



T R A B A J O D E D I P L O M A

E n o p c i ó n a l T í t u l o d e I n g e n i e r o M e c á n i c o

**T í t u l o : I m p l e m e n t a c i ó n d e u n s i s t e m a d e
c o p r o c e s a m i e n t o u t i l i z a n d o a c e i t e d e d e s e c h o e n l a
f á b r i c a C e m e n t o s C i e n f u e g o s S . A .**

A u t o r : R e i n a l d o P é r e z B o r g e s

T u t o r e s : I n g . G e n n i e r L u i s C o n y e d o C u e t o

M S c . I n g . J o s é L u i s R o m e r o C a b r e r a .

C I E N F U E G O S J U N I O D E 2 0 1 8

" A Ñ O 6 0 D E L A R E V O L U C I Ó N "

DECLARATORIA DE AUTORIDAD



Sistema de Documentación y Proyecto. Hago constar que el presente trabajo fue realizado en la Universidad de Cienfuegos Carlos Rafael Rodríguez como parte de la culminación de los estudios en la especialidad de Ingeniería Mecánica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Universidad de Cienfuegos para los fines que estime conveniente, ya sea parcial o totalmente, que además no podrá ser presentado sin la aprobación de la Universidad de Cienfuegos.

Firma del autor.

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido según acuerdo de la dirección del centro y el mismo cumple los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura, referido a la temática señalada.

Información Científico Técnico.

Nombre y Apellidos. Firma.

Vice Decano.

Nombre y Apellidos. Firma.

Firma del Tutor.

Nombre y Apellidos. Firma.

Sistema de Documentación y Proyecto.

Nombre y Apellidos. Firma.

Cienfuegos, 1 de Julio de 2018.

Dr.

Facultad de Ingeniería Mecánica.

Decano.

Asunto: Aval del Tutor al Trabajo de Diploma "Implementación de un sistema de coprocesamiento utilizando aceite de desecho en la fábrica Cementos Cienfuegos S.A." del estudiante **Reinaldo Pérez Borges**.

Por el presente pongo en su conocimiento que el trabajo de referencia ha sido revisado y cumple con los requisitos exigidos en cuanto a la forma de elaboración del documento.

El mismo cumple también los objetivos planificados y es adecuada la fundamentación científica de su contenido para la presentación y defensa ante el tribunal indicado por la Facultad de Ingeniería Mecánica.

Al tanto de sus indicaciones, queda,

Atentamente.

Tutor: Dr.

A g r a d e c i m i e n t o s :

A m i f a m i l i a p o r e s t a r s i e m p r e p e n d i e n t e d e m í , e n e s p e c i a l a m i s p a d r e s .

A m i s t u t o r e s : G e n n i e r L u i s C o n y e d o C u e t o y J o s é L u i s R o m e r o C a b r e r a , g r a c i a s p o r s u e s m e r a d a d e d i c a c i ó n , e n t r e g a y p a c i e n c i a p a r a c o n m i g o .

A l o s p r o f e s o r e s q u e t a n t o a p o r t a r o n a m i f o r m a c i ó n c o m o p r o f e s i o n a l , a l o s q u e d e d i c a r o n t i e m p o a m i p e r s o n a , a l o s q u e c o n f i a r o n e n m í , a l o s q u e d i e r o n s u e j e m p l o , a l q u e s i n d a r s e c u e n t a m e h i z o m á s f u e r t e .

A m i g r u p o d e e s t o s c i n c o a ñ o s ; s i n o f u é r a m o s t a n u n i d o s q u i z á s h u b i é r a m o s s i d o m e n o s l o s q u e l l e g a r í a m o s a l f i n a l d e e s t a e t a p a .

A m i s a m i g o s y a t o d o s l a s p e r s o n a s q u e n o o l v i d a r é y q u e s i g n i f i c a r o n m u c h o e n m i v i d a c o m o u n i v e r s i t a r i o . A t o d o s .

¡M u c h a s G r a c i a s !

D e d i c a t o r i a :

A mis padres, por ser las persona más importantes en mi vida, han hecho de mi la persona que hoy soy.

A todos los que de una forma u otra me han brindado su apoyo, respeto y cariño.

R e s u m e n

La presente investigación se realizó en La Empresa Mixta "Cementos Cienfuegos S.A", con el objetivo general de mejorar la eficiencia del proceso de producción de clinker mediante la implementación de un sistema de coprocesamiento, con la sustitución parcial del petcoke como combustible principal por aceite de desecho que se obtiene en diversas empresas de la provincia, como resultado de su uso en distintos procesos de explotación. Se aprovecha el alto valor calórico de los aceites usados para disminuir el uso de los combustibles fósiles (petcoke) que se requieren para producir el clinker, es decir que el desecho se convierte en un combustible alternativo, disminuyen los costos de producción del clinker y los costos asociados a la eliminación del mismo. Para ello se diseñó un sistema de bombeo que permite suministrar los aceites usados al horno, y se demuestra el potencial de ahorro de combustible, con el logro de una mayor factibilidad económica.

Palabras claves: clinker, petcoke, combustibles fósiles, desechos, coprocesamiento.

Abstract

This investigation was carried out the Mixed Enterprise "Cements Cienfuegos S.A" with the realistic general of improving the efficiency of the clinker production process using a coprocessing system by means of the partial substitution of petcoke as the main fuel for waste oil that is obtained in the diverse companies of the province as a result of its use in different processes of exploitation. In the case of the used oils it's also advantageous their high caloric value, to diminish the use of the fossil fuels (petcoke) that are required to produce the clinker, that is to say that the waste becomes an alternative fuel, diminishing the costs of production of the clinker and eliminating a waste avoiding the associated costs to the processing required for its elimination. The results obtained in energy and fuel savings will be presented demonstrating their economic feasibility.

Keywords: clinker, petcoke, fossil fuels, wastes, coprocessing.

Contenido

Introducción 1

Capítulo I. Revisión bibliográfica 4

 1.1. Introducción al capítulo 4

 1.2. Importancia del coprocesamiento 4

 1.3. Ventajas del coprocesamiento 5

 1.4. Principios del Coprocesamiento 6

 1.5. Regulaciones del coprocesamiento 8

 1.6. Uso de aceites usados como combustible alternativo 9

 1.7. Sistemas de bombeo 12

 1.7.1. Bombas 12

 1.7.2. Criterios para la selección de equipos de bombeo 14

 1.7.3. Efectos de la viscosidad en bombas centrífugas 15

 1.8. Accesorios 16

 1.9. Métodos de transferencia de calor 18

 1.10. Conclusiones del capítulo 19

Capítulo II. Caracterización del proceso y los combustibles 20

 2.1. Introducción al Capítulo 20

 2.2. Características del aceite usado 21

 2.3. Descripción del sistema de bombeo propuesto 22

 2.4. Metodología de selección de bomba 24

 2.4.1. Velocidad del fluido 24

 2.4.2. Ecuación de Bernoulli 25

 2.4.3. Cálculo del número de Reynolds 26

 2.4.4. Regímenes de corriente 27

 2.4.5. Pérdidas del sistema 27

 2.4.5.1. Pérdidas de tramo recto o pérdidas de carga por fricción 27

 2.4.5.2. Pérdidas en accesorios o pérdidas locales 30

 2.4.6. Trazado de la característica hidráulica del sistema de tubería 30

 2.4.7. Comprobación de la selección del equipo basándose en la cavitación 31

 2.4.8. Determinación de la potencia necesaria para el bombeo 33

 2.5. Conclusiones del Capítulo 33

Capítulo 3 34

 3.1. Introducción al capítulo 34

 3.2. Selección de los equipos 34

 3.2.1. Sistema de trasiego 34

 3.2.2. Sistema de suministro 37

 3.2.3. Recirculación 40

 3.2.4. Calentadores eléctricos 43

 3.3. Cavitación 45

 3.4. Potencia requerida 46

 3.5. Análisis de ahorro de combustible 46

 3.6. Costos de inversión de la instalación 47

 3.7. Impacto Medioambiental 48

3.7.1. Resultados de ensayos de incineración recientes 49

3.8. Conclusiones del Capítulo 50

Conclusiones. 51

Recomendaciones. 52

Bibliografía 53

Anexos 55

Introducción

El mundo viene enfrentando desde hace varias décadas el problema del efecto invernadero debido en lo fundamental a la emisión de gases contaminantes que contribuyen a acentuar dicho problema. Es por ello que se impone un uso eficiente de los combustibles fósiles, el uso de fuentes renovables y el cuidado y manejo seguro de los residuos peligrosos.

Durante el proceso de fabricación de cemento se requiere de una cantidad importante de recursos naturales no renovables, como petróleo crudo, petcoke y otros, lo que genera un alto consumo energético y se expulsan importantes cantidades de CO_2 a la atmósfera con el consecuente aporte al deterioro del medio ambiente.

En el mundo esta situación se resuelve a través de la tecnología de coprocesamiento. Desde sus orígenes en los años 70, esta se considera internacionalmente como un servicio ambiental que genera muchas ventajas tanto al generador de los residuos como al coprocesador. Esta tecnología consiste en la utilización de desechos de las industrias, ya sean desechos sólidos, líquidos o peligrosos como combustibles alternativos.

Las plantas de incineración modernas y los confinamientos seguros, son opciones comunes para la disposición de residuos en los países pertenecientes a la OCDE (Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos). Se han usado con éxito diferentes tipos de residuos como AFR (combustibles y materias primas alternativos) en hornos rotatorios de cemento o plantas similares en Europa, Japón, Estados Unidos, Canadá y Australia. Desde principios de la década de los ochenta los países industrializados han tenido más de 20 años de experiencias positivas con los AFR.

El coprocesamiento de residuos peligrosos en la producción de cemento se ha reconocido como un método de eliminación saludable para el ambiente en importantes tratados ambientales internacionales, tales como los convenios de Estocolmo y Basilea. Esta manera de procesar los desechos, forma parte de la jerarquía de gestión de residuos donde la prevención es la solución ideal. El coprocesamiento, dentro de esta jerarquía se prioriza sobre otras formas de gestión de desechos como la incineración, el relleno controlado y el pretratamiento físico-químico.

Aunque la producción de cemento en Cuba tiene más de cien años existe muy poca experiencia en el coprocesamiento de desechos en hornos cementeros. En Cemento Curazao S.A. (Mariel) se presentó en un Fórum la propuesta para eliminar aceites usados en sus hornos, básicamente se refiere al cálculo energético, no especifica cómo hacerlo desde el punto de vista técnico y

ambiental, así como las necesidades y diseño de la instalación requerida para recepcionar, almacenar, mezclar y alimentar los aceites usados al horno.

No existen en la bibliografía, elementos que demuestren que durante todo este período de tiempo se revalorizara energéticamente como combustible, algún desecho en la industria cubana del cemento pues si bien se han utilizado los hornos de cemento para contribuir a la destrucción de desechos a petición del gobierno o como respuesta a la demanda local, incluso desechos peligrosos, el contenido de energía o mineral útil en ellos ha sido bajo o nulo.

Es por ello que en la fábrica Cementos Cienfuegos S.A se propone como solución posible, el coprocesamiento de residuos. Un horno rotatorio de cemento eficiente puede proporcionar una opción de tratamiento/recuperación rentable y segura en términos ambientales para varios residuos. La fábrica suscribió un acuerdo con la Empresa Cuba Petróleo (CUPET) para recibir los aceites usados que se producen en la provincia provenientes de diferentes ramas de la industria y el sector automotriz, para su uso como un combustible alternativo.

Si bien la fábrica cuenta con un horno que de acuerdo con sus características puede utilizar dichos aceites como combustible, no cuenta con un sistema para trasladar y suministrar dicho aceite desde los tanques del área de recepción al horno. Por todo lo expresado con anterioridad es que surge la necesidad de investigar una vía factible para suministrar los aceites al horno, logrando evitar efectos dañinos al medio ambiente y producir resultados favorables a la economía del país por el ahorro que representa.

Problema científico:

¿Cómo trasladar y suministrar los aceites usados, al horno de cemento desde el área de recepción en la fábrica Cementos Cienfuegos SA, sin ocasionar afectaciones al medio?

Hipótesis:

Mediante el diseño de un sistema de bombeo se podrán aprovechar los aceites usados como un combustible alternativo, lo que permitirá la eliminación de los mismos de forma segura y disminuirán los costos del proceso de producción del cemento.

Objetivo General:

Desarrollar un proyecto para el estudio de factibilidad técnica-económica y ambiental del coprocesamiento de aceite usados, como combustible alternativo en Cementos Cienfuegos S.A.

Objetivos Específicos:

- Diseñar un sistema de bombeo que garantice el suministro de los aceites usados al horno para su utilización como combustible alternativo.
- Estudiar la factibilidad económica de la aplicación del coprocesamiento en Cementos Cienfuegos S.A.
- Demostrar que la utilización del aceite, como combustible alternativo en el horno de cemento, no ocasiona un problema ambiental.

Tareas de investigación

- Realización de una búsqueda de información actualizada referida a métodos y técnicas aplicadas en el coprocesamiento de desechos peligrosos.
- Elaboración del proyecto de sistema de bombeo para el suministro de los aceites usados al horno.
- Evaluar el impacto energético y económico que tendría la implementación del sistema de coprocesamiento.
- Procesamiento y validación de los resultados con la elaboración del informe final.

Capítulo I. Revisión bibliográfica

1.1. Introducción al capítulo.

La producción mundial de cemento ha crecido constantemente en los últimos años, y se prevé que esta tendencia continuará. Una parte considerable de la producción se realiza en procesos secos (UNEP, 2011).

En la fábrica de Cementos Cienfuegos S.A, perteneciente al Ministerio de la Construcción, cuyo objeto social es producir y comercializar materias como clinker y cemento al mercado nacional e internacional; las emisiones de contaminantes de efecto invernadero y el calentamiento global, el uso eficiente de combustibles fósiles no renovables, los residuos peligrosos y la contaminación del agua y el suelo, son algunas de las principales preocupaciones en materia ambiental de la empresa. La competitividad en los costos, la competencia global y la rentabilidad son otras de las preocupaciones de dicha empresa. El reto que enfrenta la sociedad actual es equilibrar la protección ambiental y el interés económico.

Una opción probada y una posible solución es el coprocesamiento de residuos en la industria cementera. Un horno rotatorio de cemento eficiente puede proporcionar una opción de tratamiento/recuperación rentable y segura en términos ambientales para varios residuos. Los aceites usados que se obtienen como residuos de los procesos industriales y del sector automotriz pueden utilizarse como combustible alternativo que sustituya en gran medida, los combustibles convencionales como el petcoke y el diésel, en dicho horno (Kääntee, Zevenhoven, Backman y Hupa, 2002). Para ello se necesita un sistema de bombeo que traslade y suministre, los aceites usados a la planta de dosificación, la cual se encarga de suministrarlos al horno. Dicho sistema debe prevenir derrames y filtraciones, así como contar con un sistema de filtrado que asegure la calidad del aceite suministrado.

En este capítulo se ofrecen los elementos fundamentales que conforman las bases del coprocesamiento y las líneas generales que regulan su aplicación, se caracterizan los aceites usados y los sistemas de bombeo empleados.

1.2. Importancia del coprocesamiento.

El coprocesamiento, en general, consiste en el uso de residuos como materia prima o fuente de energía en procesos industriales, para el reemplazo de recursos naturales no renovables, como minerales y combustibles fósiles, tales como carbón, petróleo o gas natural (UNEP, 2011). Podemos afirmar que el coprocesamiento convierte los residuos en recursos.

En particular aplicado a una fábrica cementera, sería la destrucción de residuos industriales, en nuestro caso aceites usados, en los hornos de cemento, aprovechando las altas temperaturas requeridas para la producción del cemento, en condiciones de máxima seguridad y control.

La industria del cemento puede utilizar varios tipos de desechos como combustible, además de los combustibles convencionales. En la industria del cemento europea el consumo de desechos como combustible asciende a 6 millones de toneladas, lo que corresponde a una tasa de sustitución térmica de 18% (CEMBUREAU, 2004). El uso de los hornos de cemento para la destrucción de desechos ha llevado a desarrollar el concepto de coprocesamiento, este proceso nace en Europa en la década del 70 y es hoy una práctica mundialmente generalizada.

La utilización como combustible de los aceites de desechos sin tratar, es una opción que se utiliza desde hace años en diversos países, en sustitución de los aceites vírgenes que se emplean como sucedáneos del combustible. Esta alternativa es especialmente favorable cuando se efectúa en los hornos de clinker, u otros similares donde se alcancen temperaturas superiores a 800 °C, pues las altas temperaturas contribuyen a minimizar los riesgos de contaminación (Murray y Price, 2008).

En Cuba, en la fábrica de cemento de Siguaney, se han utilizado sus instalaciones para la quema de sustancias peligrosas como lodos y aceites usados provenientes de las ramas automotriz e industrial, como parte de la estrategia cubana para eliminar racionalmente este tipo de sustancias, catalogadas como peligrosas para el medioambiente por convenciones internacionales. Igualmente, la fábrica de cemento Siguaney fue el destino final para los gases refrigerantes extraídos y almacenados a propósito del programa de reemplazo masivo de refrigeradores y aires acondicionados, llevado a cabo años atrás en todo el país. Además, se pudo conocer que en Cementos Siguaney en los años 90 se realizó una prueba de incineración de cáscara de arroz, de la cual no existe resultado escrito (Reyes Martínez, 2010).

1.3. Ventajas del coprocesamiento sobre otros métodos de eliminación de residuos peligrosos.

Estudios de evaluación demuestran que el coprocesamiento ofrece un mejor desempeño ambiental que el confinamiento o la incineración. Entre sus múltiples ventajas de acuerdo con (UNEP, 2011) están:

- Incorpora por completo los materiales de desecho a través de altas temperaturas, exceso de oxígeno y alto tiempo de permanencia
- Evita la formación de dioxinas y furanos debido al perfil específico de temperatura.
- No deja remanentes que deban confinarse, porque la ceniza reacciona con otros componentes para dar forma al producto final.
- Reduce la contaminación ambiental, al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, ya que los residuos se usan para remplazar combustibles fósiles.
- Preserva los combustibles y recursos naturales no renovables al recuperar la energía y el valor mineral de los materiales de desecho, es decir,

economiza material que antes era extraído de la naturaleza como combustible fósil y recurso mineral.

- Es fuente alternativa de energía.
- Facilita a la sociedad una herramienta complementaria para la gestión de sus residuos. Elimina técnica y ambientalmente los residuos industriales de forma segura.
- Evita el depósito de residuos en vertederos.
- Reduce las inversiones necesarias pues aprovecha instalaciones existentes, como las fábricas de cemento.
- Reduce el impacto en la salud y el medio ambiente.
- Reduce los costos en el manejo de residuos, con lo que mejora la competitividad del sector industrial.
- Al ser las condiciones operativas sumamente controladas, es una forma segura de gestión de residuos, que recupera el contenido de energía y minerales de los residuos para su uso como combustible y material en procesos de fabricación.

1.4. Principios del Coprocesamiento.

A nivel internacional para promover el coprocesamiento de residuos en los hornos rotatorios de cemento, los grupos empresariales Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GmbH (GTZ) y Holcim Group Support LTD (Holcim) han formado una alianza estratégica creando entre ellos una guía de normas y pautas internacionalmente reconocidas (GTZ-Holcim, 2006).

Holcim Group Support LTD (Holcim) es un proveedor de cemento y agregados líder en el mundo, así como de actividades de valor agregado, como concreto y asfalto premezclado, incluyendo servicios. Recientemente la fábrica Cementos Cienfuegos S.A, se ha integrado a este grupo. GTZ es una empresa de cooperación internacional para el desarrollo sostenible con operaciones en todo el mundo.

En el convenio de Basilea (UNEP, 2011) se establecieron las directrices técnicas sobre el coprocesamiento ambientalmente racional de los desechos peligrosos en hornos de cemento, las cuales son aceptadas internacionalmente. A continuación, se recogen los principios generales para el procesamiento rutinario de desechos peligrosos en los hornos de cemento.

1. El coprocesamiento respeta la jerarquía de los residuos:

- El coprocesamiento no impide los esfuerzos por reducir los residuos; además, éstos no se usarán en los hornos rotatorios de cemento si existen formas de recuperación que sean económica y ambientalmente mejores.
- Se considerará al coprocesamiento como parte integral de la gestión moderna de residuos, ya que proporciona una opción de recuperación de recursos segura en el aspecto ambiental para la gestión de residuos.

- El coprocesamiento va de acuerdo con convenios ambientales internacionales importantes, como las Convenciones de Estocolmo y Basilea.
2. Deben evitarse emisiones adicionales y el impacto negativo en la salud del ser humano:
- Para prevenir o mantener al mínimo los efectos negativos de la contaminación en el ambiente, así como riesgos en la salud del ser humano.
 - Con base en las estadísticas, las emisiones atmosféricas no deben ser mayores que las de la producción de cemento con combustible tradicional.
3. La calidad del producto de cemento permanece sin cambios:
- El producto (clinker, cemento, concreto) no debe ser alterado como si fuera un sitio de disposición final para metales pesados.
 - El producto no debe tener ningún impacto negativo en el ambiente, como se demostró en las pruebas de lixiviación.
 - La calidad del cemento permitirá una recuperación de final de ciclo.
4. Las compañías encargadas del coprocesamiento deben estar calificadas:
- Tener buenos registros de seguimiento del cumplimiento de las normas de seguridad y ambientales para proporcionar información importante al público y a las autoridades adecuadas.
 - Tener personal, procesos y sistemas en el lugar que demuestren el compromiso con la protección del ambiente, la salud y la seguridad.
 - Garantizar que todos los requerimientos cumplan con las leyes, reglas y reglamentos aplicables.
 - Ser capaces de controlar los insumos y parámetros del proceso requeridos para el coprocesamiento efectivo de residuos.
 - Garantizar buenas relaciones con el público y otros participantes en los esquemas de gestión de residuos locales, nacionales e internacionales.
5. La implementación del coprocesamiento tiene que considerar circunstancias nacionales:
- Los requerimientos y necesidades específicos del país deben reflejarse en los reglamentos y procedimientos.
 - La implementación gradual permite la formación de la capacidad requerida y el establecimiento de acuerdos institucionales.
 - La introducción del coprocesamiento va acompañada por otros procesos de cambio en el sector de gestión de residuos de un país.
6. Se debe establecer un marco legislativo y reglamentario adecuado.
7. Todos los combustibles alternativos deben alimentarse en forma directa a las zonas de alta temperatura del sistema del horno: por el quemador principal, a medio horno, en la cámara de transición, en el quemado secundario (ducto de subida) o en el quemador del pre calcinador.
8. Es obligatorio el monitoreo de las emisiones.
9. Los estudios de impacto ambiental (EIA) realizados por ejemplo en Chile confirman el apego a las normas ambientales.

10. Debe ser compatible con la operación de la fábrica.
11. El sistema de control de calidad es obligatorio.
12. Se deberán capacitar a todos los niveles.
13. Contar con los planes de emergencia y de respuesta en caso de derrames.

1.5. Regulaciones del coprocesamiento.

Si bien ya se han hecho referencia a tratados y legislaciones internacionales referentes al medio ambiente, a continuación, se mencionarán las normas que regulan lo referente al medio ambiente en nuestro país (Reyes Martínez, 2010).

Con relación a los desechos peligrosos, el CITMA desde 1996 aplicaba la Resolución No. 15 de 13 de febrero de ese año, modificada luego por la No 87 de 21 de octubre de 1999 que establecía las "Regulaciones para el ejercicio de las funciones de la Autoridad Nacional y Punto de Contacto del Convenio de Basilea sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de Desechos Peligrosos y su Eliminación y otras Disposiciones para la gestión ambientalmente racional de estos desechos". En primer lugar, la Resolución 47 de 24 de septiembre de 2004 del CITMA "Indicaciones Metodológicas para la tramitación y aprobación de las solicitudes de Licencias Ambientales para la captación y utilización de los aceites usados como combustible", la cual fue modificada el 13 de septiembre de 2006 por la Resolución 73 del CITMA.

En segundo lugar, se aprobó la Resolución No 32 de 23 de marzo del 2005 del CITMA "Lineamientos Metodológicos para el Manejo y Disposición de los Desechos Compuestos por Medicamentos u Otros Generados por la Atención Médica". Modificada por la Resolución No 4 de 13 de enero de 2006 del CITMA.

Por último, se pone en práctica la Resolución 136 de 28 de agosto de 2009 del CITMA que establece el Reglamento para el Manejo Integral de Desechos Peligrosos, deroga la No 87 de 21 de octubre de 1999 "Regulaciones para el ejercicio de las funciones de la Autoridad Nacional y Punto de Contacto del Convenio de Basilea sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de Desechos Peligrosos y su Eliminación y otras Disposiciones para la gestión ambientalmente racional de estos desechos".

Las indicaciones del Centro de Inspección y Control Ambiental (CICA) para la implementación de esta resolución derogan la Resolución 73 del CITMA "Indicaciones Metodológicas para la tramitación y aprobación de las solicitudes de Licencias Ambientales para la captación y utilización de los aceites usados como combustible".

La Resolución 136/2009 surge como resultado del trabajo que se viene desplegando para unificar y potenciar el manejo de los desechos peligrosos, dada la experiencia adquirida que permite establecer mayor rigurosidad y que además incluye los Aceites Usados que hasta ese momento tenían de forma diferenciada una resolución propia.

Los principales aspectos que establece la Resolución 136 del CITMA son:

1. Define condiciones mínimas que habrá que cumplir para las siguientes etapas de manejo:

- Clasificación e identificación
- Almacenamiento temporal
- Transporte
- Tratamiento
- Disposición final

Así como la información a presentar en las solicitudes de licencias ambientales

2. Exige licencia ambiental y plan de manejo aprobado para cualquier acción de manejo.

3. Define como deben ser elaborados los planes de manejo acorde a la metodología del reglamento

4. Establece el plazo (30 días) de aprobación de las licencias ambientales y los planes de manejo por los territorios.

5. Precisa la aprobación de los planes de manejo como parte de la licencia ambiental

6. Exige la declaración jurada de los desechos peligrosos manejados anualmente.

7. Establece el mecanismo de comunicación o información para casos de accidente durante el manejo de los desechos peligrosos (plazo máximo de 24 h).

8. Define que el término generador incluye, tanto a los generadores directos, como a los que tengan a los desechos peligrosos bajo su posesión 9. Establece los requerimientos y el procedimiento para la acreditación de aquellas entidades con posibilidades de dar propuestas de soluciones a terceros

10. Indica que las violaciones de la legislación ambiental que se detecten en el manejo de desechos peligrosos se sancionarán mediante el Decreto ley 200/99.

1.6. Uso de aceites usados como combustible alternativo.

El combustible es uno de los elementos claves en el proceso de producción de clinker con un impacto directo en su economía, baste decir que gran parte del costo de su producción está dado por el costo del combustible consumido.

Los combustibles sólidos y líquidos son los más abundantes del mundo, especialmente el petróleo y el carbón, siendo estos en nuestro país los combustibles que tienen mayor importancia económica dado que los gaseosos no son usados en procesos industriales, siendo utilizados en su mayoría en domicilios o pequeñas instalaciones. La tendencia que predomine en Cuba en los años futuros respecto al combustible a utilizar, estará influenciada por el desarrollo de las industrias que usen combustibles sólidos (carbón, bagazo, etc.) o líquidos (petróleo, gasolina, aceite, etc.) como materias primas. Si bien las ventajas de utilizar combustibles líquidos son aparentes debido a las características del proceso de producción del clinker, en nuestro caso no se puede sustituir

completamente el petcoke por aceites usados debido a que no se dispone de suficiente aceite para mantener una producción continua (Simón de la Rosa y Pardo Rodríguez, 1982). Normalmente, es posible una tasa de sustitución del 50% y más en cualquier planta cementera con una mezcla de combustibles adecuada y con niveles de pre procesamiento adecuados (Murray y Price, 2008).

Si bien en la fábrica se incineran otros tipos de desechos sólidos, estos no son significativos desde el punto de vista energético. Es por esto que el presente trabajo se centra en el aceite pues es el combustible que se va a utilizar en el horno de cemento.

Se estima que en Cuba se generan alrededor de 18 - 20 Ton/año de aceites lubricantes usados (aceites usados), provenientes de diversos sectores de la economía nacional, y no se dispone de tecnologías para su pre-tratamiento y reutilización eficiente del potencial energético que poseen, lo que significa una inadecuada gestión tecnológica y ambiental.

Aceites usados procedentes de Villa Clara son utilizados como combustible en la Fábrica de Cemento Siguaney, en la provincia de Sancti Spíritus, en la Calera Palenque, del Ministerio de la Construcción, y en los complejos agroindustriales villaclareños Heriberto Duquesne, Quintín Bandera y George Washington.

El empleo del lubricante mencionado todavía es bajo, a pesar de los avances, por diversas causas. Entre estas se encuentran la mala calidad de los aceites, que se contaminan donde los almacenan o carecen de condiciones para guardarlos; tampoco hay la cultura necesaria sobre la trascendencia de llevar a cabo esta operación, muy beneficiosa para la economía y el medio (García Santos, 2010).

Cuando los lubricantes no cumplen sus prestaciones deben ser reemplazados por nuevos y se convierten en aceites usados que deben ser recogidos y reciclados de forma segura para la protección del medio ambiente y la salud humana.

El aceite usado es uno de los residuos contaminantes de mayor abundancia producidos en la actualidad, contiene hidrocarburos de lenta biodegradación que se acumulan en el entorno, tanto por vertimientos en aguas y suelos como por emisión de compuestos procedentes de su combustión (Mokrzycki y Uliasz-Bochen, 2002).

Por ejemplo, los aceites usados poseen elevadas concentraciones de metales pesados tóxicos como plomo, cadmio y solventes clorados incorporados por el desgaste de piezas y el contacto con los combustibles, compuestos aromáticos; residuos de aditivos y productos de la oxidación.

Se plantea que un litro de aceite reutilizado puede contaminar un millón de litros de agua, cinco litros quemados sin control pueden afectar la calidad del aire equivalente al que respira una persona en tres años de su vida, e igual cantidad vertida sobre un lago perturba la vida acuática en una superficie de cinco mil metros cuadrados (Huang, Yang, y Wang, 2012).

Prácticas inadecuadas de manejo, además, pueden desencadenar la degradación del suelo, puesto que esparcidos en grandes áreas forman una película que no permite el ingreso de oxígeno, comprometiendo la fertilidad de la tierra.

En función de mitigar esos efectos, Cuba cuenta con un reglamento para el manejo integral de los desechos peligrosos, dispuesto mediante la Resolución 136 del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA).

Según información aportada por la Empresa Comercializadora de Lubricantes (CUBALUB) en Cuba se estableció en la década de los 80 la recolección de aceite usado para su recuperación y reciclaje, implantando luego la Norma Cubana NC-3310/91 "Aceites Lubricantes Usados. Especificaciones", donde se reglamentan los tipos de aceites que pueden ser recolectados en mezclas, los prohibidos a mezclar para su recolección y los que deben recolectarse de forma segregada por la conveniencia de darle un tratamiento diferenciado (Reyes Martínez, 2010).

Entre los años 1983 y 1990 se logró recuperar en el país un promedio anual de 25000 t. de aceite usado, lo que llegó a representar casi el 40% del comercializado, enviándose a las Plantas de Regeneración existentes en aquel momento en Ciudad de la Habana y Santiago de Cuba. No fue posible sostener esta actividad por las limitaciones creadas en el Período Especial, coincidiendo además con la paralización de las plantas regeneradoras.

Como parte del manejo de las sustancias catalogadas como desechos peligrosos, el país ha prestado atención prioritaria a la deposición de los aceites usados debido a los problemas ambientales y a la salud humana que este desecho puede ocasionar.

Las regulaciones legales cubanas establecen su uso como combustible, autorizando la incineración de los aceites usados en los hornos de clinker de las fábricas de cemento, los de las fábricas de vidrio u otros, en los que se alcancen temperaturas superiores a los 1000°C.

Igualmente, se establecen los requerimientos que se impondrán a las instalaciones en los permisos:

- Las instalaciones que utilizarán los aceites usados solo podrán recibir los mismos de entidades que cuenten con la licencia ambiental correspondiente.
- Los medios utilizados para su transportación garantizarán una adecuada hermeticidad para evitar posibles derrames durante el traslado. De igual forma se garantizará que no se produzcan vertimientos de aceite al medio durante la carga y descarga de los mismos.
- Las facilidades de almacenamiento en las empresas comercializadoras de combustible, en las unidades generadoras y en las entidades de incineración autorizadas, contarán con cubetos de contención, con la capacidad requerida, adoptándose medidas de control durante la carga y descarga para evitar el derrame de aceite fuera de los cubetos y la recogida inmediata de cualquier vertimiento que se pueda producir.

- No se podrán incinerar aceites que contengan bifenilos policlorados (PCB).
- Las unidades generadoras de los aceites usados, durante el manejo y almacenamiento dentro de su entidad, garantizarán que los mismos no se contaminen con otros desechos o productos. Especial atención se deberá prestar a los envases utilizados para el almacenamiento de los aceites usados, los que no deberán haber contenido productos químicos -tóxicos, desechos peligrosos y sustancias halogenadas.

1.7. Sistemas de bombeo.

Un sistema de bombeo está constituido por las tuberías y los equipos por la que fluye el fluido (McGraw-Hill, 2001). Dicho sistema ofrece resistencia al flujo por diversas razones, incluyendo la fricción del fluido con las tuberías, el paso por los distintos accesorios del sistema (válvulas, codos, filtros etc.) y si la descarga ocurre a una mayor altura o presión que la absorción, se produce una mayor cantidad de pérdidas. Cuando un sistema en particular se analiza con el propósito de seleccionar una bomba o bombas, se debe calcular la resistencia al flujo producida. Dado que las pérdidas hidráulicas están en función del flujo, el tamaño de las tuberías, los accesorios y el posicionamiento de los mismos, cada sección individual del sistema tendrá su propia curva de operación característica. Una curva de operación o curva del sistema es una representación gráfica de la resistencia total para diferentes flujos y tiene muchos usos para aplicaciones de bombas centrífugas.

Para determinar la curva del sistema se debe tener un claro entendimiento del proceso y del sistema en que el equipo de bombeo debe operar. Un diseño preliminar del sistema debe incluir la disposición del equipamiento (instrumentos y tuberías), así como los accesorios a utilizar. Con esta información se puede determinar la relación entre el flujo y las pérdidas hidráulicas en el sistema, siendo esta una representación de los rangos de operación del sistema.

1.7.1. Tipos de bombas utilizadas en la industria.

Las bombas son equipos que reciben energía de un elemento exterior, generalmente en forma de energía mecánica y la transforman para elevarle la energía a un fluido (Ramos Páez, 1989). Esta energía en forma de presión y velocidad, permitirá que el fluido se desplace desde un punto a otro venciendo las resistencias que se opongan a su paso.

Existen distintos tipos de bombas y diseños que son clasificadas de varias formas dependiendo de la operación que realizan, los materiales de la que están construidas, los líquidos que manejan, o incluso su orientación en el espacio (vertical u horizontal).

Un sistema de clasificación más básico define primero el tipo de energía que se le añade al fluido, luego identifica por qué medios se implementa dicho principio y finalmente delinea las geometrías más comúnmente empleadas (McGraw-Hill, 2001). En este sistema las bombas pueden dividirse en dos categorías: dinámicas,

en las que se le añade energía continuamente al fluido, lo que obliga al fluido a moverse de forma acelerada por su interior produciendo un incremento de presión y bombas de desplazamiento, en donde se le añade energía el fluido mediante la aplicación de fuerza al fluido contenido dentro de la bomba resultando en un incremento directo de la presión con lo cual se logra impulsar el fluido. Las maquinas dinámicas se subdividen en centrifugas, axiales, de flujo mixto, de remolino y de discos, mientras que las de desplazamiento se dividen básicamente en reciprocantes o rotatorias (Ramos Páez, 1989).

Dada la gran variedad de bombas, se dificulta el proceso de elegir la que cumpla con mayor efectividad los requisitos de un sistema en particular. Para elegir correctamente la bomba adecuada es necesario conocer completamente el sistema en la que operará.

Dado que el fluido a bombear es una mezcla de aceites que tienen una viscosidad media-baja (entre 15 y 170 cSt variando según la temperatura) pueden seleccionarse varios tipos de bombas con diferentes grados de eficiencia. En la figura 1.1 se puede observar una comparación básica de los diferentes tipos de bombas con el fin de realizar una selección preliminar:

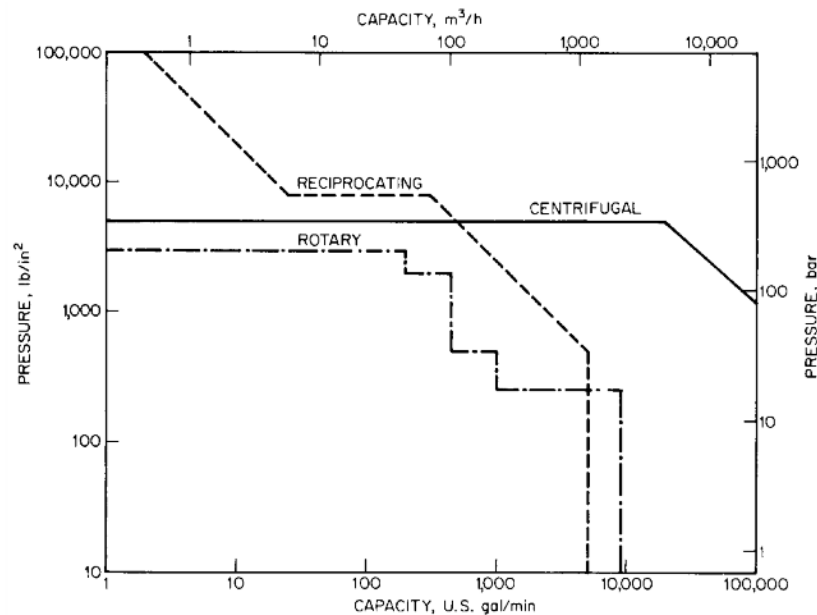


Figura 1.1. Límite superior aproximado de presión y capacidad según el tipo de bomba. Fuente (McGraw-Hill, 2001)

Las líneas representadas para cada una de los tres tipos de bombas representan los límites superiores de presión y capacidad que dicho tipo puede soportar. Con valores cerca de los límites es posible que solo se encuentren pocas bombas disponibles mientras que a bajos valores de presión y capacidad se encuentren disponibles docenas de bombas. Dado el fluido y las condiciones de bombeo, las bombas más económicas serían en orden, las centrifugas, rotatorias y luego las reciprocantes. Dadas las condiciones de nuestro sistema y fluido de trabajo se seleccionarán para nuestro caso bombas centrifugas debido a las siguientes ventajas:

- Su construcción es simple, su precio es bajo.
- El fluido es entregado a presión uniforme, sin variaciones bruscas ni pulsaciones. Son muy versátiles, con capacidades desde 5 gpm con

presión diferencial de 2 a 5 lb/pulg hasta bombas múltiples con 3000 gpm y 3000 lb/pulg².

- La línea de descarga puede interrumpirse, o reducirse completamente, sin dañar la bomba.
- Puede utilizarse con líquidos que contienen grandes cantidades de sólidos en suspensión, volátiles y fluidos hasta de 850 °F.
- Sin tolerancias muy ajustadas.
- Poco espacio ocupado.
- Económicas y fáciles de mantener.
- No alcanzan presiones excesivas aún con la válvula de descarga cerrada.
- Máxima profundidad de succión es 15 pulgadas.
- Flujo suave no pulsante.
- Impulsor y eje son las únicas partes en movimiento.
- No tiene válvulas ni elementos reciprocantes.
- Operación a alta velocidad para correa motriz.
- Se adaptan a servicios comunes, suministro de agua, hidrocarburos, disposición de agua de desechos, cargue y descargue de carro tanques, transferencia de productos en oleoductos.

Las bombas centrífugas constituyen no menos del 80% de la producción mundial de bombas. Una bomba centrífuga transforma la energía mecánica de un impulsor rotatorio en la energía cinética y potencial requerida. Aunque la fuerza centrífuga producida depende tanto de la velocidad en la punta de los álabes o periferia del impulsor y de la densidad del líquido, la cantidad de energía que se aplica por libra de líquido es independiente de la densidad del líquido. Por tanto, en una bomba dada que funcione a cierta velocidad y que maneje un volumen definido de líquido, la energía que se aplica y transfiere al líquido, (en ft-lb/lb de líquido) es la misma para cualquier líquido sin que importe su densidad. La única salvedad es que la viscosidad del líquido influye en esta energía (McNaughton, 2002).

Las complejidades del flujo dentro de una bomba centrífuga necesita una especial atención cuando los niveles energéticos o de potencia para un determinado tamaño son relativamente grandes. Fenómenos en el fluido como la recirculación, cavitación y pulsaciones de presión se vuelven muy importantes. Las interacciones hidráulicas y mecánicas que involucren estrés, vibraciones, rotores dinámicos y los diseños asociados, así como los materiales usados se vuelven críticos y los límites operacionales deben ser entendidos y respetados. En el anexo 1 se presenta una tabla donde se ilustran los diversos tipos de bombas centrífugas y su viabilidad para diferentes fluidos y se puede comprobar que para el aceite se puede utilizar cualquier tipo de bomba centrífuga con diferentes grados de idoneidad.

1.7.2. Criterios para la selección de equipos de bombeo

Para seleccionar un equipo de bombeo se requieren como mínimo conocer la siguiente información según (McGraw-Hill, 2001):

- **Fluido bombeado:** Es necesario conocer las características del fluido a bombear. Esto incluye propiedades como viscosidad, densidad, presión de vapor, corrosividad, volatilidad, toxicidad etc. Dependiendo del proceso y el sistema, algunas o todas estas propiedades pueden tener un efecto importante en el diseño del sistema y la selección de la bomba.
- **Temperatura de funcionamiento:** Es necesario según el trabajo seleccionado. Es necesario conocer incluso la temperatura máxima y mínima en dependencia de la aplicación que se le vaya a dar a la bomba.
- **Condiciones de funcionamiento:** Incluyen el caudal, presiones de aspiración e impulsión o altura total, pérdidas hidráulicas. Se estos valores están sujetos a variaciones debido a las condiciones de la instalación entonces los valores máximos y mínimos deberán ser especificados.

Las prestaciones de una bomba centrífuga se pueden evidenciar gráficamente por medio de una curva característica que, normalmente, tiene datos relativos a la altura geodésica total, a la potencia efectiva del motor (BHP), a la eficiencia, al NPSH y al nivel positivo, informaciones indicadas en relación con la capacidad de la bomba.

Cada bomba centrífuga se caracteriza por su particular curva característica, que es la relación entre su caudal y su altura de elevación. Esta representación gráfica, o sea, la trasposición de esta relación en un gráfico cartesiano, es la mejor manera para conocer qué caudal se puede obtener a una determinada altura de elevación y viceversa.

1.7.3. Efectos de la viscosidad en bombas centrífugas.

Como ya se ha mencionado el rendimiento de una bomba es influido por la viscosidad del líquido bombeado. Esto se debe a que dos de las principales pérdidas en una bomba centrífuga las ocasionan la fricción del líquido y la fricción del disco, y varían según la viscosidad del líquido, por lo cual tanto la carga como la capacidad difieren de los valores que tienen cuando se bombea agua (Martínez Díaz y Jáuregui, 2007).

Se han hecho muchas pruebas experimentales para determinar el efecto de la viscosidad del líquido en el funcionamiento de diversas bombas centrífugas. Aun con datos muy extensos sobre el efecto de la viscosidad es difícil predecir con precisión el funcionamiento de una bomba cuando maneje un fluido viscoso (Torabi y Nourbakhsh, 2016). Las curvas de eficiencia presentadas por el productor de una bomba dada son relacionadas con pruebas en agua fría. En un sistema en que el agua sea sustituida por un fluido viscoso se experimentara un incremento en la potencia necesaria, así como una disminución del flujo y de carga de la bomba, debido a la pérdida de eficiencia. Este efecto es más evidente en bombas con bajas velocidades especias en las cuales la viscosidad juega un papel decisivo en las pérdidas por ficción en el disco. Es por esto que la efectividad predecible de una bomba al manejar fluidos viscosos es usualmente calculada usando gráficos de corrección. La norma propuesta por el Hydraulic

Institute es ampliamente aceptada y es la que se tomara como referencia (ANSI/HI, 2010).

En el caso de bombas para líquidos viscosos se debe conocer con la mayor exactitud las viscosidades a diferentes temperaturas.

La viscosidad del fluido afecta las características de trabajo de bomba de la siguiente forma según (Martínez Díaz y Jáuregui, 2007):

- Hasta 20 cSt

La curva característica de la bomba centrífuga se mantiene igual que si bombeara agua.

- De 20 a 100 cSt

Desciende ligeramente la curva de $H-Q$ y de $\eta-Q$.

Se considerará una viscosidad moderadamente alta a partir de 5000 cSt. Hasta 3000 cSt se considera media y baja cuando es menor de 100 cSt.

1.8. Accesorios

Un sistema de bombeo no está compuesto solo de bombas y tuberías pues son necesarios numerosos accesorios con el fin de mantener un óptimo funcionamiento, aunque debe mencionarse que estos introducen pérdidas de carga en el sistema por lo que es recomendado utilizar la menor cantidad posible. Estos accesorios se pueden clasificar según su funcionalidad en dos clases, de protección al sistema y de aumento de eficiencia.

A continuación, se mencionarán y explicarán los accesorios que se considera necesario añadir al sistema de bombeo a instalar en la fábrica de cemento ("Instrumentación de bombas," 2012).

Reja o criba: su finalidad es impedir la entrada de materia extraña de gran tamaño a la bomba. Generalmente se recurre a diseños especiales que permitan el limpiado de esta sin parar por largo tiempo el bombeo. A la hora de seleccionar también se debe considerar que el área total de los agujeros debe ser mínimo a $2\frac{1}{2}$ veces la sección del tubo.

Codos: no son más que cambios en la dirección de la tubería, sin embargo, estos como ya se mencionó, provocan perdidas en el sistema. Existen distintos tipos y con diferentes ángulos, siendo los más comunes de 45 y 90.



Figura 1.2. Codos comunes. Fuente ("Instrumentación de bombas," 2012)

Válvulas: no son más que mecanismos que regulan el flujo entre dos partes del sistema y dado su gran variedad de diseños se dificulta una clasificación completa. Los modelos más comunes tienen carcasas de hierro fundido, siendo de bronce las partes internas sujetas a desgaste como los anillos de sello. Las válvulas pequeñas son accionadas por medio de un volante de maniobra. En las grandes estaciones donde las tuberías son de diámetros muy grandes y las presiones pueden ser muy elevadas, la maniobra es hecha por un operador movido por motor eléctrico. Si las válvulas se clasificaran según su resistencia que ofrecen al flujo, las que presentan un paso directo del flujo, como las válvulas de compuerta, bola, macho y de mariposa pertenecen al grupo de baja resistencia; las que tienen un cambio en la dirección del flujo, como las válvulas de globo y angulares, están en el grupo de alta resistencia (CRANE, 2003).

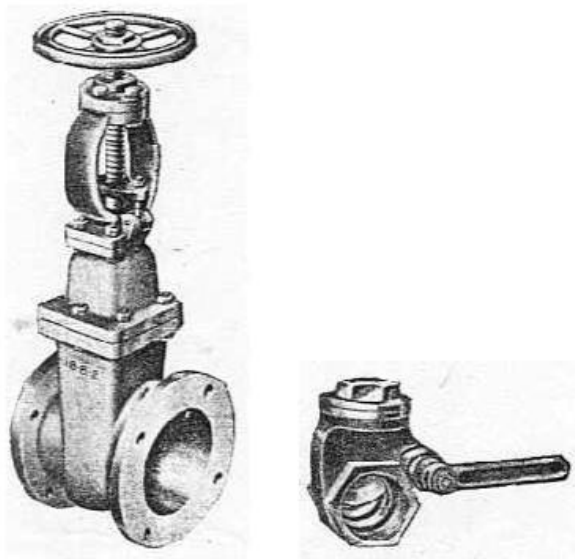


Figura 1.3. Válvulas de cierre. Fuente ("Instrumentación de bombas," 2012)

Válvulas de cheque: son las encargadas de retener los fluidos por si solas, sin necesidad de manipular sobre ellas. Estas válvulas son también conocidas como válvulas automáticas, ya que sin necesidad de ayuda se encargan ellas mismas de abrir y cerrar el conducto, impidiendo por tanto el paso de un fluido en un momento dado. Pueden montarse indistintamente en posición vertical u horizontal y su construcción es la más sencilla de todas.

Atomizadores: Los tamaños de gota son medidos en micrómetros y los atomizadores producen gotas en distintos rangos que varían desde unos pocos micrones hasta 100 e incluso 1000 micrones dependiendo de su función. Una partícula de 100 micrones demora cerca de medio segundo para arder en un horno industrial y dado que el tiempo promedio de una gota en un horno es de un segundo se deduce que una gota mayor de 200 micrómetros no se quemara por completo y se mezclara con la materia prima o terminara en el colector de polvo (Alsop et al., 2005). Para una óptima eficiencia de combustión se requiere un atomizador con un rango de diferentes tamaños de gota, finas para facilitar la ignición y estabilizar la llama y luego gotas más grandes para mantener una quema controlada. No deben ser colocados en tramos de succión debido a sus altas pérdidas hidráulicas y debe mencionarse que deben ser limpiados o cambiados con regularidad para evitar un incremento aún mayor de las pérdidas.

Filtros: son utilizados con el fin de mantener el fluido lo más limpio posible ya que es posible que pequeños pedazos de metal o materiales extraños entren al sistema, incluso partículas resultantes del desgaste de las válvulas, bombas u otros elementos del propio sistema.

1.9. Métodos de transferencia de calor

Los aceites quemados tienen que ser calentados para reducir su viscosidad, lo que permite una mejor atomización. Mientras más pesado sea el aceite tiene que ser calentado a mayor temperatura. La atomización del aceite es importante porque el tamaño de gota inicial determina el tamaño de la dispersión, por tanto, determina el tiempo que requieren las partículas para quemarse y la demanda de oxígeno.

Una inteligente selección de equipos de transferencia de calor, requiere un entendimiento de las teorías básicas de la transferencia de calor y los métodos para cálculos de diseño, en adición los problemas relacionados al diseño mecánico, fabricación, y operación deben no ser descuidados (Albitres, n.d.).

Existen varias alternativas para calentar los fluidos, a continuación, se describen los posibles equipos que pueden ser utilizados en nuestro sistema:

Intercambiador de calor: es un componente que permite la transferencia de calor de un fluido (líquido o gas) a otro fluido. Debe quedar claro que la función de los intercambiadores de calor es la transferencia de calor, donde los fluidos involucrados deben estar a temperaturas diferentes. En los intercambiadores de calor los fluidos utilizados no están en contacto entre ellos, el calor es transferido del fluido con mayor temperatura hacia el de menor temperatura al encontrarse ambos fluidos en contacto térmico con las paredes metálicas que los separan (Jaramillo, 2007).

Los modernos intercambiadores de calor van desde los intercambiadores simples de tubos concéntricos hasta complejos intercambiadores con cientos de metros cuadrados de área de calentamiento. Entre estos dos extremos se encuentran el intercambiador convencional de tubos y coraza, intercambiadores con tubos de superficie extendida, intercambiadores de placas, hornos y muchas otras variedades de equipo. Usualmente a la hora de elegir un intercambiador de calor, son conocidos el flujo másico y las temperaturas de operación (Cengel, 2006). Debe tenerse en cuenta que el uso de un intercambiador de calor conlleva una mayor potencia de bombeo debido al incremento de pérdidas hidráulicas, así como una mayor caída de presión.

Calentadores eléctricos: se utilizan para el calentamiento de sustancias líquidas en variadas aplicaciones industriales. Este método de transferencia de calor garantiza óptimas prestaciones y eficiencia para mantener la temperatura de consistentes volúmenes de fluidos: agua, aceites industriales (combustible, térmico), gas y aire.

Los elementos calefactores que componen el haz tubular pueden tener innumerables formas y pliegues que permiten su fácil instalación en el fondo de tanques o cubas, en posición horizontal o vertical, para el calentamiento por contacto directo o indirecto de fluidos destinados a los más variados empleos en los principales sectores industriales y están formados por varios elementos calefactores eléctricos de varios diámetros, normalmente plegados en “U” o con doble vuelta, dispuestos en forma perpendicular a la salida de los contactos eléctricos o bien a 90 grados. Las conexiones eléctricas están protegidas dentro de cajas o tapas estándar de acero al carbono o acero inoxidable, así como pueden contar con tapas antideflagrantes especiales para el empleo en atmósferas explosivas. Equipados con eficaces dispositivos de regulación térmica (termostatos de control con escala de temperatura regulable y rearme automático o manual, termostatos de seguridad superficial con seccionamiento, resistencias térmicas y/o termopares, son ideales para proteger el calentador del riesgo de recalentamiento y, por consiguiente, de un eventual daño precoz del mismo. Diseñadas para introducirse en tuberías, cubas o tanques bajo presión y sumergirse directamente en contacto con el fluido, este tipo de calentadores garantiza un óptimo intercambio térmico ocupando muy poco espacio. La carga superficial (W/cm^2) de estos tipos de resistencias eléctricas se elige en base a las condiciones de empleo específicas y al tipo de líquido a calentar; además de estos factores también se considera la temperatura máxima y el ambiente de funcionamiento, variables que influyen en la elección del material de la vaina con la que se construye el haz tubular de estos calentadores (EVERWATT Group, 2018).

Dado que un intercambiador de calor aumenta las pérdidas hidráulicas, así como las caídas de presión del sistema además de las dificultades que presenta instalar dicho equipo en una parte de la fábrica con poca accesibilidad se opta por instalar en el tanque de uso diario un sistema de calentadores eléctricos.

1.10. Conclusiones del capítulo

1. El coprocesamiento en la industria del cemento es una vía eficiente para recuperar energía proveniente de los residuos y contribuir a la reducción de las emisiones. Ofrece una solución segura para la sociedad y el medioambiente con estrictos controles al proceso de sustitución de recursos no renovables.
2. Si bien en Cuba existe un sistema normativo que regula el coprocesamiento, no se encontró evidencia escrita de la aplicación de este proceso en la industria cementera, para sustituciones significativas de combustible.
3. Se realizó una búsqueda de información sobre los distintos tipos de bombas. Se detallan sus posibles aplicaciones, así como sus rangos de operación y algunas de sus características principales con el fin de realizar una selección adecuada de los equipos de bombeo. Se recomienda el uso de bombas centrífugas por tener una mejor relación eficiencia-costos además de la gran versatilidad que estas poseen.

4. Con el fin de facilitar el flujo del aceite por la boquilla de suministro del horno, así como minimizar el golpe térmico que supone un combustible frío en las partes mecánicas del horno, es necesario calentar el mismo antes de su suministro al horno. Para esto se recomienda el uso de calentadores de inmersión eléctricos, con el fin de evitar pérdidas hidráulicas adicionales.

Capítulo II. Caracterización de los combustibles y metodología de cálculo para la selección de bombas.

2.1. Introducción al Capítulo.

En este capítulo se definen los aceites, así como la factibilidad de utilizar estos como combustibles alternativos, se hace una descripción de los elementos del sistema de bombeo, se caracteriza la metodología de cálculo del sistema utilizando las ecuaciones de Bernoulli e igualmente se definen los pasos para realizar la comprobación de cavitación de la bomba.

Con el fin de tener una idea de la cantidad de calor necesaria para la producción de clinker a continuación se describirá el proceso de elaboración del cemento y las reacciones químicas que ocurren en el horno.

El proceso de producción de cemento se divide en tres etapas básicas según (Alsop et al., 2005):

Primera etapa: Extracción, preparación y molienda de materias primas. Las materias primas, caliza, marga y mineral de hierro, se extraen de las canteras, las que son transportadas hasta el área donde se trituran y secan. Posteriormente se dosifican a los molinos de crudo hasta obtener la harina o crudo.

Segunda Etapa: Cocción del crudo en hornos rotatorios. Una vez homogenizada la harina entra a los hornos rotatorios (ver Anexo 2), en los que se desarrolla el principal proceso de la planta: la clinkerización.

Tercera Etapa: Molienda del clinker con otros componentes: yeso y adiciones para dar lugar a los distintos tipos de cemento. La distribución del cemento puede ser a granel o ensacado.

Es de interés para nuestro trabajo la segunda etapa llamada piroproceso en la cual, la harina cruda es conducida a la parte superior del precalentador desde los silos de almacenaje, donde comienza a ponerse en contacto con los gases calientes provenientes de la combustión del petcoke. La fuente de calor del horno es el petcoke durante el proceso normal y durante la arrancada se utiliza el diésel para el precalentamiento por un tiempo de duración (10 - 24 horas).

Gracias a los datos proporcionados por el departamento químico y la dirección de la fábrica de cemento se conoce que se produce en promedio 3 150 ton de cemento diariamente y que la demanda de energía para cumplir con la producción es de 2 460 000 000 kcal/día o 102 500 000 kcal/h.

2.2. Características del aceite usado

El calor de combustión de una sustancia es la cantidad de calor que se desprende en la combustión completa de la unidad de masa. En los combustibles sólidos y líquidos se expresa este valor en kcal/kg.

En la actualidad se cuenta con dos métodos para determinar este valor: el primero consiste en la determinación mediante cálculos partiendo de la composición del combustible y el segundo consiste en la medición práctica de la cantidad de calor desprendido por una muestra de combustible.

Para la aplicación del primer método las ecuaciones más recomendables son las propuestas por I. Mendeléiev dado que ofrece los mejores resultados al compararse con los métodos experimentales (Cengel y Boles, 2011).

Estas ecuaciones representan el poder calórico superior (PCS) e inferior (PCI) siendo el primero la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa de una unidad de masa de combustible cuando el vapor de agua originado en la combustión está condensado y, por consiguiente, se tiene en cuenta el calor desprendido en el cambio de fase; y el PCI es la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa de una unidad de masa de combustible sin contar la parte correspondiente al calor latente del vapor de agua generado en la combustión. Los resultados de estas ecuaciones pueden diferir entre 150-200 kcal/kg de los valores obtenidos experimentalmente debido a que las ecuaciones no pueden tomar en cuenta la forma de los enlaces de las sustancias que corresponden con el combustible y que influyen sobre la magnitud del calor desprendido.

Cuando se requiere cierta exactitud en los cálculos, se recomienda utilizar métodos experimentales, aunque las ecuaciones son lo suficientemente exactas para la mayor parte de los cálculos.

La medición se efectúa en un equipo llamado calorímetro, en el que se quema una muestra de combustible de 0,8 a 1,5 gramos en una atmósfera de oxígeno puro con presión entre 25 y 35 kg/cm². El calor desprendido produce una elevación de la temperatura del agua que rodea el elemento donde se encierra la muestra. El calor de combustión se calcula entonces midiendo la elevación de temperatura y conociendo la masa de agua (Alsop et al., 2005).

Este tipo de prueba, al igual que todas las que se les efectúa a los combustibles, esta normada y se ejecuta con una cierta metodología de trabajo. Se toman para el análisis las especificaciones de combustibles nacionales e internacionales, donde se definen los índices fundamentales a determinar para caracterizar los aceites usados.

Dada la importancia de la determinación precisa de la viscosidad del aceite usado que se emplea, esta es determinada mediante el uso de un viscosímetro, el cual es un equipo de laboratorio que se usa para la medición de la viscosidad y otros parámetros de flujo como la velocidad y esfuerzo de corte. Los

viscosímetros operan por medio de la rotación de un cilindro, el cual se sumerge en el material a analizar midiendo la resistencia de esta sustancia a una velocidad seleccionada. La resistencia resultante es la medida del flujo de viscosidad, dependiendo de la velocidad y de las características del disco (Alsop et al., 2005).

Debido a que la determinación de las características de todos los aceites recogidos de manera independiente es muy trabajosa y que dichos aceites son almacenados en un mismo contenedor donde con el pasar del tiempo se mezclan y pierden sus características individuales, se procedió a realizar un análisis experimental de la mezcla, para ello se tomaron seis muestras a las que se les determinó el poder calórico, luego se promediaron dichos resultados. A continuación, se dan de manera resumida los valores de las características más importantes:

Densidad a 15 °C: 0.897 g/cm³

35 °C: 0.883 g/cm³

85 °C: 0.861 g/cm³

Viscosidad cinemática a 35 °C: 165.2 cSt

40 °C: 158.7 cSt

50 °C: 94.87 cSt

100 °C: 15.48 cSt

Azufre total: 0.95 % m/m

Poder calórico neto de la mezcla: 10 034 kcal/kg

Con el fin de tener un marco de referencia se ofrece la caracterización hecha a muestras tomadas y analizadas en el laboratorio contratado del Centro de Investigaciones del Petróleo (CEINPET) de diferentes muestras obtenidas en diferentes entidades del país. (anexo 3)

2.3. Descripción del sistema de bombeo propuesto

Se propone la instalación de un sistema de recepción y almacenamiento, con sus correspondientes sistemas de bombeo, sistemas de filtro a la entrada y salida de los tanques. El aceite usado se transporta a un tanque independiente en la planta de dosificación, para luego ser alimentado a través del quemador a los hornos. Realizando una revisión bibliográfica sobre sistemas de bombeo existentes, así como recomendaciones de seguridad y las normas reguladoras existentes se procede a realizar una descripción general del sistema de recepción y almacenamiento. Se toma como base el sistema propuesto para el coprocesamiento de aceite en la fábrica de cemento Siguaney (Reyes Martínez, 2010), adaptando el mismo a las necesidades y características de la fábrica Cementos Cienfuegos S.A.

Recepción y almacenamiento: La fábrica cuenta con un tanque de almacenamiento de 5000 m^3 (5 000 000 L) actualmente en desuso el cual ha sido aprobado por la dirección de la fábrica para su uso en el almacenamiento de los aceites usados (anexo 4). Dicho tanque se encuentra situado paralelo a una calle debidamente pavimentada lo que permite el acceso y parqueo de los camiones cisternas para realizar la descarga.

El tanque de almacenamiento dispone de una entrada por encima, y por debajo dispone de una toma de tubería para la extracción del aceite. En el interior del tanque de almacenamiento de los aceites usados existe un sistema de nivel de llenado que cierra la válvula de alimentación, de modo que ésta se cierre automáticamente antes de que ocurra el desbordamiento de aceite hacia el exterior. El área rodeando el tanque cuenta con un muro de contención con capacidad suficiente para contener posibles derrames de aceite.

Se utilizará una bomba para trasegar el aceite desde el tanque de almacenamiento hasta el tanque de uso diario. La bomba debe estar lo más cerca posible de la fuente del líquido, exenta al máximo de singularidades y con la mínima cantidad de accesorios, en este caso solo una rejilla para impedir el paso de impurezas solidad de gran tamaño, se debe verificar el espacio de trabajo a fin de asegurar una accesibilidad adecuada para labores de mantenimiento, además la bomba debe estar sobre una base estable con el fin de minimizar las vibraciones, preferiblemente bajo techo para protegerla de la intemperie.

Con el fin de mantener la homogeneidad del aceite y evitar que el mismo se separe del agua que contiene debido a las diferencias de densidades, se instalara una bomba que se encargara de recircular constantemente el aceite en el tanque de almacenamiento.

Tanque de uso diario: Tanque de 1500 m^3 de capacidad aproximadamente, debe colocarse en un lugar que permita la conexión de la tubería de aceite sobre la base de que las extensiones y prolongaciones de la tubería sea mínima, descargando en la parte superior del tanque. El mismo debe contar con el drenaje adecuado y muro de contención para el caso de vertimientos accidentales.

El tanque de uso diario debe de disponer de un sistema de medición interior que permita medir el volumen de mezcla contenida en su interior en cada momento y un límite que automáticamente desconecte la bomba de aceite al llegar al volumen máximo, de manera que no se produzcan vertimientos indeseados de aceite o crudo, o ambos, por desbordamiento del tanque. Este tanque debe encontrarse próximo a las calderas para recepcionar el aceite transportado desde los tanques de almacenamiento por las tuberías ya existentes, el cual dispondrá a la salida, de una tubería, con válvula de operación manual incorporada, conectada al sistema de alimentación de combustible a las calderas.

Como se explicó con anterioridad el aceite es suministrado al horno a través de una boquilla lo que hace necesario elevar la temperatura del aceite con el fin de reducir su viscosidad. Con este fin se instalará un calentador eléctrico con brida el

cual siempre debe estar inmerso con un nivel de líquido superior de unos 100 mm encima de la zona calentadora. Se recomienda instalar un sistema de vigilancia del nivel y de flujo.

Para este último tramo es necesaria una bomba de mayor potencia ya que es necesario que el aceite llegue hasta el tanque en el área de dosificación el cual se encuentra presurizado a 10 bares. La bomba debe estar lo más cerca posible de la fuente del líquido y también para esta bomba se debe verificar el espacio de trabajo a fin de asegurar una accesibilidad adecuada para labores de mantenimiento, además de estar sobre una base estable para minimizar las vibraciones, preferiblemente bajo techo para protegerla de la intemperie y del polvo, ya que esta se encontrará más cerca de los molinos de materias primas. Se colocará a la salida de la bomba un sistema de filtrado para evitar el paso de partículas que puedan taponar la boquilla de suministro.

Es importante notar que el sistema de suministro a la planta dosificadora trabaja con temperaturas relativamente altas (85°C) por lo que es recomendable emplear métodos de aislamiento térmico con el fin de reducir la cantidad de energía necesaria para mantener el equilibrio del proceso, evitar el flujo de calor a través del material y evitar lesiones o accidentes provocadas por las altas temperaturas externas. Para instalaciones en el exterior se puede recomendar un aislamiento térmico de espuma elastomérica, usar mantas de lanas minerales o un revestimiento con pintura térmica. También debe mencionarse que la expansión térmica de los componentes del sistema es despreciable teniendo en cuenta las longitudes de las tuberías y el coeficiente de expansión térmica del acero por lo que esta no debería causar ningún problema (AFELMA & ANDIMAI, 2016).

2.4. Metodología de selección de bomba

Si bien en el presente proyecto se trabaja con dos sistemas de bombeo independientes, la metodología utilizada para el cálculo del sistema es igual para ambos casos. A continuación, se pasará a detallar la misma y luego se presentarán los resultados obtenidos. Es necesario aclarar que ambos tanques de almacenamiento se encuentran a una presión de 1 atm y que el tanque ubicado en la planta de dosificación tiene una presión de 10 bares.

2.4.1. Velocidad del fluido

El primer paso para hallar la curva característica del sistema es determinar las velocidades reales de succión y descarga. Dado que este sistema se utilizaba con anterioridad para bombear crudo, se conocen algunos datos del sistema. Gran parte de las tuberías necesarias para esta parte del sistema ya se encuentran instaladas y las nuevas que sean necesarias se escogerán iguales a las ya instaladas siendo estas, tuberías de acero al carbón A53-B36.10 de 100 mm de diámetro interior. Buscando en la literatura se encuentra que las velocidades recomendadas para succión y descarga de aceite por tuberías es de 1 a 2.5 m/s como se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Velocidades utilizadas para el flujo en tuberías. Fuente (CRANE, 2003)

Servicio	Velocidad (m /s)
Alimentación de calderas	2,4 a 4,6
Succión de bombas y líneas de descarga	1,2 a 2,1
Servicios generales	1,2 a 3,0
Distribución de agua potable	Hasta 2,1

Dado que no es necesario realizar el trasvase en un tiempo límite se escoge un valor medio de 2 m/s para la succión y 2.5 m/s para la descarga.

Utilizando la expresión de continuidad, mostrada en la Ecuación 2.1, se determinan los valores de los flujos volumétricos en las tuberías.

Q = A * V (2.1)

Donde:

A: Área transversal de la tubería (m²).

Q: Flujo o caudal en la tubería (m³/s).

V: Velocidad del fluido (m/s).

2.4.2. Ecuación de Bernoulli.

El fluido hidráulico, en un sistema, contiene energía bajo tres formas: energía cinética que depende de la velocidad y masa del fluido, energía potencial que depende de su posición, y energía de presión que depende de su compresión. El principio de Bernoulli afirma que la suma de las energías cinética, potencial y de presión, en distintos puntos del sistema, debe ser constante (Sistemas hidroneumáticos C.A, 2005). Estos parámetros son recogidos en la Ecuación 2.2:

$\frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + Z = H$ (2.2)

Donde.

P: Presión del fluido (Pa).

ρ: Densidad del fluido (kg/m³).

g: Aceleración de la gravedad (m/s²).

V: Velocidad del fluido (m/s).

Z: Altura geométrica (m).

H. Carga estática (m).

Normalmente las pérdidas por rozamiento se desprecian y debido a que existen perdidas y/o incrementos de energía, estos deben ser incluidos en la ecuación de Bernoulli. Por lo tanto, el balance de energía puede escribirse para dos puntos del fluido como muestra la Ecuación 2.3.

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + H_{sist.} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + \sum_1^2 h_{ftotal} \quad (2.3)$$

Donde.

P_1, P_2 : Presión del fluido en el punto 1 y 2 respectivamente.

ρ : Densidad del fluido.

g : Aceleración de la gravedad.

V_1, V_2 : Velocidad del fluido en el punto 1 y 2 respectivamente.

Z_1, Z_2 : Alturas geométricas de la línea de referencia hasta los puntos 1 y 2 respectivamente.

$\sum_1^2 h_{ftotal}$: Suma de todas las pérdidas hidráulicas entre los puntos 1 y 2.

H : Carga total de impulsión.

Se debe tener en cuenta que en algunos sistemas se simplifican o se desprecian algunos de estos valores.

2.4.3. Cálculo del número de Reynolds

Existen dos tipos de flujos dentro de una tubería:

- Flujo Laminar: Es aquel en que sus partículas se deslizan unas sobre otras en forma de láminas formando un perfil de velocidades simétrico y en forma de parábola.
- Flujo Turbulento: Es aquel cuyas partículas se deslizan en forma desordenada.

En ambos casos la velocidad en el perfil de velocidades, varía de una máxima (en la zona central) a una mínima (en la zona de contacto con las paredes del tubo). Osborne Reynolds dedujo que el régimen de flujo en tuberías depende de los cuatro factores siguientes:

- Dámetro de la tubería
- Densidad del fluido
- Viscosidad
- Velocidad del flujo

Combinando estos cuatro valores Reynolds obtiene una combinación adimensional de estas cuatro variables, conocido como el número de Reynolds (Sistemas hidroneumáticos C.A, 2005). El número de Reynolds se calcula a partir de la Ecuación 2.4.

$$Re = \frac{V d}{\theta} = \frac{\rho V d}{\mu} \quad (2.4)$$

Donde:

μ , viscosidad absoluta o dinámica del fluido ($Pa \cdot s = kg/m \cdot s$).

θ , viscosidad cinemática del fluido (m^2/s).

ρ y V , son la densidad (kg/m^3) y la velocidad del fluido (m/s) respectivamente.

d, diámetro de la tubería.

2.4.4. Regímenes de corriente.

En 1839 Hagen llamó la atención sobre el hecho de que la forma del flujo en un tubo cilíndrico cambia cuando la velocidad excede un cierto límite. Observó que, para velocidades inferiores a dicho límite, la superficie del chorro fluyente era lisa como la de una barra de vidrio sólida; por encima de ese límite, la superficie del chorro oscilaba y el flujo salía a borbotones.

En 1883 Osborne Reynolds demostró las dos modalidades muy claramente y presentó el parámetro (que ahora lleva su nombre) como un criterio para determinar el régimen bajo el cual ocurre un movimiento del fluido (Shames, 1995).

En general, el flujo laminar se presenta cuando las capas adyacentes de un fluido se mueven unas en relación a otras, formando líneas de corriente lisas, no necesariamente rectas, sin mezclarse macroscópicamente. Esta es la forma que se encuentra cuando los esfuerzos tangenciales viscosos, causados por el intercambio molecular de cantidad de movimiento entre las capas de fluido, es la influencia predominante al establecerse el campo de flujo (Daily y Harleman, 1975).

Hasta ahora todos los experimentos indican que por debajo de 2 000 solamente puede existir flujo laminar. Así, una vez que se ha alcanzado 2 000 puede existir una transición según la magnitud de las perturbaciones locales. Este valor del número de Reynolds se conoce como número de Reynolds crítico. El flujo correspondiente a un número de Reynolds que exceda 2 000 puede considerarse inestable debido a que cualquier perturbación producirá la aparición de las fluctuaciones aleatorias comunes de flujo turbulento. Por debajo del número de Reynolds crítico la cantidad de amortiguamiento existente es suficiente para eliminar los efectos de cualquier perturbación local, de manera que el flujo es siempre bien ordenado. En problemas prácticos de ingeniería relacionados con tuberías, siempre existen perturbaciones locales suficientes para ocasionar la aparición del flujo turbulento cuando se excede el número de Reynolds crítico (Shames, 1995).

2.4.5. Pérdidas del sistema

Las pérdidas hidráulicas disminuyen la energía específica útil que la bomba comunica al fluido y consiguientemente la altura útil. Estas se dividen en pérdidas de tramo recto y pérdidas en los accesorios. En el proceso de diseño se busca que los valores de pérdidas sean mínimos sin comprometer el correcto funcionamiento del sistema.

2.4.5.1. Pérdidas de tramo recto o pérdidas de carga por fricción

Las pérdidas lineales son las producidas por las tensiones viscosas originadas por la interacción entre el fluido y las paredes de una tubería o un conducto. En un

tramo de tubería de sección constante, la pérdida de carga se puede obtener mediante un *balance de fuerzas* en la dirección del flujo.

Las características de los esfuerzos cortantes son muy distintas según el flujo sea laminar o turbulento. En el caso de flujo laminar, las diferentes capas del fluido discurren ordenadamente, siempre en dirección paralela al eje de la tubería y sin mezclarse, siendo la viscosidad el factor dominante en el intercambio de cantidad de movimiento (esfuerzos cortantes). En flujo turbulento, en cambio, existe una continua fluctuación tridimensional en la velocidad de las partículas (también en otras magnitudes intensivas, como la presión o la temperatura), que se superpone a las componentes de la velocidad. Este es el fenómeno de la turbulencia, que origina un fuerte intercambio de cantidad de movimiento entre las distintas capas del fluido, lo que da unas características especiales a este tipo de flujo.

Las pérdidas de tramo recto se calculan de acuerdo a la Ecuación 2.5 llamada ecuación de Darcy-Weisbach:

$$\sum h_{ft. recto} = \frac{f L V^2}{2 d g} \quad (2.5)$$

Donde:

f: Factor de fricción de la tubería o conducto.

L: Longitud total de los tramos rectos de tubería.

V: Velocidad del fluido en la tubería.

d. Diámetro de la tubería.

g: Aceleración de la gravedad.

Esta expresión puede ser utilizada independientemente de si el flujo es laminar o turbulento. En caso de que el flujo sea laminar el factor f se calcula según la Ecuación 2.6 en cuyo caso el factor de fricción depende exclusivamente del número de Reynolds:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2.6)$$

En régimen turbulento el factor de fricción depende, además de Re, de la rugosidad relativa. Según pusieron de relieve Prandtl y von Karman, esa dependencia está determinada por la relación entre la rugosidad y el espesor de la subcapa límite laminar, que es la zona de la capa límite turbulenta, directamente en contacto con la superficie interior de la tubería; en esta subcapa las fuerzas viscosas son tan grandes frente a las de inercia (debido al alto gradiente de velocidad) que el flujo en ella es localmente laminar. Colebrook y White combinaron las ecuaciones de von Karman y de Prandtl, y propusieron una única expresión para el factor de fricción y a partir de ellas Moody desarrolló un diagrama que lleva su nombre, en el que se muestra una familia de curvas de isorugosidad relativa con la que se determina el factor de fricción a partir de la intersección de la vertical del número de Reynolds, con la isocurva correspondiente (Daily y Harleman, 1975).

De manera general, el coeficiente f se busca mediante el Diagrama de Moody, como se muestra en la Figura 2.1 el factor de fricción (f) depende del valor del número de Reynolds y de la relación entre la rugosidad (ε) y el diámetro de la tubería (D).

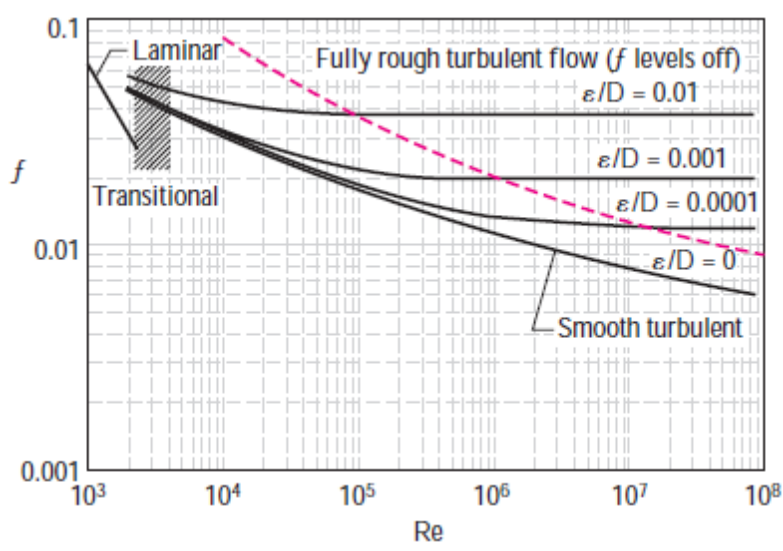


Figura 2.1 Diagrama de Moody. Fuente (Cengel y Cimbala, 2006).

En la Tabla 2.2 se muestran algunos valores de rugosidad en función de algunos de los materiales comúnmente utilizados en las industrias.

Tabla 2.2 Valores de rugosidad para tuberías comerciales. Fuente (Cengel y Cimbala, 2006)

Material	Rugosidad, ε	
	ft	m m
Vidrio, Plástico	0	0
Concreto	0,003-0,03	0,9 -9
Tuberías de cobre	0,000005	0,0015
Listones de madera	0,0016	0,5
Hierro fundido	0,00085	0,26
Hierro galvanizado	0,0005	0,15
Hierro forjado	0,00015	0,046
Acero inoxidable	0,000007	0,002
Acero comercial	0,00015	0,045
Concreto	0,003-0,03	0,9 -9
Tuberías de cobre	0,000005	0,0015
Goma blanda	0,0016	0,5
Tuberías de latón	0,000005	0,0015

2.4.5.2. Pérdidas en accesorios o pérdidas locales.

Cuando un fluido se desplaza uniformemente por una tubería recta, larga y de diámetro constante, la configuración del flujo indicada por la distribución de la velocidad sobre el diámetro de la tubería adopta una forma característica. Cualquier obstáculo en la tubería cambia la dirección de la corriente en forma total o parcial, altera la configuración característica de flujo y ocasiona turbulencia, causando una pérdida de energía mayor de la que normalmente se produce en un flujo por una tubería recta.

Las pérdidas locales son las producidas por cualquier obstáculo colocado en la tubería y que suponga una mayor o menor obstrucción al paso del flujo: entradas y salidas de las tuberías, codos, válvulas, cambios de sección, etc (CRANE, 2003).

Las pérdidas en accesorios se calculan de acuerdo a la Ecuación 2.7.

$$\Sigma h_{f \text{ accesorios}} = \Sigma K \frac{V^2}{2g} \quad (2.7)$$

Donde:

K es el coeficiente de resistencia hidráulica local.

V: Velocidad del fluido.

g: Aceleración de la gravedad.

El coeficiente de resistencia hidráulica local (K) se encuentra en numerosos manuales para los accesorios comerciales. No se hace distinción entre flujo laminar y flujo turbulento.

Es recomendado utilizar los accesorios imprescindibles ya que las pérdidas originadas por los accesorios en un sistema son comúnmente mayores a las pérdidas de tramos rectos.

2.4.6. Trazado de la curva característica hidráulica del sistema de tubería

Una vez se han obtenidos los valores de pérdidas hidráulicas se puede proceder al trazado de la curva del sistema. La expresión del sistema de bombeo viene representada por la Ecuación 2.8.

$$H_{sist.} = A + BQ^2 \quad (2.8)$$

Donde B representa las pérdidas totales del sistema expresadas en función del flujo al cuadrado. El término A representa la carga estática, llamada así porque esta se mantiene constante al no depender del flujo sino de las características del sistema y se calcula mediante la diferencia de los parámetros del fluido en los puntos donde se aplica la Ecuación de Bernoulli mostrada en la expresión 2.9:

$$A = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + Z_1 - Z_2 \quad (2.9)$$

2.4.7. Comprobación de la selección del equipo basándose en la cavitación.

Un factor importante para el funcionamiento satisfactorio de una bomba es evitar la cavitación, tanto para obtener un buen rendimiento como para evitar daños en el impulsor.

La reducción dinámica de la presión que tiene lugar cuando un líquido fluye en ductos curvos, o rodea o pasa sobre un cuerpo inmerso, nos conduce a la cavitación. La cavitación es un cambio rápido, casi explosivo, de fase, de líquido a vapor, el cual ocurre siempre que la presión absoluta de un líquido que está fluyendo, cae por medios hidrodinámicos hasta o más abajo de su valor crítico. Bajo circunstancias usuales, la presión crítica es la presión de vaporización, o una ligeramente menor (Daily y Harleman, 1975).

Las zonas de vaporización obstruyen el flujo limitando la capacidad de la bomba. Cuando el fluido avanza a una zona de mayor presión, las burbujas colapsan y su implosión puede producir un picado del impulsor. La cavitación suele producirse con más frecuencia cerca de la salida (periferia) de los impulsores de flujo radial y mixto, donde se alcanzan las velocidades mayores. También puede aparecer en la aspiración del impulsor, donde las presiones son menores. En el caso de las bombas de flujo axial, la parte más vulnerable a la cavitación es el extremo de los álabes.

La cavitación de la bomba se nota cuando hay uno o más de las siguientes señales: ruido, vibración, caída en la curva de capacidad de carga y eficiencia, con el paso del tiempo, por los daños en el impulsor por picaduras y erosión. Como todas estas señales son inexactas, se hizo necesario aplicar ciertas reglas básicas para establecer cierta uniformidad en la detección de la cavitación (CRANE, 2003).

Aplicando la Ecuación de Bernoulli desde el punto de bombeo A, hasta la entrada de la bomba, punto E, se obtiene la Ecuación 2.10.

$$H_E = \frac{P_E}{\rho g} + Z_E + \frac{V_E^2}{2g} \quad (2.10)$$

Donde:

P_E : Presión a la entrada de la bomba.

ρ, g : Densidad del fluido y aceleración de la gravedad respectivamente.

Z_E : Altura geométrica desde el eje de referencia.

V_E : Velocidad del fluido a la entrada de la bomba.

Ya que el punto de entrada de la bomba se encuentra sobre el eje de referencia, el valor de Z_E es cero y se simplifica de la Ecuación 2.11, obteniendo así la Ecuación 2.12.

$$H_E = \frac{P_E}{\rho g} + \frac{V_E^2}{2g} \quad (2.12)$$

La altura neta positiva disponible ($NPSH_{disp}$) se calcula según la Ecuación 2.13.

$$NPSH = H_E - \frac{P_{st}}{\rho g} = \frac{P_E}{\rho g} + \frac{V_E^2}{2g} - \frac{P_{st}}{\rho g} \quad (2.13)$$

Donde:

P_E : Presión del fluido a la entrada de la bomba.

ρ, g : Densidad del fluido y aceleración de la gravedad respectivamente.

V_E : Velocidad del fluido a la entrada de la bomba.

P_{st} : Presión de saturación del fluido a la entrada de la bomba a la temperatura de trabajo.

Aplicando Bernoulli entre los puntos A y E se obtiene la Ecuación 2.14, de la cual despejamos la presión a la entrada de la bomba (P_E) obteniendo la Ecuación 2.15.

$$\frac{P_A}{\rho g} - Z_A + \frac{V_A^2}{2g} - \sum_A^E h_f = \frac{P_E}{\rho g} + Z_E + \frac{V_E^2}{2g} \quad (2.14)$$

$$\frac{P_E}{\rho g} = \frac{P_A}{\rho g} - Z_A - \sum_A^E h_f - \frac{V_E^2}{2g} \quad (2.15)$$

Donde:

P_E : Presión del fluido a la entrada de la bomba.

ρ, g : Densidad del fluido y aceleración de la gravedad respectivamente.

P_A : Presión del fluido en el punto de extracción.

Z_A : Altura geométrica desde el punto de extracción hasta el eje de referencia.

V_E : Velocidad del fluido a la entrada de la bomba.

$\sum_A^E h_f$: Pérdidas totales en la tubería desde el punto A hasta el punto E.

Sustituyendo la Ecuación 2.15 en la Ecuación 2.2 se obtiene la expresión para el cálculo de la altura neta positiva disponible.

$$NPSH_{disponible} = \frac{P_A}{\rho g} \pm Z_A - \sum_A^E h_f - \frac{P_{st}}{\rho g} \quad (2.16)$$

Donde:

P_A : Presión del fluido en el punto de extracción.

ρ, g : Densidad del fluido y aceleración de la gravedad respectivamente.

Z_A : Altura geométrica desde el punto de extracción hasta el eje de referencia.

$\sum_A^E h_f$: Pérdidas totales en la tubería desde el punto A hasta el punto E.

P_{st} : Presión de saturación del fluido a la entrada de la bomba.

Para que no ocurra la cavitación debe cumplirse que:

$$NPSH_{disp} > NPSH_{req}$$

Una vez seleccionada la bomba es posible obtener el punto de operación de la misma con el sistema.

2.4.8. Determinación de la potencia necesaria para el bombeo.

De forma general la potencia que demanda la bomba, o lo que es lo mismo, la potencia requerida para el bombeo se calcula como se muestra en la Ecuación 2.17.

$$N = \frac{\rho g H_b Q}{1000 \cdot \eta} \quad (2.17)$$

Donde:

ρ : Densidad del fluido (kg/m^3)

g : Aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$)

H_b : Carga de impulsión (m)

Q : Flujo volumétrico (m^3/s)

η : Eficiencia de la bomba

2.5. Conclusiones del Capítulo.

1. Los aceites usados resultan una buena opción como combustible alternativo, debido a su alto poder calórico y sus bajos niveles de azufre.
2. Se diseñó el sistema de recepción, almacenamiento y suministro de los aceites usados, con sus correspondientes sistemas de bombeo, sistemas de filtro a la entrada y salida de los tanques.
3. Se definió una metodología de cálculo, que toma en cuenta los parámetros de operación y las pérdidas hidráulicas del sistema. Ella nos permite la selección de bombas más eficientes de acuerdo a las características de operación del sistema.

Capítulo III. Resultados alcanzados mediante la aplicación de la metodología.

3.1. Introducción al capítulo

En este capítulo se darán de manera resumida los resultados obtenidos utilizando la metodología expuesta anteriormente y se pasará a seleccionar los equipos que conforman el sistema de bombeo basándose en dichos resultados y se le realizará la comprobación de cavitación a las bombas con el fin de asegurar que estas no incurran en este indeseado efecto. También se realizará un análisis económico del sistema propuesto y finalmente se analizará el impacto medioambiental del mismo.

3.2. Selección de los equipos

A continuación, se ofrecerán de manera resumida los resultados obtenidos de ambos sistemas, así como se hará una selección de las bombas y de los calentadores de inmersión requeridos.

3.2.1. Sistema de trasiego

Se trasiega un flujo de aceites usados de $68.4\text{ m}^3/\text{h}$ desde tanque de recepción hasta el tanque de uso diario a velocidades de succión y descarga de 2 y 2.5 m/s respectivamente. Para una mejor comprensión del caso de estudio se confeccionará un esquema preliminar del sistema en el que se especificarán también los accesorios utilizados.

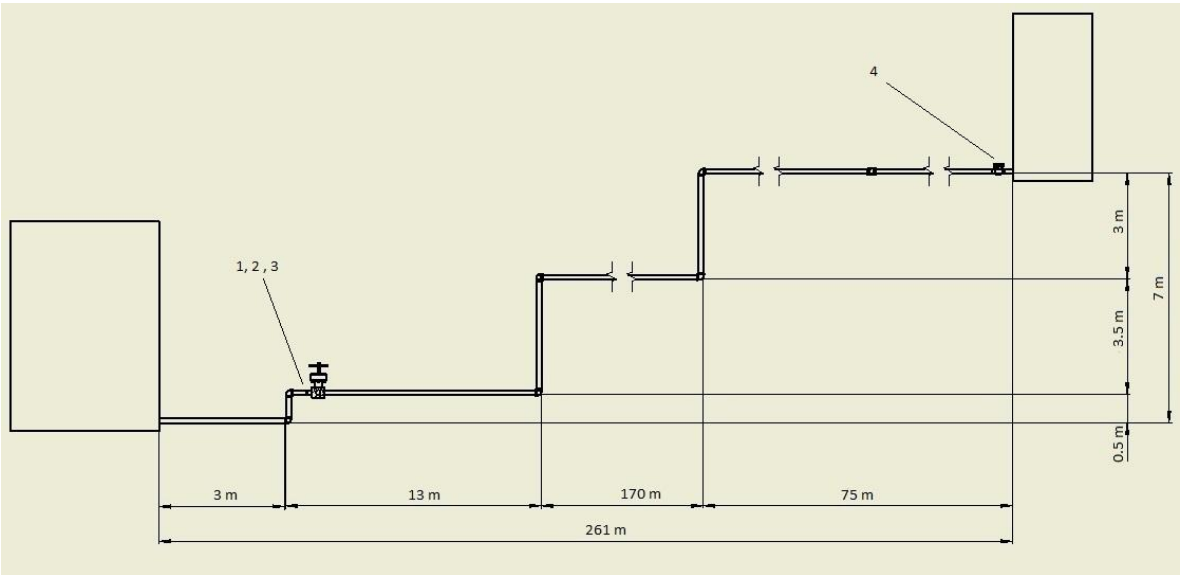


Figura 3.1. Esquema del sistema de trasiego, vista frontal. Fuente (Elaboración propia)

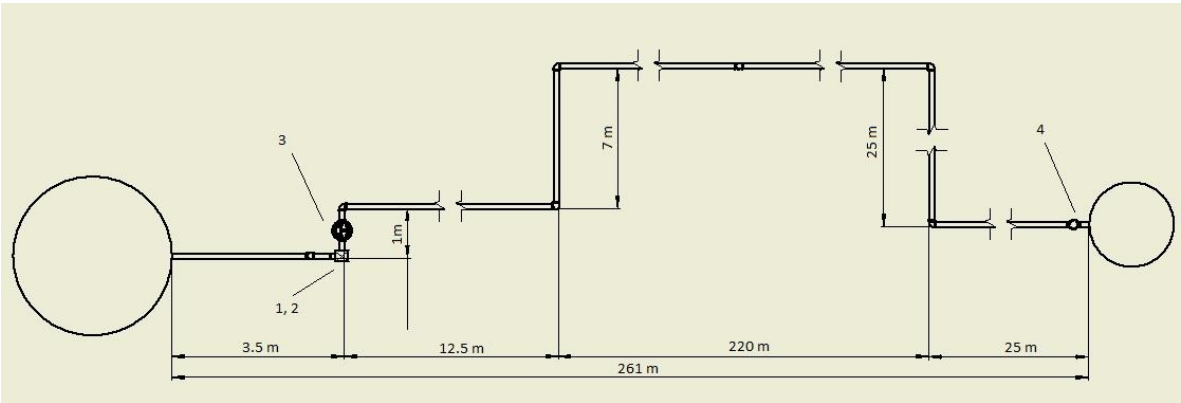


Figura 3.2. Esquema del sistema de trasiego, vista superior. Fuente (Elaboración propia)

Donde:

- 1: rejilla
- 2: sistema de bombeo
- 3: válvula de globo
- 4: válvula de cierre automático

Se trabaja con aceites usados a 35 °C al cuál le corresponde una viscosidad cinemática (μ) de $1,65 \times 10^{-4}$ Pa/s, y una densidad de 883 kg/m^3 . Debido a la viscosidad relativamente alta y las bajas velocidades con las que se trabaja, el flujo es laminar tanto en las secciones de succión como de descarga del sistema.

Aplicando el método anteriormente expuesto se llega a la ecuación 2.8:

$$H_{\text{sist.}} = A + B Q^2 \tag{2.8}$$

$$H_{\text{sist.}} = 2 + 85\,318.6 Q^2$$

Dado que ambos tanques se encuentran a presión ambiente y que las velocidades son despreciables, la carga estática es simplemente la diferencia de alturas con respecto al punto de referencia, siendo en este caso 2 m. Con estos resultados y auxiliándose de la herramienta Excel se pasa a graficar la curva del sistema:

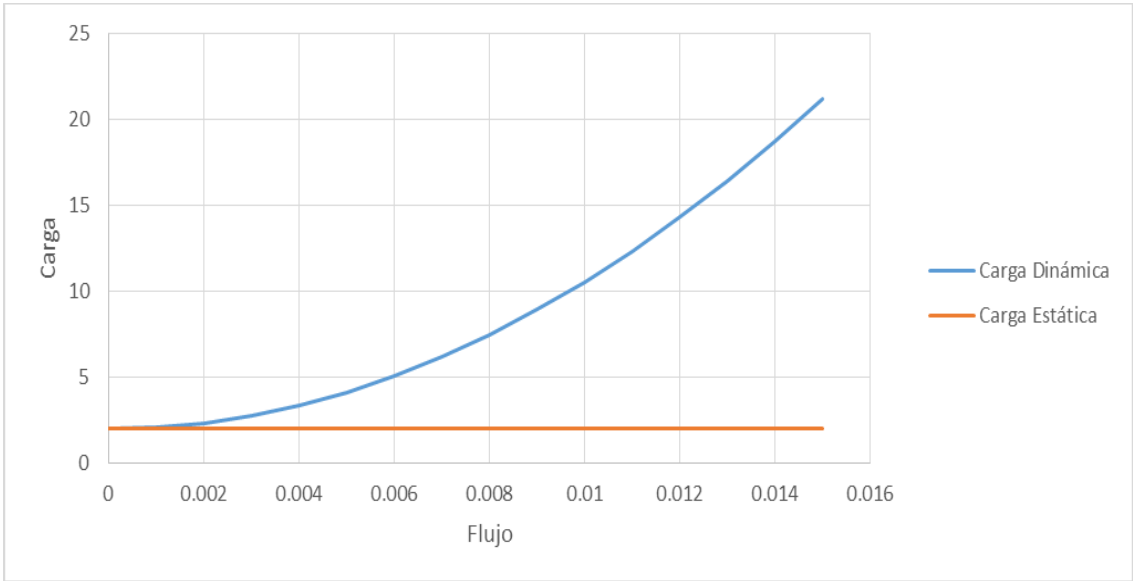


Figura 3.3. Curva del sistema de trasiego. Fuente (Elaboración propia)

Utilizando el programa Pump-Flo de la compañía Engineered Solutions Inc. Se realizó una búsqueda de bombas que cumplieran con las exigencias del sistema.

A continuación, se ofrecerán los datos de la bomba seleccionada perteneciente al fabricante Franklin Electric.

- Tamaño: 3x4-7.5
- Modelo: HC-4X3-75-BF-M
- Q max: 250 m³/h
- H max: 76.2 m
- P max: 24.1 bar
- T max: 100 °C
- NPSHr: 1.8 m
- Eff: 50.9 %
- Potencia: 10.5 kW
- r.p.m :2680

A continuación, se muestra la gráfica del punto de operación de la bomba.

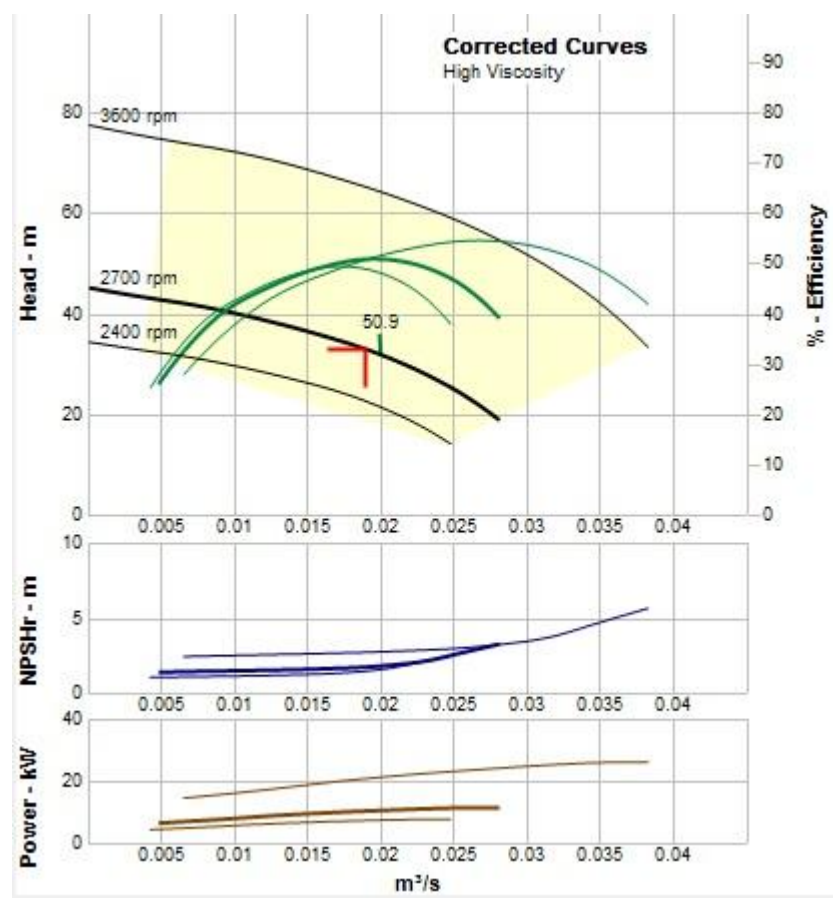


Figura 3.4. Punto de operación de la bomba de trasiego. Fuente (Software Pump - Flo)

El fabricante suministra además el esquema de ensamble de la bomba, así como sus dimensiones:

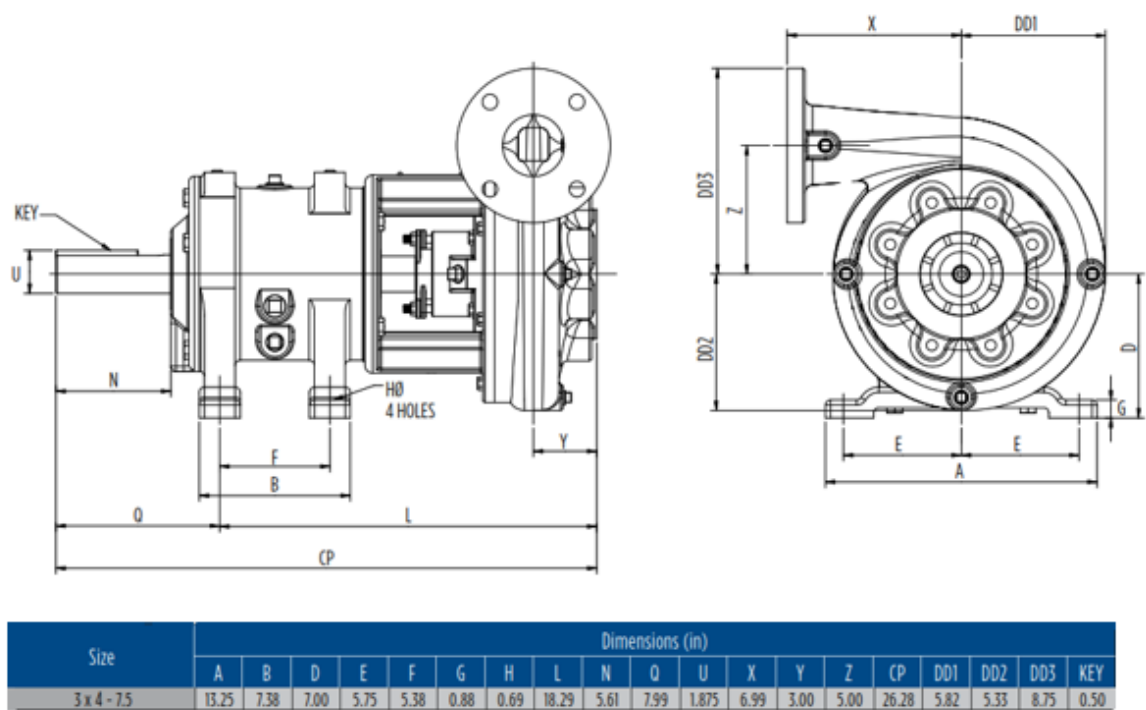


Figura 3.5. Esquema de ensamblaje de la bomba de trasiego. Fuente (Catálogo de Franklin Electrical 7.5 inch).

3.2.2. Sistema de suministro

Se suministra un flujo de aceites usados de 113 m³/h desde el tanque de uso diario hasta la boquilla del horno a velocidades de succión y descarga de 4 y 4.5 m/s respectivamente. Para una mejor comprensión del caso de estudio se confeccionará un esquema preliminar del sistema en el que se especificarán también los accesorios utilizados.

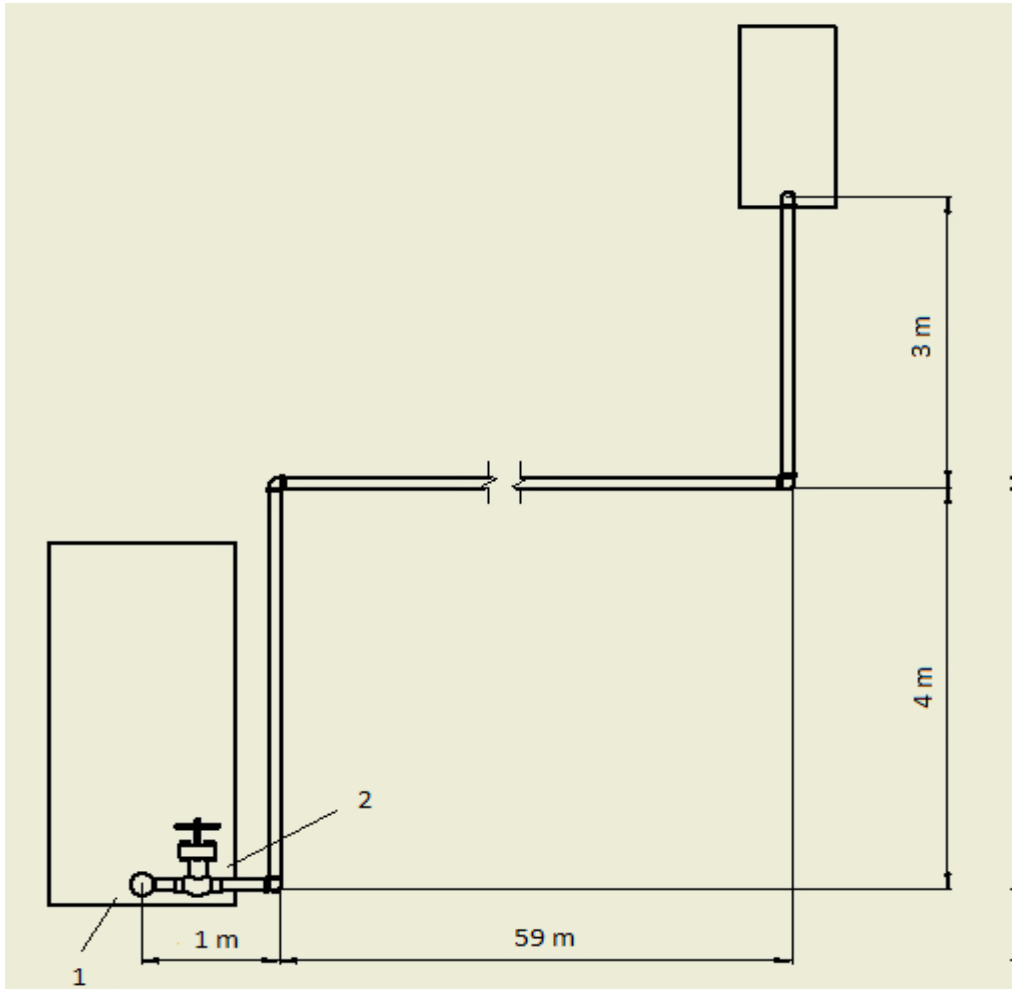


Figura 3.6. Esquema del sistema de suministro, vista frontal. Fuente (Elaboración propia)

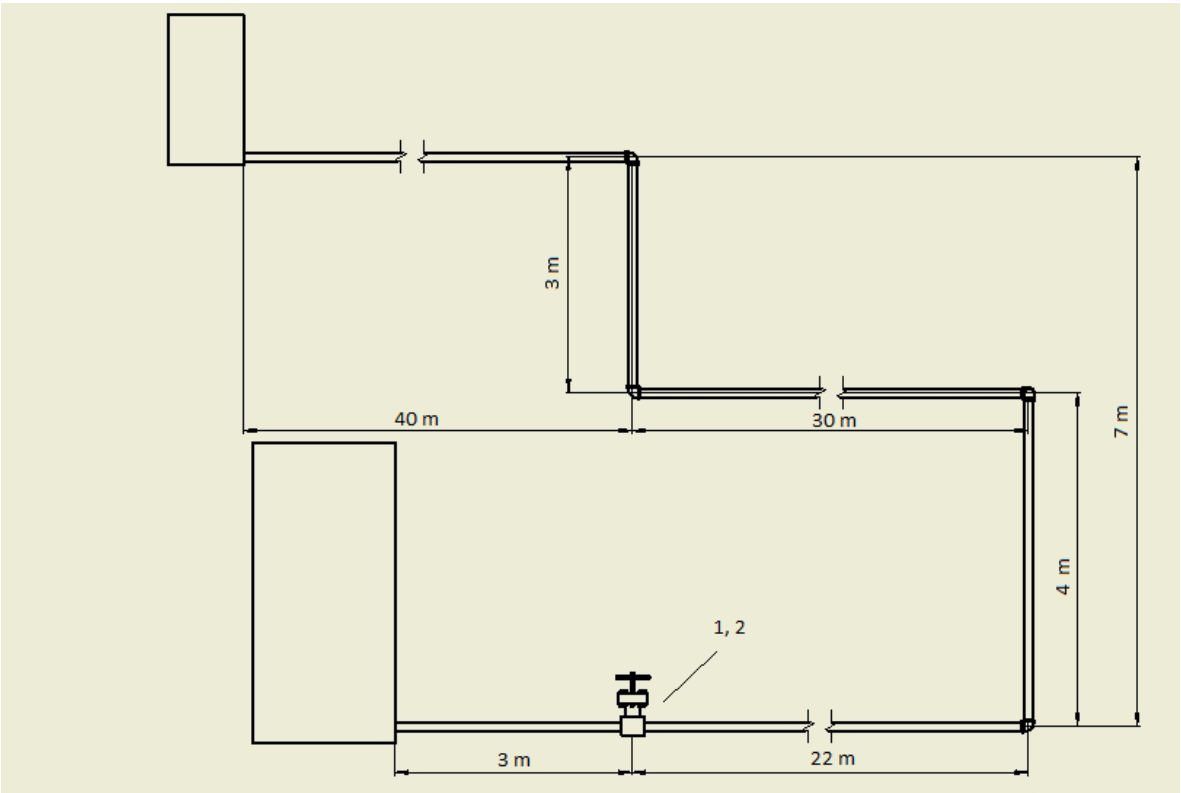


Figura 3.7. Esquema del sistema de suministro, vista lateral. Fuente (Elaboración propia)

Donde:

1: sistema de bombeo

2: válvula de globo

Se trabaja con aceites usados a 85 °C al cual le corresponde una viscosidad cinemática (μ) de 2.56×10^{-5} Pa/s, y una densidad de 861.4 kg/m^3 . Nótese que debido a que la temperatura del aceite es mayor, la viscosidad del fluido baja notablemente. Es por esto que el flujo tanto en el tramo de succión como de descarga es turbulento.

Una vez más se aplica el método anteriormente expuesto se llega a la ecuación 2.8:

$$H_{\text{sist.}} = A + BQ^2 \tag{2.8}$$

$$H_{\text{sist.}} = 120.8 + 12\,373.7 Q^2$$

Como ya se explicó anteriormente el tanque de uso diario se encuentra a presión ambiente y se debe entregar el fluido a una presión de 10 bares al tanque presurizado en la planta de dosificación. Con estos resultados y auxiliándose de la herramienta Excel se pasa a graficar la curva del sistema:

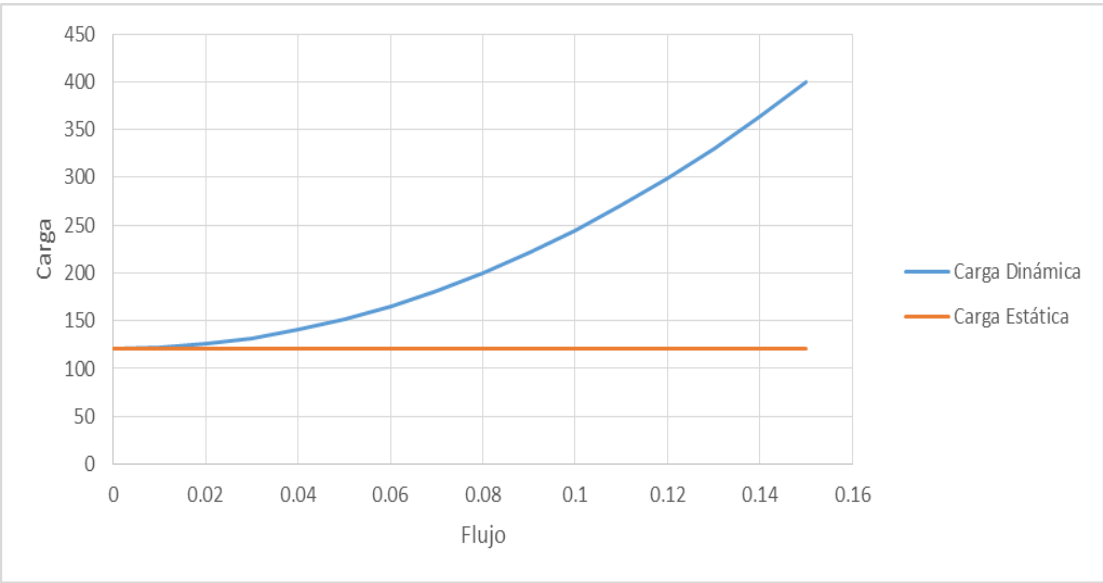


Figura 3.8. Curva del sistema de suministro. Fuente (Elaboración propia)

Una vez más se utiliza el programa Pump-Flo de la compañía Engineered Solutions Inc. Se realizó una búsqueda de bombas que cumplieran con las exigencias del sistema. A continuación, se ofrecerán los datos de la bomba seleccionada perteneciente al fabricante Franklin Electric.

- Tamaño: 4x6-10
- Modelo: HC-4X6-10-BF-M
- Q max: 431.5 m³/h
- H max: 136.7 m
- P max: 24.1 bar
- T max: 100 °C
- NPSHr: 2.68 m
- Eff: 62 %
- Potencia: 57 kW
- r.p.m :3550

A continuación, se muestra la gráfica del punto de operación de la bomba.

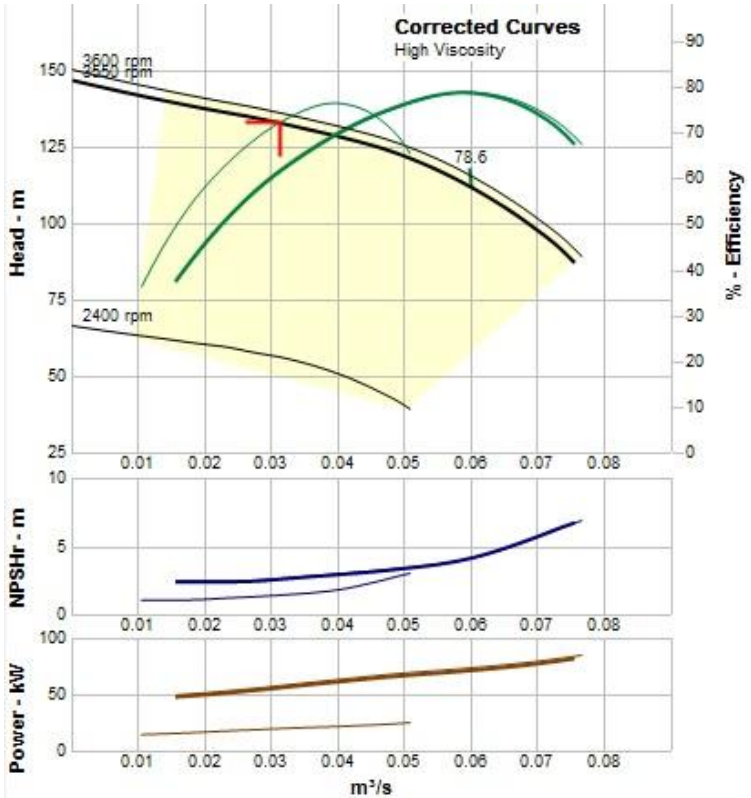


Figura 3.9. Punto de operación de la bomba de suministro. Fuente (Software Pump-Flo)

El fabricante suministra además el esquema de ensamble de la bomba, así como sus dimensiones:

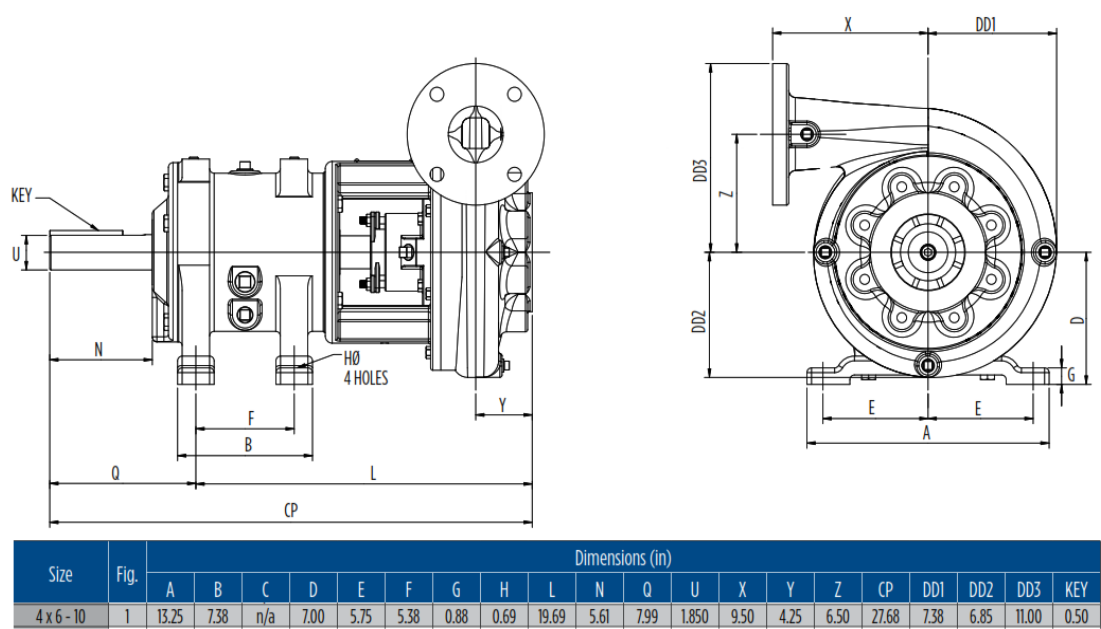


Figura 3.10. Esquema de ensamble de la bomba de suministro. Fuente (Catálogo de Franklin Electrical 10 inch).

3.2.3. Recirculación

Se hace recircular el aceite manteniendo un flujo de 57.6 m³/h en el tanque de recepción, con el fin de mantener la homogeneidad del mismo, a velocidades de succión y descarga de 3.2 y 4.8 m/s respectivamente. Como este sistema de bombeo no existía fue necesario seleccionar las tuberías para la succión y descarga de acuerdo a la metodología expuesta en el anterior capítulo. Se seleccionaron tuberías de acero inoxidable SCH 40 de 80 mm y 65 mm para la succión y descarga respectivamente. Para una mejor comprensión del caso de estudio se confeccionará un esquema preliminar del sistema en el que se especificarán también los accesorios utilizados.

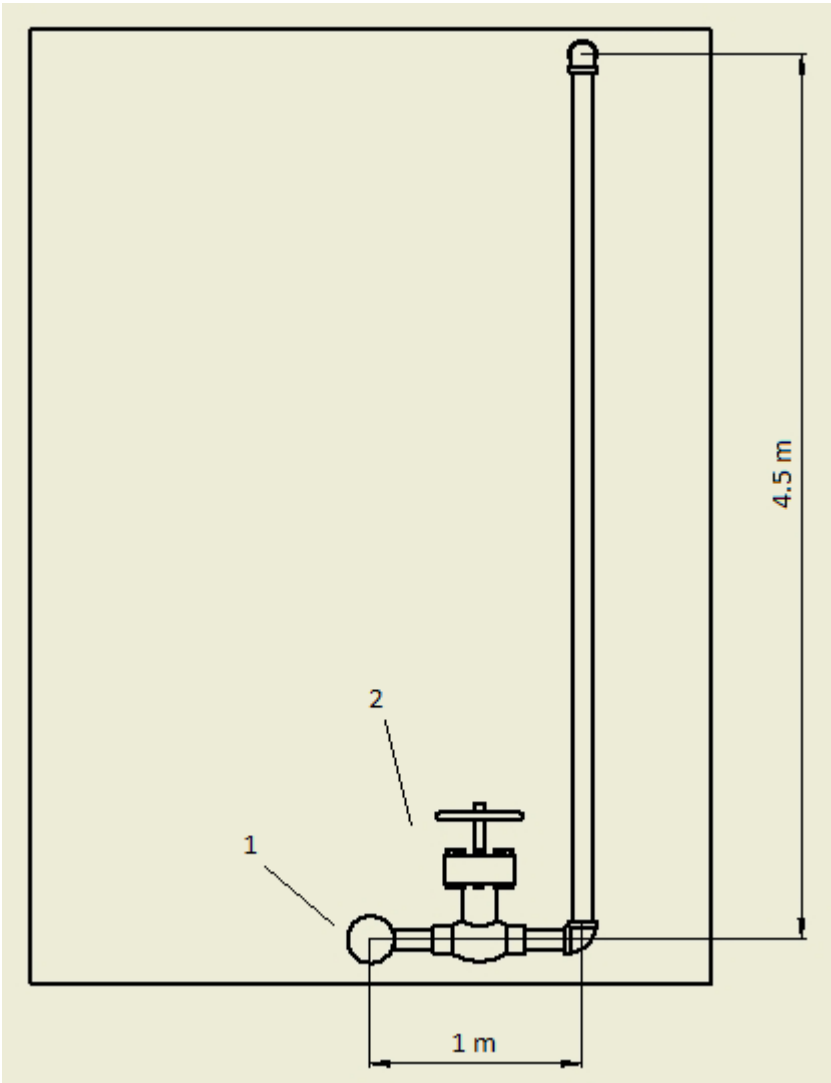


Figura 3.11. Esquema del sistema de recirculación, vista frontal. Fuente (Elaboración propia)

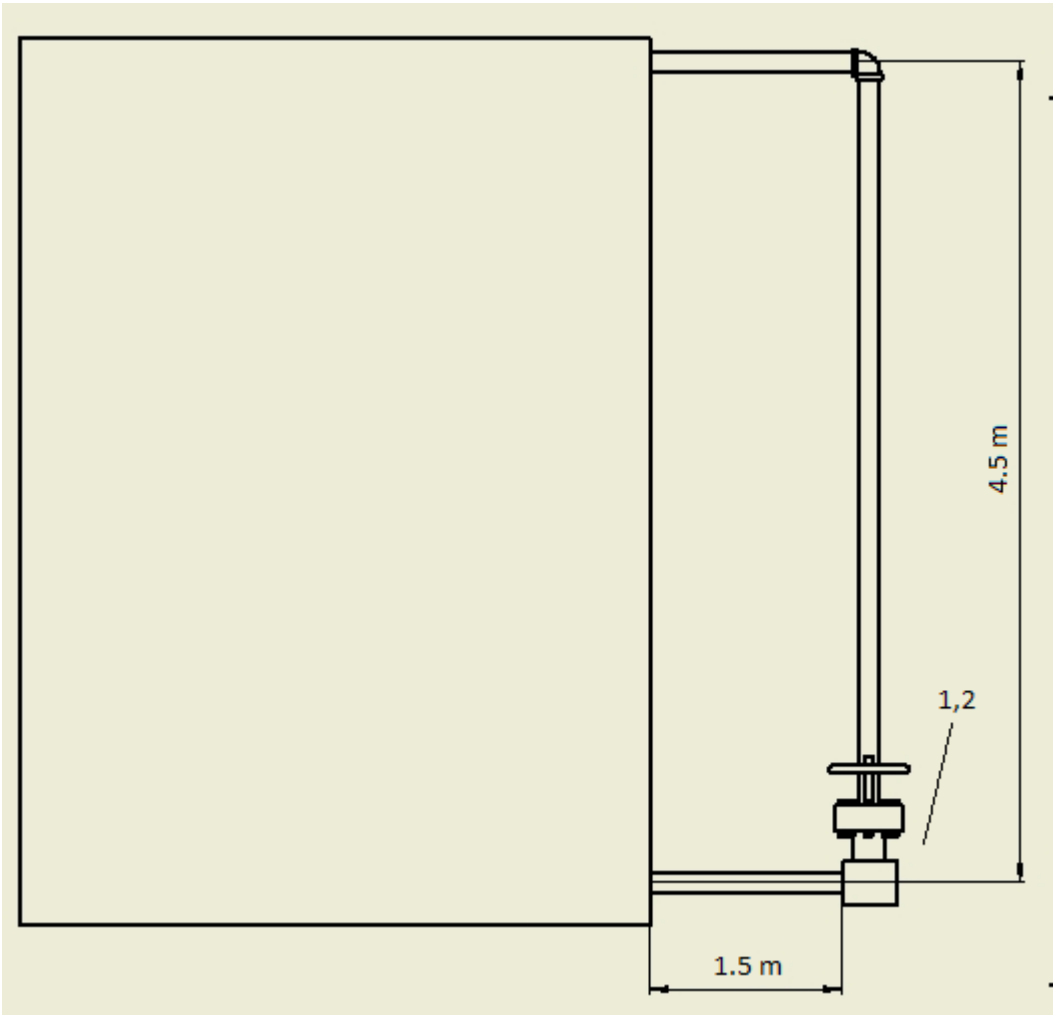


Figura 3.12. Esquema del sistema de recirculación, vista lateral. Fuente (Elaboración propia)

Donde:

1: sistema de bombeo

2: válvula de globo

Se trabaja con aceites usados a 35 °C al cual le corresponde una viscosidad cinemática (μ) de 2.56×10^{-5} Pa/s, y una densidad de 861.4 kg/m^3 . El flujo tanto en el tramo de succión como de descarga es turbulento.

Una vez más se aplica el método anteriormente expuesto se llega a la ecuación 2.8:

$$H_{\text{sist.}} = A + B Q^2 \tag{2.8}$$

$$H_{\text{sist.}} = 1 + 66\,797 Q^2$$

La carga estática para este sistema es la diferencia entre la altura de la superficie del fluido y el punto de descarga en el tanque. Con estos resultados y auxiliándose de la herramienta Excel se pasa a graficar la curva del sistema:

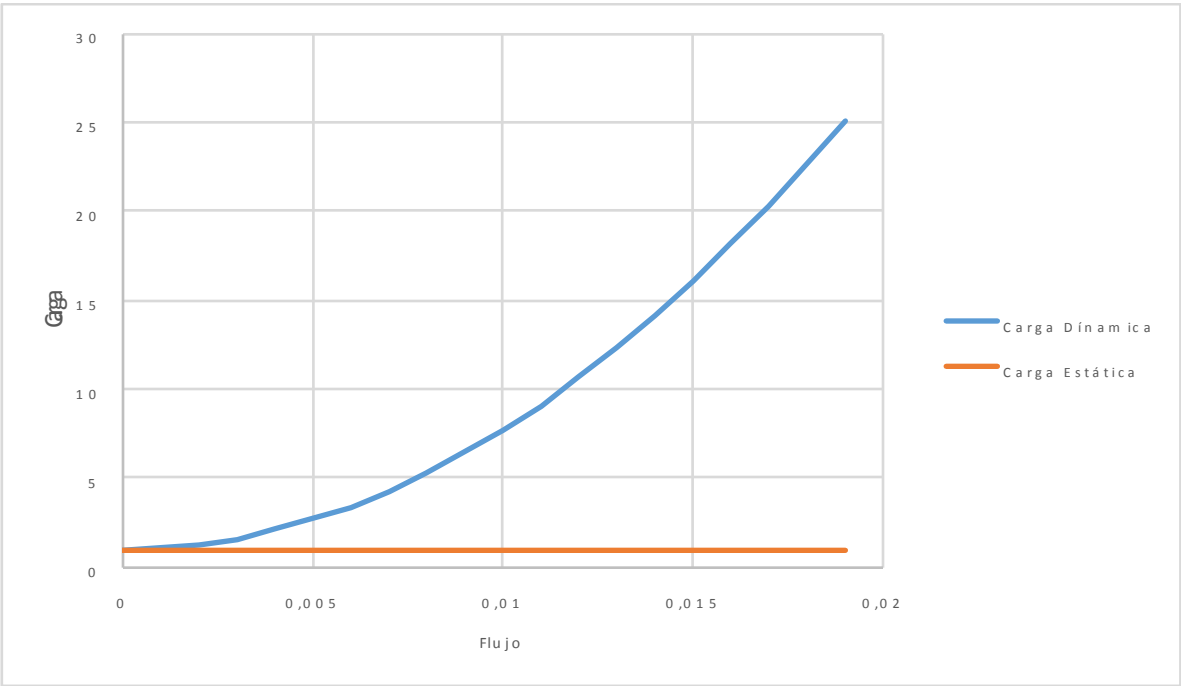


Figura 3.13. Curva del sistema de recirculación. Fuente (Elaboración propia)

Una vez más se utiliza el programa Pump-Flo de la compañía Engineered Solutions Inc. Se realizó una búsqueda de bombas que cumplieran con las exigencias del sistema. A continuación, se ofrecerán los datos de la bomba seleccionada perteneciente al fabricante Franklin Electric.

- Tamaño: 3x4-9
- Modelo: HC-3X4-9-BF-M
- Q max: 454.25 m³/h
- H max: 79.2 m
- P max: 17.2 bar
- T max: 100 °C
- NPSHr: 3.54 m
- Eff: 49 %
- Potencia: 5.13 kW
- r.p.m: 1800

A continuación, se muestra la gráfica del punto de operación de la bomba.

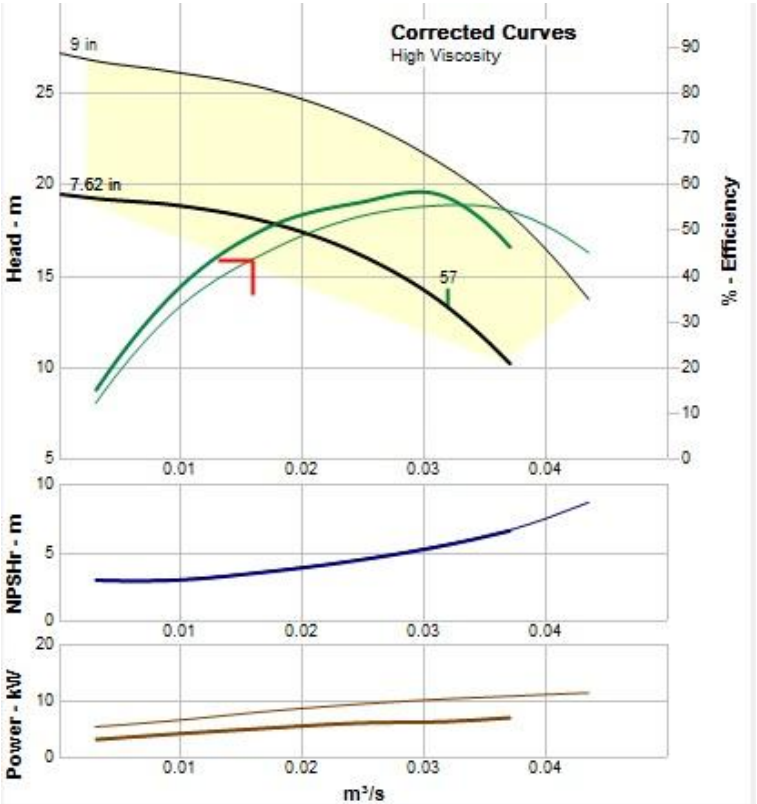


Figura 3.14. Punto de operación de la bomba de recirculación. Fuente (Software Pump-Flo)

El fabricante suministra además el esquema de ensamble de la bomba, así como sus dimensiones:

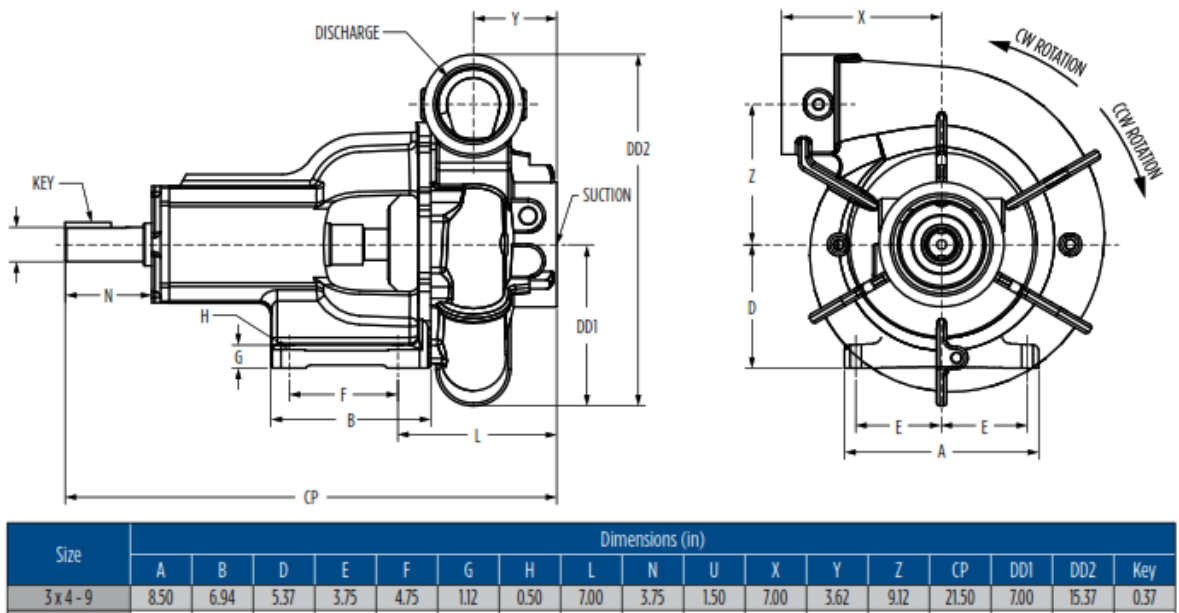


Figura 3.15. Esquema de ensamble de la bomba de recirculación. Fuente (Catálogo de Franklin Electrical 10 inch).

3.2.4. Calentadores eléctricos

Con el fin de seleccionar el calentador eléctrico es necesario calcular primero la potencia necesaria para calentar el flujo bombeado a temperatura ambiente desde el tanque de almacenamiento diario hasta la boquilla del horno ($0.0314\text{ m}^3/\text{s}$) hasta una temperatura de $85\text{ }^{\circ}\text{C}$.

En sistemas donde los cambios de energía cinética y no se aplica trabajo sobre el mismo se pueden considerar sistemas de flujo estacionario y el comportamiento del flujo de calor se puede describir mediante la ecuación 2.18 (Cengel, 2006):

$$\dot{Q} = \dot{m} \times \Delta h \tag{2.18}$$

Donde:

Q : es flujo másico dado en kW .

m : es el flujo másico en kg/s

Δh: es la diferencia de entalpia en kJ/kg

Conociendo el Cp del aceite (1.9 kJ/kg*K) (Cengel y Boles, 2011) se puede determinar la variación de entalpia para dos temperaturas dadas. Sustituyendo en la ecuación se obtiene la ecuación 2.19:

$$\dot{Q} = \dot{m} \times C_p \times (T_2 - T_1) \tag{2.19}$$

$$\dot{Q} = 1\,434.43\,kW$$

Una vez que se conoce el flujo calórico necesario y con ayuda de catálogos se pasa a seleccionar el calentador. Se selecciona un calentador de inmersión eléctrico estándar con las siguientes características:

Calentador de inmersión ACIM JOUANIN constituido de 3 alfileres calentadores, soldados sobre una brida DN 80 PN 16 FS, de acero o acero inoxidable, según las características de los alfileres.

- Material de los alfileres: acero inoxidable 321.
- Potencia 1500 W
- Longitud de inmersión LT: 545

Se proporciona los esquemas de ensamble del calentador:

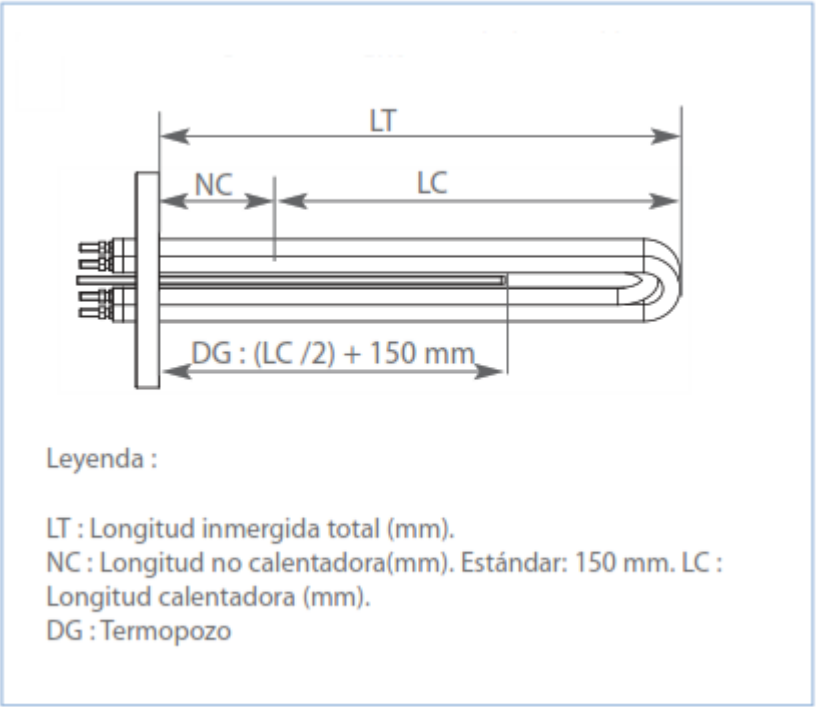


Figura 3.16. Esquema de ensamble del calentador de inmersión. Fuente (Catálogo de calentadores de inmersión ACIM JOUANIN)

También el de la brida

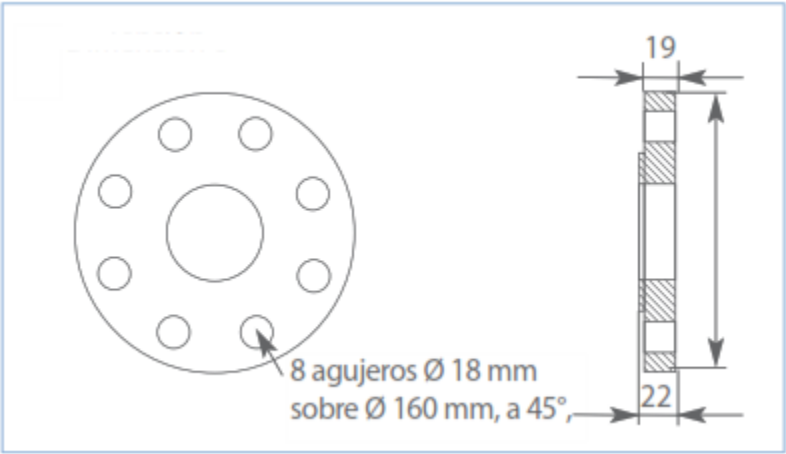


Figura 3.17. Esquema de ensamble de la brida del calentador de inmersión. Fuente (Catálogo de calentadores de inmersión ACIM JOUANIN)

3.3. Cavitación

Para evitar este fenómeno se debe asegurar que la bomba seleccionada pueda cumplir con los requisitos de carga y flujo demandados por el sistema. Los catálogos proporcionan el valor de la altura neta positiva requerida ($NPSH_{req}$) por la bomba y luego, tomando como referencia los diagramas del sistema de bombeo, se calcula la altura neta positiva disponible ($NPSH_{disp}$).

Una vez seleccionadas las bombas y teniendo los valores de ($NPSH_{req}$) (tabla 3.1) se procede a realizar los cálculos para la comprobación de cavitación utilizando la metodología anteriormente expuesta.

Tabla 3.1. Valores de NPSH requerido de las bombas seleccionadas. Fuente (Elaboración Propia)

	Trasiego	Suministro	Recirculación
$NPSH_{req}$	1.8 m	2.68 m	3.54 m

A continuación, se darán de forma resumida los resultados obtenidos mediante la utilización de las Ecuaciones 2.15 y 2.16:

Tabla 3.2. Valores de NPSH disponible de las bombas seleccionadas. Fuente (Elaboración Propia)

	Trasiego	Suministro	Recirculación
P_E	83 117 Pa	96 366 Pa	97 389 Pa
P_{st}	6 060	55 230	6 060
$NPSH_{disp}$	8.86 m	4.87	10.51

Los valores de presión del vapor (P_{st}) fueron obtenidos de (Cengel, 2006). Como se puede observar el ($NPSH_{disp}$) > ($NPSH_{req}$) para las tres bombas, incluyendo un cierto margen de error.

3.4. Potencia requerida

Si bien el software con el que se seleccionó la bomba Pump-Flo provee lo potencia requerida para cada bomba, a continuación, se pasará a comprobar dichos valores con los que se obtienen a partir de la metodología expuesta en el capítulo 2. Los valores de potencia en los puntos de operación son los siguientes:

Tabla 3.3. Valores de la potencia requerida de las bombas seleccionadas proporcionadas por el software Pump-Flo. Fuente (Elaboración Propia)

	Trasiego	Suministro	Recirculación
P _{req}	10.5 kW	57 kW	5.13 kW

Aplicando la Ecuación 2.17 se pueden obtener los siguientes valores de potencia requerida:

Tabla 3.3. Valores de la potencia requerida de las bombas seleccionadas. Fuente (Elaboración Propia)

	Trasiego	Suministro	Recirculación
P _{req}	10.6 kW	56.19 kW	5.14 kW

Como se puede comprobar los valores calculados se acercan bastante a los proporcionados por el software.

3.5. Análisis de ahorro de combustible.

Como se explicó anteriormente uno de los mayores gastos en una fábrica de cemento viene dado por los gastos en combustible. Los costos se analizarán en base al combustible necesario para alcanzar la demanda de 2 460 000 000 kcal/día utilizadas en la producción del clinker en el horno rotatorio.

Suplir la demanda de combustible solamente con petcoke conlleva grandes cantidades del mismo pues, conociendo que el petcoke tiene un poder calórico de 7 650 kcal/kg se puede calcular que se necesitan 321,5686 ton/día. Si a esto se le añaden los gastos de los precalcinadores y otros gastos en que se pueda incurrir, se puede estimar una demanda diaria de 325 ton/día.

Teniendo el petcoke un costo de 143 USD/ton, la fábrica de cemento gasta 46 475 USD diariamente en combustible. Si se toma en cuenta que la fábrica cuenta al año con días de mantenimiento en los que se detiene la producción y sin contar las paradas provocadas por roturas, se trabajan al año 330 días, con lo que se tiene un estimado de 15 336 750 USD/año.

Partiendo de estos datos se pasará a analizar los ahorros en petcoke y por tanto financieros, si se aplica el coprocesamiento. Si se aplica una relación de 70-30% , petcoke-aceite se dejarán de utilizar 97,5 ton/día de petcoke con un ahorro aproximado de 13 942,5 USD/día o de 4 601 025 USD/año.

A continuación, se presentan resumidamente estos valores.

Tabla 3.1. Ahorro por sustitución de combustible. Fuente (Elaboración propia)

% de Aceite	Petcoke (ton)	Ahorro de petcoke (ton/día)	(USD/día)	(USD/mes)	(USD/año)
30	227.5	97.5	13 942.50	418 275.00	4 601 025.00

Estos valores no toman en cuenta el costo del aceite que, si bien se dijo anteriormente que es un material de desecho, este debe ser pagado a CUPET por su transporte desde la refinería de Cienfuegos.

De acuerdo con los datos ofrecidos por el departamento de economía de la fábrica, la tarifa actual entre CUPET y Cementos Cienfuegos es de 3,5 USD/km por flete y dado que la distancia entre la refinería y la fábrica de cemento es de aproximadamente 20,5 km se tiene un costo por flete de 71,75 USD. El tanque de almacenamiento tiene un volumen de 5 000 m³, lo que equivale a 4 415 toneladas de aceite, lo que representa 45 días de trabajo aproximadamente. El llenado del tanque de almacenamiento cuesta 7 000 USD, por lo que para un día serían 155.55 USD. Estos valores se traducen en los costos representados en la siguiente tabla.

Tabla 3.2. Gastos por Flete. Fuente (Elaboración propia)

(USD/día)	(USD/mes)	(USD/año)
155.55	4 666.5	51 331.5

En la siguiente tabla se hace una sencilla relación ente ganancias y pérdidas en las que se obtienen los ahorros totales.

Tabla 3.3. Ahorros Totales. Fuente (Elaboración propia)

(USD/día)	(USD/mes)	(USD/año)
13 786.95	413 608.5	4 549 693.5

Hay que tener en cuenta que estos valores solo representan los ahorros que se obtendrán a causa de la sustitución del combustible y no toman en cuenta las inversiones necesarias para poder implementar el uso del aceite como combustible alternativo.

3.6.Costos de inversión de la instalación

A continuación, se hace una relación de los costos de inversión para la compra de los equipos, tuberías y accesorios necesarios para la instalación. Se debe tener en cuenta que la mayor parte de las tuberías ya existen por los que solo se incluirán los tramos que deben ser instalados. La Tabla 3.3 muestra un listado de los materiales que serán necesarios para la construcción del sistema.

Tabla 3.3. Listado de materiales necesarios para la construcción del nuevo sistema. Fuente (Elaboración propia)

MATERIAL	CANTIDAD	PRECIO
Tuberías	57.5 m	2.2 USD /m
Curva de 90°	17	45 USD
Válvula de globo	3	50 USD
Válvula de cierre automático	1	25 USD
Rejilla	1	48 USD
Bomba tipo HC-4X3-75-BF-M	1	6 690 USD
Bomba tipo HC-4X6-10-BF-M	1	9 152 USD
Bomba tipo HC-3X4-9-BF-M	1	3 166 USD
Calentador de inmersión DN 80 PN 16 FS	1	220 USD
TOTAL		20 342.5 USD

El precio total de los materiales de construcción no excede los \$ 50 000, siendo el costo total para la implementación del nuevo sistema de bombeo \$ 20 342.5.

3.7. Impacto Medioambiental

Los principales problemas ambientales asociados con la producción del cemento son las emisiones atmosféricas y la contaminación del suelo y aguas subterráneas producida por la manipulación y almacenamiento del polvo de desecho de las operaciones del horno. Las descargas de aguas residuales normalmente se limitan a escurrimientos superficiales y al agua de refrigeración, y por lo general no contribuyen substancialmente a la contaminación del agua.

Los análisis de las emisiones de hornos de cemento en busca de la presencia de compuestos orgánicos durante la incineración de materiales peligrosos se llevan a cabo desde la década de 1970, cuando se empezó a utilizar los hornos de cemento para la combustión de desechos. Algunos de estos primeros análisis en hornos de los Estados Unidos, Suecia y Noruega, y confirmaron la capacidad de los hornos de cemento para destruir los componentes orgánicos de los desechos introducidos. Por ejemplo, la EDE típica obtenida para compuestos como el cloruro de metileno, el tetracloruro de carbono, el triclorobenceno, el tricloroetano y los PCB es del 99,995% y superior (Karstensen, 2009).

Se han realizado estudios de emisiones globales cuando se quema un combustible convencional como el carbón, y cuando se introducen desechos peligrosos, y generalmente las conclusiones indican que no se han podido detectar diferencias significativas en el uso de ambos combustibles. Así, por

ejemplo, se observó que no se detectó un aumento estadísticamente significativo en las tasas de emisión cuando se quemó el combustible procedente de los desechos (en oposición al carbón) (Hendriks, Worrell, Jager, Blok, y Riemer, 2004).

3.7.1. Resultados de ensayos de incineración recientes

En 2003 se realizó en Vietnam un ensayo de incineración con dos compuestos clorados insecticidas caducados que se introdujeron a una velocidad de dos toneladas por hora a través del quemador principal. La EDE (eficiencia de destrucción y eliminación) para los insecticidas introducidos fue superior al 99,99999%.

En un ensayo de incineración de tres días que se realizó en Sri Lanka en 2006 se demostró que el horno de cemento era capaz de destruir los PBC de manera irreversible y ambientalmente racional sin provocar ninguna nueva formación de PCDD/PCDF o HCB. La eficiencia de destrucción y eliminación (EDE) fue superior al 99,9999% a la máxima velocidad de alimentación de PBC (Karstensen, 2012).

En Venezuela, en 2007, se llevó a cabo un ensayo de incineración de cinco días con suelo contaminado con contaminantes orgánicos persistentes en un horno de cemento. El suelo estaba contaminado con niveles relativamente bajos de varios plaguicidas clorados, siendo los principales aldrina, dieldrina y endrina (hasta un máximo de 551 mg/kg). Las mediciones mostraron los mismos niveles bajos de dieldrina en el gas de la chimenea (0.019 µg/Nm³) cuando se introdujo suelo no contaminado y cuando el horno se alimentó con 2 t/h de suelo contaminado que contenía hasta 522 mg de dieldrina/kg. Por lo tanto, se puede suponer que la EDE medida de 99,9994% obtenida con la mayor concentración de alimentación es, probablemente, más alta en realidad (Lauber, 2012).

En un estudio reciente se evaluaron más de 2.000 mediciones de PCDD/PCDF en hornos de cemento y se observó que la mayoría de los hornos de cemento modernos que realizan coprocesamiento de desechos incluyendo desechos orgánicos peligrosos) pueden cumplir con niveles de emisión de 0,1 ng de PCDD/PCDF (IPPC, 2003).

En la presentación en el V Foro de Cambio Climático (Vallina García, 2016) se citan los principales estudios e investigaciones sobre el tema llegando a las siguientes conclusiones:

- 1 Estudios científicos específicos confirman que las emisiones del horno no aumentan cuando se cambia el combustible para incluir combustibles obtenidos a partir de ciertos residuos.
- 2 Actividad aceptada como segura para el medioambiente y la salud por organismos del máximo prestigio a nivel internacional.

3.8. Conclusiones del Capítulo

1. De acuerdo a la metodología descrita en el capítulo 2, se seleccionaron las bombas y el calentador eléctrico, que se instalarán en el sistema de bombeo del aceite usado. Además, se realizaron los cálculos de comprobación de cavitación y potencia respectivamente.
2. A partir del análisis económico realizado, se demostró la factibilidad energética y económica del sistema propuesto. Se disminuyen los costos de producción por concepto de combustible, aumentando la competitividad de la Industria del Cemento.
3. Las concentraciones de metales pesados y demás contaminantes en las emisiones, no serán significativamente diferentes entre ambos combustibles.

Conclusiones

1. El diseño de un sistema de bombeo para el suministro de los aceites usados al horno, permite que estos sean utilizados como combustible alternativo.
2. Mediante el estudio de la factibilidad económica de la aplicación del coprocesamiento en Cementos Cienfuegos S.A. se demostró lo ventajoso de la instalación del sistema de bombeo.
3. Se demostró que la utilización del aceite, como combustible alternativo en el horno de cemento, no ocasiona un problema ambiental.

Recomendaciones

- 1 El coprocesamiento ofrece ventajas significativas para muchos otros sectores industriales, por lo que se debe promover más allá de la industria cementera, como una oportunidad para que muchos sectores industriales contribuyan a la preservación de los recursos naturales.
- 2 Actualmente la sustitución del petcoke por aceite se realiza mediante una relación másica, es decir, se sustituye el 30 % de la masa del petcoke por aceite. Por lo que se recomienda realizar esta sustitución basada en el poder calórico, con lo cual se obtendrá un valor más exacto de la cantidad de aceite equivalente al 30 % del petcoke.

B i b l i o g r a f í a

1. AFELMA, & ANDIMAI. (2016). Guía de buenas prácticas en el aislamiento industrial. Comunidad de Madrid.
2. Alsop, P.A., Chen, H., Arthur L., Jackura, A, McCabe, M., & Tseng, H. (2005). *The Cement Plant Operations Handbook* (Fourth Edition.). Design and Proofing: Mary Flack.
3. ANSI/HI. (2010). ANSI/HI 9.6.7-2010 Effects of liquid viscosity on rotodynamic (Centrifugal and vertical) pump performance.
4. CEMBUREAU. (2004). Guidelines on Co-Processing of Waste Materials in Cement Production. CEMBUREAU.
5. Cengel, Y.A. & Boles, M.A. (2011). *Termodinámica* (Séptima Edición.). McGraw-Hill.
6. Cengel, Y.A. & Cimbala, J.M. (2006). Fluid Mechanics. Fundamentals and Applications. Higher Education.
7. Cengel, Y.A. (2006). *Heat transfer. A Practical Approach* (Second Edition.).
8. CRANE. (2003). Flujo de Fluidos en Válvulas, Accesorios y Tuberías. McGraw-Hill.
9. Daily, J.W. & Harleman, D.R. F. (1975). *Dinámica de los fluidos con aplicaciones en la ingeniería*. México: Trilla.
10. EVERWATT Group. (2018). Resistencias eléctricas industriales. Retrieved from <http://www.resistencias-electricas.com/productos/fluidos/resistencias-de-haz-tubular-para-inmersion/>
11. García Santos, N. (2010, diciembre). Emplean en Cuba aceites usados como combustible. *Juventud Rebelde*. Santa Clara (Villa Clara).
12. GTZ-Holcim. (2006). Guía para el Co-Procesamiento de Residuos en la Producción de Cemento.
13. Hendriks, C.A., Worrell, Jager, E.D., Blok, K. & Riemer, P. (2004, August 23). Emission Reduction of Greenhouse Gases from the Cement Industry. IEA Greenhouse Gas R&D Programme.
14. Huang, Q, Yang, Y, & Wang, Q. (2012, November 26). Potential for Serious Environmental Threats from Uncontrolled Coprocessing of Wastes in Cement Kilns. *Environmental Science & Technology*. Retrieved from [dx.doi.org/10.1021/es3042274](https://doi.org/10.1021/es3042274)
15. Instrumentación de bombas. (2012). *Instrumentación de bombas*. Retrieved from <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/es/maquinas/hidraulicas/instrumentacionbombas/instrumentacionbombas.html>
16. IPPC. (2003, July). Reference Document on the General Principles of Monitoring.
17. Jaramillo, O. A. (2007). *Intercambiadores de Calor*. Universidad Nacional Autónoma de México.

- 18.Kääntee, U., Zevenhoven, R., Backman, R., & Hupa, M. (2002). Cement Manufacturing Using Alternative Fuels and the Advantages of Process Modelling. Helsinki University of Technology.
- 19.Karstensen, K.H. (2009, November 6). Recopilación de los resultados de verificaciones de rendimiento y ensayos de combustión en hornos de cemento.
- 20.Karstensen, K.H. (2012, September 29). Co-processing of alternative fuels and raw materials and treatment of organic hazardous wastes in Cement kilns – International experiences and best practice.
- 21.Lauber J.D. (2012). Burning Chemical Wastes as Fuels in Cement Kilns. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 771–777.
- 22.Martínez Díaz, L. & Jáuregui, J. (2007). Mecánica de los Fluidos y Máquinas de Flujo. Texto Básico para la Maestría en Eficiencia Energética.
- 23.McGraw-Hill. (2001). *Pump Handbook* (Third Edition).
- 24.McNaughton, K.J. (2002). *BOMBAS. Selección, uso y mantenimiento*. McGraw-Hill.
- 25.Mokrzycki E. & Uliasz-Bochen A. (2002). Alternative fuels for the cement industry. Mineral and Energy Economy Research Institute of the Polish Academy of Sciences. Retrieved from www.elsevier.com/locate/apenergy
- 26.Moncada Albitres, Luis. (n.d.). *Intercambiadores de Calor*. Trujillo (Peru).
- 27.Murray, A, & Price, L. (2008, June 30). Use of Alternative Fuels in Cement Manufacture: Analysis of Fuel Characteristics and Feasibility for Use in the Chinese Cement Sector. Ernest Orlando Lawrence Berkeley national laboratory. Retrieved from <https://escholarship.org/uc/item/8sf9s522>
- 28.Ramos Páez, N. (1989). *Bombas, Ventiladores y Compresores* (CUJAE.).
- 29.Reyes Martínez, S. (2010). Análisis Técnico Económico-Ambiental del Coprocesamiento de Desechos en los Hornos de Cemento de Cuba. CUJAE. Retrieved from <http://www.e-libro.com/titulos>
- 30.Shames, I.H. (1995). *Mecánica de los Fluidos* (Third Edition.). McGraw-Hill.
- 31.Simón de la Rosa, I. & Pardo Rodríguez, E. (1982). *Generadores de Vapor* (UCLV.).
- 32.Sistemas hidroneumáticos C.A. (2005). Manual de procedimiento para el cálculo y selección de sistema de bombeo.
- 33.Torabi, R, & Nourbakhsh, S.A. (2016, March). The effect of viscosity on performance of a low specific speed centrifugal pumps. University of Tehran.
- 34.UNEP. (2011). Directrices técnicas sobre el coprocesamiento ambientalmente racional de los desechos peligrosos en hornos de cemento. Presented at the Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación, Cartagena (Colombia).
- 35.Vallina García, D. (2016). Coprocesamiento en la industria cementera. Garantías de seguridad y salud. Presentado en el V Foro de Cambio Climático, España.

A n e x o s

Anexo 1 Selección de la bomba de acuerdo al fluido de Trabajo

TIPO DE BOMBA	FLUIDOS LIMPIOS				FLUIDOS CONTAMINADO				Pastas papeleras	Pastas y grasa	Fluidos delicados
	Agua y soluciones acuosas	Accites	Accites viscosos	Muy viscosos	Sólidos blandos	Sólidos fibrosos	Sólidos abrasivos	Sólidos delicados.			
CENTRÍFUGAS											
Estándar	E	S	L	X	L	X	X	X	X	X	X
Revestida.	E	S	L	X	S	-	S	-	-	-	X
Inatascable	L	L	L	X	S	S	S	L	S	L	X
Sin alabes.	-	-	-	X	S	S	L	E	L	-	X
Auto cebante	E	S	-	X	L	-	-	-	-	-	X
Multicelular	E	S	-	X	-	-	-	-	-	-	X
REGENERATIVA	E	S	X	X	X	X	X	X	X	X	X
FLUJO MIXTO	E	S	-	-	L	-	-	-	-	-	-
FLUJO AXIAL	E	S	-	-	L	-	-	-	-	-	-
ALTERNATIVA											
De pistón	E	E	S	S	L	L	L	X	L	L	X
De embudo buzo	E	E	S	L	-	-	X	X	L	L	L
De pistón radial	L	E	S	L	-	-	X	X	-	-	-
ROTATIVA											
De engranajes	L	E	E	S	L	X	X	X	X	S	X
De rotor lobular	L	E	E	S	S	L	L	S	S	S	S
De paletas	S	E	S	L	-	X	X	X	L	L	L
De paletas para servicios pesados	-	-	-	-	E	L	E	L	S	S	S
De husillo simple	S	S	S	E	E	E	E	E	E	E	E
De husillos múltiple	S	E	E	S	-	-	-	-	-	-	-
ROTATIVA de paletas flexibles	E	E	L	X	S	L	L	X	L	L	L
DIAFRAGMA	E	E	S	L	E	S	E	S	S	S	S
PERISTÁLTICA	S	S	S	S	E	E	E	E	E	E	E
EYECTORA	S	L	X	X	X	X	X	X	X	X	X



Pinar del Río	
No.1	De cisterna de Empresa Comercializadora de Combustibles.
No.2	Mezcla de Empresas diferentes.
Habana - Ciudad Habana	
No.3	Mezcla de Gas Manufacturado.
No.4	Grupos Electrógenos de Aguacate.
No.5	Mezcla de Talleres Ciénaga.
Villa Clara	
No.6	Grupos Electrógenos Santa Clara 10
No.7	De cisterna de Empresa Comercializadora de Combustibles.
Cienfuegos	
No.8	Mezcla de Termoeléctrica de Cienfuegos.
Sancti Spiritus	
No.9	Mezcla de Transcupet, Refinería “Sergio Soto”
Ciego de Ávila	
No.10	De Base de Taxis
No.11	Grupos Electrógenos de Cayo Coco
Santiago de Cuba	
No.12	De Transcupet
Guantánamo	
No.13	De Emulsionadora
Holguín	
No.14	De Transporte Agropecuario
Granma	
No.15	De Empresa Comercializadora de Combustibles (Bayamo)
Camagüey	
No.16	Depósito 540
Las Tunas	
No.17	De Estructuras Metálicas
Zona Central	
No.18	Es una mezcla del año 2001 - 2002, aproximadamente

ENSAYO	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9	No. 10	No. 11
Viscosidad Cinem. a 50 °C, cts.	55,02	51,76	64,99	67,73	59,30	51,42	93,35	25,33	63,45	76,39	79,86
Azufre Frasco Comb., %m/m.	0,42	0,72	0,74								
Temp. Inflamación, CA, °C.	179										
Temp. Inflamación, CC, °C.		154									
Valor Calórico Neto, kcal/kg.	9891	9928	9918								
Densidad a 15°C.	0,8923	0,8946	0,8942		0,9056	0,8903	0,9096	0,8814	0,8976	0,8936	0,9146
Agua por Destilación, %v/v.	0,3	18	5	0,06*	2,28*	3,32*	35,72*		2,29*	1,40*	0,61*
Sedimentos por Extracción %m/m.	0,12	6,91	0,59			1,02	0,12		0,31	0,36	0,08

ENSAYO	No. 12	No. 13	No. 14	No. 15	No. 16	No. 17	No. 18	METODO
Viscosidad Cinem. a 50 °C, cts.	37,49	63,07	90,30	74,94	7,14	127,7	77,29	ASTM D 445
Azufre Frasco Comb., %m/m.	0,78	0,48	0,54	0,63	0,90	1,21	0,94	Burmanh 37
Temp. Inflamación, CA, °C.	-							ASTM D 92
Temp. Inflamación ,CC, °C.	90		98	126	30	182		ASTM D 93
Valor Calórico Neto, kcal/kg.	9920	9911	9910	9929	9924	9980	9921	ASTM D 4868
Densidad a 15°C.	0,8907	0,8942	0,9022	0,9047	0,8823	0,8932	0,8982	ASTM D1298
Agua por Destilación , %v/v.	1,6	46	4,1	7,81	1,1	0,05	3,0*	ASTM D 95
Sedimentos por Extracción %m/m.	0,12	0,28	0,27	0,29	0,05	0,09	0,19	ASTM D 473

* Volumen de agua determinada por deshidratación en Plantas Piloto.

Análisis por Absorción Atómica. Composición, ppm

No. Muestra	Ni	Cd	Cu	Zn	V	Pb	Mn	Cr
1	< 0,4	< 0,09	4,97	1420,0	< 5,0	2,02	0,46	< 0,5
2	< 0,4	< 0,09	17,59	490,1	< 5,0	27,08	2,21	9,69
16	2,50	< 0,09	< 0,3	43,0	< 5,0	< 0,6	0,14	0,28
17	5,51	< 0,09	5,04	14,91	< 5,0	< 0,6	2,0	< 0,5
14	< 0,4	< 0,09	27,58	804,1	< 5,0	21,72	2,65	4,44
15	2,06	< 0,09	21,0	562,3	< 5,0	42,24	< 0,2	3,92
12	3,34	< 0,09	17,87	820,8	< 5,0	23,84	< 0,2	2,90
13	4,39	< 0,09	24,60	1030,6	< 5,0	145,5	5,25	7,33
18	7,15	< 0,09	16,09	620,90	< 5,0	23,42	1,18	2,28



