto de la instalación del sistema de inyección de ALU's, podrá ser recuperada en un tiempo comprendido entre 5,4 y 8 meses.

4.8. RECOMENDACIONES

- ✓ *Revisar los procedimientos de inspección y medición, y de trasegado de los ALU's en las trampas de aceite.*
- ✓ *Llevar y Mantener por debajo de 5 y 1%, respectivamente, el contenido de agua y sedimentos de los ALU's almacenados, para así evitar el taponamiento de la boquilla de pulverización y abrasión en los dispositivos del sistema de inyección.*

- ✓ *Implantar el sistema de inyección de ALU's, con las modificaciones necesarias, en la planta de secado de mineral de hierro para así poder dar correcta disposición final a los ALU's generados por Orinoco Iron y Venprecar.*

- ✓ *Asegurar que la temperatura en la cámara de combustión del secador de mineral de hierro a emplear para valorizar energéticamente a los ALU's sea, en todo momento, mayor o igual a 850°C.*

- ✓ *Certificar, con un laboratorio externo, que los ALU's de Orinoco Iron cumplen con las Normas para el Control de la Recuperación de Materiales Peligrosos y el Manejo de los Desechos Peligrosos en cuanto al Aprovechamiento como Combustible, Artículo 13, Numeral 1 y 3 contentivos en el Decreto N° 2635.*

- ✓ *Certificar, con un laboratorio externo, que las emisiones atmosféricas a obtener durante la utilización de los aceites usados como combustible complementario en las cámaras de combustión del secador de mineral de hierro de Orinoco Iron cumplen las Normas sobre Calidad del Aire y Control de la Contaminación Atmosférica establecida en el Decreto 638. Esta caracterización deberá ser realizada cuando se realicen las pruebas de quemado de ALU.*

- ✓ *Certificar que la utilización de los aceites usados como combustible complementario en las cámaras de combustión de los secadores de mineral de hierro de Orinoco Iron no afecta a la calidad del producto (mineral de hierro seco), caracterizando el mineral de hierro seco que sale del secador durante la prueba de quemado de ALU.*

- ✓ *El sistema de inyección de ALU's de prueba deberá ser aprovechado para inyectar aceites a la cámara de combustión a varios caudales y presiones, y en lo posible se deberá variar el diseño de las boquillas para determinar cuál de ellas se adapta mejor al proceso de combustión dado en la cámara de combustión del secador de mineral de hierro de Orinoco Iron.*

BIBLIOGRAFÍA

Alam, M., (2009). *Evaluación técnica, ambiental, y económica de la factibilidad de implantación de un sistema de manejo y tratamiento de materiales y desechos peligrosos en el área del complejo industrial Gran Mariscal de Ayacucho (CIGMA)*. Trabajo de grado no publicado de pregrado. Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Oriente. Barcelona, Venezuela.

Albaracin, P. (1993). *Tribología y Lubricación Industrial y Automotriz*. Tomo I. Colombia. Editorial Litochoa.

Arnawit, H. (1.998). *Estudio y Optimización del Sistema de Distribución e Inyección de Diluentes a Pozos de Crudo Pesado/Extra-Pesado que Fluyen a la Estación de Descarga Merey-20 del Campo Melones, PDVSA*. Trabajo de grado no publicado de posgrado. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Oriente, Puerto la Cruz, Venezuela.

Arner, A., Barberán, R. y Mur, J. (2006). *La política de gestión de residuos: Los aceites usados*. Extraído el 14 de noviembre de 2009 desde <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2255107&orden=118503&info=link>

Asociación para la Defensa de los Recursos Naturales de Cantabria (ARCA). (2004). *Dioxinas y Furanos*. Extraído el 2 de febrero de 2010 desde <http://www.iarca.net/pdf/dioxinasyfuranos.pdf>

Baca, G. (2008). *Evaluación de proyectos*. Quinta edición. México. Editorial Mc Graw Hill.

Blank, L. y Tarquin, A. (2002). *Ingeniería Económica*. Cuarta edición. Colombia. Editorial Mc Graw Hill interamericana, C.A.

Cabrera, D. (2006). *Los lubricantes: definiciones, usos y aplicaciones*. Primera Edición. Venezuela. Editorial Ediciones Z, C.A.

Ciria, I., (2006). *Propiedades y características de combustibles*. España. Editorial Wearcheck Ibérica. Extraído el 7 de enero de 2010 desde <http://www.fiagro.org.sv/archivos/0/997.pdf>

Orinoco Iron, Gerencia Técnica (2006). *Manual de operación del área de mineral & producto*. Puerto Ordaz, Venezuela.

Crane. (1976). *Flujo de Fluidos en Válvulas, Accesorios y Tuberías*. 15^{ta} Edición. México. Editorial McGraw Hill.

Gaceta oficial extraordinaria de la República de Venezuela N° 4.899. (1995). Decreto 638: *Normas sobre calidad del aire y control de la contaminación atmosférica*. Caracas.

Gaceta oficial extraordinaria de la República de Venezuela N° 5.245. (1998). Decreto 2.635: *Normas para el control de la recuperación de materiales peligrosos y el manejo de desechos peligrosos*. Caracas.

Gaceta oficial extraordinaria de la República de Venezuela N° 5.554. (2001). *Ley sobre sustancias, materiales y desechos peligrosos*. Caracas.

SIDOR, Gerencia General de Ingeniería y Medio Ambiente. (2001). *Acondicionamiento del sistema para la alimentación de aceites usados en planta de cal*. SIDOR. Puerto Ordaz.

SIDOR, Gerencia General de Ingeniería y Medio Ambiente. (2002). *Caracterización de los aceites usados como combustible y de las emisiones de chimenea en los hornos rotatorios de planta de cal*. Puerto Ordaz.

Hernández, E. y Hernández, J. (2002). *Recuperación de aceite lubricante usado de motores de combustión interna mediante dióxido de carbono supercrítico*. Trabajo de grado no publicado de pregrado. Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Oriente. Barcelona, Venezuela.

Inelectra, Departamento de Administración. (1992). *Estimado de Costos*. Caracas.

Kenneth, J. (1998). *Bombas, selección, uso y mantenimiento*. México. Editorial McGraw-Hill.

Kiely, G. (1999). *Ingeniería ambiental: fundamentos, entornos y sistemas de gestión*. Volumen III. Madrid. Editorial Mac Graw Hill.

Universidad Nacional Experimental del Tachira, Laboratorio de Termofluidos. (2004). *Práctica N° 2: Bomba Calorimetrica*. San Cristobal. Extraido el 24 de enero desde <http://www.unet.edu.ve/~rarevalo/Documentos/BOMBA%20CALORIMETRIC A.doc>

Marcano, E. (2009). *Evaluación del comportamiento del líquido de la cascara de la nuez del merey (LCM) en el proceso de dilución del crudo pesado extraído del campo Dobokubi, pozo MDF 3, Distrito San Tomé, PDVSA*. Trabajo de Grado no publicado de pregrado. Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Oriente. Barcelona, Venezuela.

Martínez, J. (2005a). *Guía para la gestión integral de Residuos peligrosos*. Tomo I. Uruguay. Editorial Red de Centros. Extraído el 2 de octubre de 2009 desde http://www.basel.int/centers/proj_activ/stp_projects/08-02.pdf

Martínez, J. (2005b). *Guía para la gestión integral de Residuos peligrosos*. Tomo II. Uruguay. Editorial Red de Centros. Extraído el 2 de octubre de 2009 desde http://www.basel.int/centers/proj_activ/stp_projects/08-03.pdf

Núñez, M. (2006). "Aceite usado generado por motores en la ciudad de Cali. Alternativas de uso". Artículo técnico. Extraído el 3 de octubre de 2009 desde <http://www.ingenieroambiental.com/4014/motores.pdf>

Observatorio de la deuda en la globalización. (2002). *Colectivo para a difusión de la Deuda Ecológica*. Extraído el 2 de octubre de 2009 desde http://www.odg.cat/documents/enprofunditat/Deute_ecologic/CDdeudaecoenergia/deudaecologica/3_pasivos_cast.pdf

[Paz, R.](#), [Zabala, G.](#), [Serrano, C.](#), [Carlozama, J.](#), [Vera, J.](#), [Auhing, L.](#) [Manzano, I.](#), [Ojeda, K.](#), [Manzano, I.](#), [Bravo, J.](#) y [Namara, S.](#), (2006). *Factibilidad del manejo ambientalmente correcto (MAC) de los residuos aceitosos en Guayaquil*. trabajo de ascenso no publicado, Escuela Superior Politecnica del Litoral. Guayaquil, Ecuador. Extraído el 2 de octubre de 2009 desde http://www.basel.int/centers/proj_activ/tctf_projects/019.pdf

PDVSA, MDP-02-FF-03 (1996). *Manual de Diseño de Proceso, Flujo de Fluidos, Flujo en Fase Líquida*. San Tomé. Venezuela.

PDVSA, MDP-02-P-02 (1997). *Manual de Diseño de Proceso, Bombas, Principios Básicos*. San Tomé, Venezuela.

PDVSA GAS, Boletín técnico N°4 (2004). *Suministro Alterno*. Venezuela.

Perez, D. (1965). *Lubricantes, su Selección y Empleo*. Mexico. Ediciones CEAC.

Perry, R. (1.997). *Manual del Ingeniero Químico*. Sexta Edición. México. Editorial McGraw-Hill.

Peters, M. y Timmerhaus, K. (1993). *Plant Desing and Economics for Chemical Engineers*. Cuarta edición. Mexico. Editirial McGraw-Hill, C.A.

Real Time Service S.A., Honeywell. (1999). *Process History Database*. Extraído el 4 de febrero de 2010 desde <http://www.realtimeservice.com.ar/sp/desarrollos/productos/honeywell/phd.htm>

Rivera, J. (2006). *Estudio de factibilidad técnico-económica para la adquisición de equipo reciclador de aceites residuales provenientes de los procesos productivos de la empresa Orinoco Iron*. Trabajo de grado no publicado de pregrado, Universidad Santiago Mariño. Puerto Ordaz.

Universidad de Los Andes, Laboratorio FIRP. (1.992). *Cuaderno FIRP 520: Introducción a la Reología*. Mérida, Venezuela.

Textos Científicos. (2006). *Tecnología de los combustibles*. Extraído el 10 de enero de 2010 desde <http://www.textoscientificos.com/energia/combustibles/liquidos>

Universidad de Antioquia, Laboratorio de Física. (2003). *Practica 3: Densidad de líquidos*. <http://docencia.udea.edu.co/cen/tecnicaslabquimico/02practicass/practica03.htm>

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

| | |
|------------------|--|
| TÍTULO | Evaluación técnica, económica y ambiental de un sistema para el reuso de aceites lubricantes como combustible alternativo en los secadores de mineral de hierro de orinoco iron S.C.S. |
| SUBTÍTULO | |

AUTOR (ES):

| APELLIDOS Y NOMBRES | CÓDIGO CULAC/ E MAIL |
|--|--|
| Delgado Mitrano, Carlos Alberto | CVLAC: V- 18.885.014 E MAIL: cdelgado87@gmail.com |
| | CVLAC: E MAIL: |
| | CVLAC: E MAIL: |
| | CVLAC: E MAIL: |

PALABRAS O FRASES CLAVES:

| |
|----------------------------|
| Evaluación |
| Aceite lubricante usado |
| Combustible complementario |
| Valorización energetica |
| Reuso |
| Ingeniería ambiental |

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

| ÁREA | SUBÁREA |
|---------------------------------|--------------------|
| Ingeniería y Ciencias Aplicadas | Ingeniería Química |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |

RESUMEN (ABSTRACT):

Los aceites lubricantes usados (ALU's) son un residuo peligroso cuya gestión inadecuada puede provocar graves daños al medio ambiente, por ello se evaluó la factibilidad técnica, económica y ambiental de un sistema para el reuso de los aceites, que se generan en Orinoco Iron y Venprecar, como combustible complementario al gas natural que alimenta las cámaras de combustión de la planta de secado de mineral de hierro de Orinoco Iron. Para ello, se revisó y determinó el tipo, cantidad y gestión que la empresa le da a los ALU's que generan, también se hizo la caracterización de sus propiedades fisicoquímicas. Se realizó la conceptualización de dos sistemas de inyección de aceite, uno preliminar y otro definitivo, ubicando estratégicamente cada uno de sus componentes dentro de la planta de secado de mineral de hierro de Orinoco Iron, y se realizó un estimado de costo tipo III para el sistema de inyección de ALU's definitivo; por último se analizaron aspectos técnicos, económicos y ambientales inherentes a la implantación y puesta en marcha del sistema de inyección. Entre los resultados más destacados se encontró que los ALU's poseen propiedades fisicoquímicas que lo hacen un combustible de mejor calidad que el *fuel oil* y otros combustibles pesados, además en su combustión generan emisiones más amigables con el medio ambiente; por otro lado, entre Orinoco Iron y Venprecar se generan anualmente alrededor de 123 y 137 m³ de ALU's, y su reuso como combustible complementario devengará ahorros entre 165.000 y 179.000 BsF por año, lo que le permitirá a Orinoco Iron obtener el retorno de la inversión (117.935,62 BsF ± 20%) en menos de 9 meses; también se demostró que las cámaras de combustión del secador de mineral de hierro garantizan que el tiempo de residencia, la turbulencia y la temperatura de los gases en su interior tengan valores óptimos para propiciar la eficiente combustión del ALU. Por todo lo anteriormente mencionado, quedó demostrado que es factible técnica, económica y ambientalmente, la implantación de un sistema para el reuso de los ALU's como combustible complementario al gas natural en las cámaras de combustión del proceso de secado de mineral de hierro de Orinoco Iron.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

CONTRIBUIDORES:

| APELLIDOS Y NOMBRES | ROL/ CÓDIGO CVLAC/ E_MAIL | | | | |
|----------------------------|----------------------------------|--------------------------|-------------|-------------|-------------|
| | ROL | CA | AS X | TU | JU |
| Shirley Marfisi | CVLAC: | 10.301.828 | | | |
| | E_MAIL | Shirleymarfisi@yahoo.com | | | |
| | E_MAIL | | | | |
| | E_MAIL | | | | |
| Jose Luis Navas | ROL | CA | AS | TU X | JU |
| | CVLAC: | 12.351.454 | | | |
| | E_MAIL | jnavas@venprecar.com | | | |
| | E_MAIL | luisnavasr@hotmail.com | | | |
| Ochoa Osvaldo | ROL | CA | AS | TU | JU X |
| | CVLAC: | 3.995.379 | | | |
| | E_MAIL | | | | |
| | E_MAIL | | | | |
| Luis Moreno | ROL | CA | AS | TU | JU X |
| | CVLAC: | 8.987972 | | | |
| | E_MAIL | | | | |
| | E_MAIL | | | | |

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

| | | |
|-------------|------------|------------|
| 2011 | 08 | 03 |
| AÑO | MES | DÍA |

LENGUAJE. SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ARCHIVO (S):

| NOMBRE DE ARCHIVO | TIPO MIME |
|---|----------------------|
| Trabajo de Grado –CaDm- 5 Metadatos.doc | Application / msword |
| | |

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z. 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9.

ALCANCE

ESPACIAL: Planta de secado de mineral de hierro/ Orinoco Iron S.C.S (OPCIONAL)

TEMPORAL: 8 meses (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero Químico

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pregrado

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de Ingeniería Química

INSTITUCIÓN:

Universidad de Oriente. Núcleo Anzoátegui

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

DERECHOS

Los trabajos de grado son de propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, el cual lo participará al Consejo Universitario.

**Carlos Delgado
AUTOR**

AUTOR

AUTOR

**Shirley Marfisi
TUTOR**

**Oswaldo Ochoa
JURADO**

**Luis Moreno
JURADO**

**Yraima Salas
POR LA SUBCOMISIÓN DE TESIS**