

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería de Petróleo, Gas Natural y Petroquímica



TESIS

Evaluación de la tecnología termomecánico de limpieza de cortes de perforación, para habilitar el tratamiento y disposición de los desechos en el Zócalo Continental del Noroeste Peruano

Para Obtener el Título Profesional de
Ingeniero de Petróleo y Gas Natural

Elaborado Por

Héctor Daniel Calderón Gonzales

 [0009-0001-9035-0439](https://orcid.org/0009-0001-9035-0439)

Asesor

Ing. Adolfo Armando Rimac Bouby

 [0000-0001-6220-2597](https://orcid.org/0000-0001-6220-2597)

Lima – Perú
2025

Citar/How to cite	Calderón Gonzales [1]
Referencia/Reference	[1] H. Calderón Gonzales, “ <i>Evaluación de la tecnología termomecánico de limpieza de cortes de perforación, para habilitar el tratamiento y disposición de los desechos en el Zócalo Continental del Noroeste Peruano</i> ” [Tesis]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Calderón, 2025)
Referencia/Reference	Calderón, H. (2022). <i>Evaluación de la tecnología termomecánico de limpieza de cortes de perforación, para habilitar el tratamiento y disposición de los desechos en el Zócalo Continental del Noroeste Peruano</i> . [Tesis, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Agradecimiento

Mi agradecimiento a Dios por permitirme encaminar mi sendero por el rumbo de la ingeniería, a mi alma mater la UNI quien me dio las herramientas para el desarrollo de mi vida profesional, a mi asesor y revisor de tesis por el continuo apoyo desde mis primeros días como estudiante, a mi querida FIPP quien me acogió y me formo con un alto grado de conciencia científica y social durante la culminación de mi carrera universitaria y a todos aquellos que me abrazaron cuando todo parecía penumbras, Eduardo y Yenny, gracias totales.

Dedicatoria

A mi madre Fely, que me acompaña desde la eternidad, y a mi padre Héctor, por su amor y fortaleza inquebrantable. A mis hermanos Edwin y Milagros, a mis tíos Ciro y Victoria, y a mi sobrinito Víctor, por ser siempre el motor de mi vida con su cariño y constante motivación.

Resumen

Los recortes provenientes de la perforación de pozos en la industria petrolera constituyen un grave problema de contaminación ambiental a nivel mundial, al ser la principal fuente de desechos generados durante las operaciones de exploración y explotación de hidrocarburos. Estos recortes, compuestos por fluidos base agua o aceite, aditivos químicos y minerales del subsuelo, producen efectos ecológicos negativos al entrar en contacto con el ambiente. Aunque existen diversas tecnologías para el tratamiento de los desechos —biológicas, térmicas o mediante reinyección—, aún no se ha determinado de forma técnico-económica la alternativa más adecuada para el manejo y disposición de los recortes en las operaciones en aguas profundas del Zócalo Continental del Noroeste Peruano. A nivel internacional, los estudios identifican a la tecnología termomecánico TCC-Hammermill como el método más eficiente, ya que permite recuperar componentes reutilizables y minimizar el impacto ambiental. El presente proyecto de tesis tiene como objetivo establecer, de manera preliminar, la mejor alternativa para el tratamiento y disposición de los recortes en dicha zona, evaluando las condiciones técnicas, ambientales y económicas. La metodología contempla la identificación de las tecnologías aplicables, el análisis comparativo de su eficiencia y sostenibilidad, y la aplicación de una Matriz de Consistencia para seleccionar la opción más viable que asegure un impacto ambiental no significativo. Finalmente, se desarrollará un análisis económico de la tecnología más factible y se presentarán conclusiones y recomendaciones que contribuyan a la gestión ambientalmente responsable de los recortes de perforación en aguas profundas del litoral norte del Perú.

Palabras clave — Tecnología termomecánico, tratamiento de los desechos, disposición de los recortes, gestión ambiental.

Abstract

The cuttings generated during oil well drilling represent a major source of environmental pollution worldwide, as they constitute the largest amount of waste produced during hydrocarbon exploration and production operations. These cuttings, composed of water- or oil-based fluids, chemical additives, and subsurface minerals, cause negative ecological effects when exposed to the environment. Although several technologies for the treatment of drilling waste—including biological, thermal, and reinjection methods—are available, a technically and economically optimal alternative for the management and disposal of drill cuttings in deepwater operations of the Northwestern Peruvian Continental Shelf has yet to be determined. International studies have identified the thermomechanical technology TCC-Hammermill as the most efficient method, as it enables the recovery of reusable components while minimizing environmental impacts. This thesis project aims to preliminarily establish the best alternative for the treatment and disposal of drill cuttings in the study area, evaluating technical, environmental, and economic conditions. The methodology includes identifying applicable technologies, conducting a comparative analysis of their efficiency and sustainability, and applying a Consistency Matrix to select the most viable option that ensures a non-significant environmental impact. Finally, an economic analysis of the most feasible technology will be developed, followed by conclusions and recommendations that contribute to environmentally responsible management of drilling cuttings in the deepwater areas of Peru's northern continental shelf.

Keywords — Thermomechanical technology, waste treatment, drill cuttings disposal, environmental management.

Contenido

Pág.

Resumen.....	v
Abstract.....	vi
Introducción.....	xii
Capítulo I: Parte introductoria del Trabajo	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Problemática.....	2
1.3. Formulación del Problema	3
1.3.1. Problema General	3
1.3.2. Problemas Específicos	3
1.4. Objetivos de la Investigación	3
1.4.1. Objetivo General.....	3
1.4.2. Objetivos Específicos	4
1.5. Hipótesis de la Investigación.....	4
1.5.1. Hipótesis General	4
1.5.2. Hipótesis Específicas	4
1.6. Justificación de la Investigación	4
1.7. Identificación de Variables	5
1.7.1. Variable Independiente	5
1.7.2. Variables Dependientes.....	5
1.8. Tabla de Operacionalización de Variables.....	6
Capítulo II: Marco Teórico.....	8
2.1. Sistema de Control de sólidos.....	8
2.2. Tipos de fluidos de perforación	10
2.2.1. Fluidos de perforación a base de agua (WBF).....	10
2.2.2. Fluidos de perforación a base de aceite (OBF).....	10
2.3. Tecnologías para el manejo y disposición de recortes de perforación	10
2.3.1. Rellenos	11
2.3.2. Landfarming	11
2.3.3. TCC – Hammermill	12
2.3.4. Reinyección de recortes	13
2.4. TCC marino de MI SWACO – Hammermill.....	16

2.4.1.	Características destacadas	17
2.4.2.	Beneficios ambientales.....	18
2.4.3.	Funcionamiento de la tecnología TCC – Hammermill	18
2.4.4.	Ventajas operativas	20
2.5.	Limpiador de recortes Termomecánicos (TCC) BaraPhase.....	21
2.5.1.	Opciones de procesamiento térmico modulares y escalables para aplicaciones sensibles al medio ambiente.....	21
2.5.2.	Descripción General	21
2.5.3.	Características	21
2.5.4.	Aplicaciones	22
2.6.	Tecnología Alternativa TCC – Hammermill.....	24
2.6.1.	Alcances del proyecto	24
2.6.2.	Justificación de la Tecnología TCC.....	25
2.6.3.	Descarga de Detritus Limpio al Mar.....	26
2.7.	Descargas de cortes de perforación en el mar.....	30
2.7.1.	Tipos de NAF y Criterios de Descarga para la Disposición de los Cortes	32
2.8.	Componentes ambientales afectados por el uso del sistema TCC – Hammermill.....	35
2.8.1.	Calidad del agua de mar.....	36
2.8.2.	Calidad del sedimento marino	38
Capítulo III: Desarrollo del Trabajo de Investigación.....		40
3.1.	Tratamiento de Cortes de Perforación - Lote Z-38	40
3.2.	Ubicación.....	40
3.3.	Descripción del Proyecto	41
3.3.1.	Sistema de Control de Sólidos y Cortes	41
3.4.	Acciones Específicas para el Manejo de Residuos y/o Actividades del Plan de Manejo de Residuos	41
3.4.1.	Tratamiento y Descarga de Cortes de Perforación	41
3.4.2.	Ubicación de los Componentes: Secador de Cortes y Diagrama de Flujo del Proceso	42
3.5.	Manejo y Tratamiento de los Cortes.....	43
3.5.1.	Alcances del Proyecto	44
3.5.2.	Sustento del Proyecto	46

3.5.3. Análisis comparativo entre el Método Tradicional y el TCC Hammermill	47
3.5.4. Mejor Tecnología Disponible (BAT) y Mejor Práctica Ambiental (BEP) ..	49
3.6. Sistema Termomecánico para Limpieza de Cortes (TCC –Hammermill)	52
3.6.1. Descripción del proceso TCC-Hammermill	53
3.6.2. Componentes de un sistema TCC – Hammermill	58
3.6.3. Materiales Recuperados del Proceso TCC	62
3.6.4. Descarga de Polvo Limpio	64
Capítulo IV: Análisis Económico	66
Conclusiones.....	70
Recomendaciones.....	71
Referencias Bibliográfica.....	72

Lista de tablas

	Pág.
TABLA 1. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	6
TABLA 2. MATRIZ DE CONSISTENCIA.....	7
TABLA 3. RÉCORD DE RENDIMIENTO	20
TABLA 4. COSTO ESTIMADO DEL SECADOR DE CORTES.....	66
TABLA 5. COSTO ESTIMADO DE LA TÉCNICA TCC-HAMMERMILL	68
TABLA 6. ESTIMADO DE COSTOS DE AMBAS TECNOLOGÍAS.....	69

Lista de figuras

	Pág.
FIGURA 1. TCC COSTA AFUERA HMOLINO DE MARTILLO INSTALACIÓN DEL SISTEMA.....	16
FIGURA 2. INSTALACIÓN DEL SISTEMA CERRADO	17
FIGURA 3. INSTALACIÓN COSTA AFUERA DE BARAPHASE TCC	23
FIGURA 4. INSTALACIÓN DEL MODELO DE BARAPHASE TCC.....	23
FIGURA 5. UBICACIÓN DEL LOTE Z-38	40
FIGURA 6. FOTO REFERENCIAL DE LA INSTALACIÓN DEL SECADOR DE CORTES (CUTTING DRYER) EN EL MODU	42
FIGURA 7. DIAGRAMA DE FLUJO TÍPICO DEL SECADOR DE CORTES (CUTTING DRYER).....	43
FIGURA 8. CONFIGURACIÓN EN LÍNEA RECTA, MOSTRANDO LOS COMPONENTES	52
FIGURA 9. VISTA PANORÁMICA EN LINEA RECTA, MOSTRANDO LOS COMPONENTES.....	53
FIGURA 10. DIAGRAMA DEL TCC HAMMERMILL MOSTRANDO LOS COMPONENTES.....	55

Introducción

La industria de hidrocarburos enfrenta un desafío persistente: el manejo y la disposición de los recortes de perforación, flujo residual más voluminoso y potencialmente impactante de las operaciones, especialmente en contextos costa afuera y de aguas profundas. En el Zócalo Continental del Noroeste Peruano, donde convergen expectativas de hallazgos con exigencias regulatorias y ambientales, resulta impostergable adoptar tecnologías que reduzcan al mínimo la huella ecológica sin comprometer la eficiencia operativa ni la seguridad industrial. En este marco, la tecnología termomecánica TCC-Hammermill emerge como candidata a Mejor Tecnología Disponible (BAT) por su capacidad de recuperar fluidos y generar sólidos con muy bajo contenido de hidrocarburos, habilitando esquemas de disposición compatibles con estándares internacionales.

Si bien prácticas como rellenos en tierra, landfarming, tratamientos térmicos convencionales y reinyección de recortes han sido aplicadas con resultados variables, su desempeño en escenarios operativos exigentes presenta limitaciones técnicas, logísticas y ambientales. La evidencia reciente sugiere que el tratamiento in situ de recortes mediante TCC-Hammermill puede disminuir el riesgo por transporte, acotar costos asociados a la logística marítima y terrestre, y favorecer la reutilización de aceite base y agua, contribuyendo a una gestión más circular del sistema de lodos.

Esta tesis se propone evaluar, con rigor técnico-económico y ambiental, la viabilidad de implementar el TCC-Hammermill como alternativa para habilitar el tratamiento y la disposición de recortes en el Zócalo del Noroeste Peruano. Para ello, se estructura una comparación sistemática frente a tecnologías vigentes, priorizando criterios de desempeño (eficiencia de separación y recuperación), cumplimiento normativo, riesgos HSE y costos totales de ciclo de vida. La Matriz de Consistencia y la operacionalización de variables (fluido de perforación, litología, volumen de recortes,

entre otras) enmarcan el análisis y aseguran trazabilidad entre problema, objetivos e hipótesis.

Metodológicamente, el trabajo integra: (i) revisión crítica de antecedentes y normativas aplicables; (ii) caracterización de alternativas tecnológicas para manejo y disposición de recortes; (iii) análisis comparativo técnico-ambiental con enfoque de mejor práctica ambiental (BEP); (iv) evaluación de efectos esperados sobre componentes marinos (agua y sedimento) bajo supuestos operativos realistas; y (v) análisis económico de implementación, considerando recuperación de insumos, reducción logística y control de riesgos.

El aporte esperado es doble: proporcionar una base de decisión robusta para operadores y autoridades en el litoral norte del Perú, y evidenciar, con métricas verificables, la pertinencia de un esquema de tratamiento en origen que minimice descargas, transporte y exposición del personal, sin desatender la productividad del pozo. Con ello, se busca alinear competitividad operativa con gestión ambiental responsable, contribuyendo a una perforación más segura y sostenible en el ámbito nacional.

Capítulo I: Parte introductoria del Trabajo

1.1. Antecedentes

Kirkness y Garrick (2008), en el trabajo técnico *Treatment of Nonaqueous-Fluid-Contaminated Drill Cuttings—Raising Environmental and Safety Standards* (SPE-112727-MS), mencionan que se analizó el impacto ambiental generado por los recortes de perforación que vienen siendo procesados por muchos años en la industria petrolera canadiense, cumpliendo en parte con normas gubernamentales que regulan su disposición en locaciones costa afuera (*offshore*). Sin embargo, se llegó a la conclusión de que el transporte de grandes toneladas de recortes de perforación contaminados con hidrocarburos, generados en las plataformas de perforación costa afuera hacia locaciones en tierra firme usando ciertas facilidades para su procesamiento, implica un alto riesgo de seguridad y de contaminación en la industria.

Komposch, Apeland y Hovde (2009), en el artículo *Evaluation of Technologies for Offshore Drill Cuttings Treatment* (SPE-126333-MS), evalúan las tecnologías ya empleadas en el manejo y disposición de recortes de perforación costa afuera para determinar su efectividad en el proceso, uso de instalaciones y métodos para limitar las descargas, emisiones o residuos peligrosos al ambiente marino. Las tecnologías en estudio fueron la reinyección de recortes, los tratamientos térmicos y el transporte de recortes hacia tierra firme para su posterior tratamiento biológico. Se concluyó del estudio que las tecnologías mencionadas no han sufrido mejoras desde el año 2002, a excepción de los tratamientos térmicos, siendo el TCC-Hammermill (sistema termomecánico de limpieza de cortes) la mejor tecnología disponible para el tratamiento de recortes de perforación contaminados con fluidos no acuosos, generando impactos no significativos al medio ambiente.

Saeverud y Saebo (2003), en el artículo *Offshore Cuttings Re-Injection –*

Achieving Zero Discharge and Using the Best Available Technique (SPE-85296-MS), mencionan que, a raíz de la campaña de perforación efectuada en el año 2003 por la operadora Statoil costa afuera en aguas profundas de Noruega, y acorde con las regulaciones ambientales de ese país, la compañía debía encontrar la mejor tecnología disponible que permitiera el manejo y disposición de recortes de perforación, reduciendo a cero las emisiones de desechos contaminantes al medio marino.

El estudio describe el reto asociado por parte de Statoil mediante una revisión de diferentes escenarios tecnológicos. Finalmente, la mejor tecnología disponible que logro el equilibrio cero descargas fue el proceso TCC-Hammermill, capaz de manejar y disponer recortes en el mismo lugar de trabajo (In situ) reduciendo al máximo los desechos generados en las operaciones de perforación convencionales.

1.2. Problemática

Actualmente empresas transnacionales como Savia Peru, Gold Oil, BPZ Energy y Tullow Oil se encuentran desarrollando actividades de exploración petrolera en la parte norte del Zócalo Peruano abarcando las cuencas Talara y Tumbes respectivamente, siendo unos de los principales retos los 1000 metros de profundidad mar adentro, los cuales están dentro de la categoría de aguas profundas donde se espera excelentes resultados para el descubrimiento de reservas que permitirá un importante incremento en la producción nacional de hidrocarburos líquidos en el país, permitiendo recuperar la autosuficiencia energética en hidrocarburos a pesar de la incertidumbre en precios del petróleo.

Dichos recortes de perforación van a ocasionar que el Zócalo Peruano sea un área de alto riesgo a la contaminación, debido a la elevada toxicidad de estos desechos, que representa un daño potencial a la flora, fauna y la salud de las personas que habitan en las comunidades circundantes a las operaciones.

Actualmente se viene manejando la disposición de los cortes más gruesos obtenidos del proceso de perforación por medio de la descarga directa al mar desde la plataforma en la locación. Mientras que el sólido más fino se transporta a tierra firme y disponen en rellenos (Landfill) o en un PIT de confinamiento especialmente construido para dicho fin según la normativa en relación a la Ley General de Residuos Sólidos. La efectividad de este sistema se ve reflejado en bajos costos de operación, más no en la eficiencia del manejo y disposición de los recortes con el mínimo impacto ambiental.

1.3. Formulación del Problema

1.3.1. Problema General

¿Cómo evaluar la tecnología termomecánico de limpieza de cortes de perforación, para habilitar el tratamiento y disposición de los desechos en el Zócalo Continental del Noroeste Peruano?

1.3.2. Problemas Específicos

- ¿Cómo la disposición de recortes de perforación, ocasionan que el Zócalo Peruano sea un área de alto riesgo a la contaminación?
- ¿Cómo influye la elevada toxicidad de estos desechos, que representa un daño potencial a la flora, fauna y la salud de las personas que habitan en las comunidades circundantes a las operaciones?

1.4. Objetivos de la Investigación

1.4.1. Objetivo General

Evaluar la tecnología termomecánico de limpieza de cortes de perforación, para habilitar el tratamiento y disposición de los desechos en el Zócalo Continental del Noroeste Peruano

1.4.2. Objetivos Específicos

- Disponer los recortes de perforación y no sea área de alto riesgo a la contaminación
- Disminuir la elevada toxicidad de estos desechos, que representa un daño potencial a la flora, fauna y la salud de las personas.

1.5. Hipótesis de la Investigación

1.5.1. Hipótesis General

Con la tecnología TCC-Hammermill (termomecánico de limpieza de cortes), se habilitará el tratamiento y disposición de los desechos en el Zócalo Continental del Noroeste peruano.

1.5.2. Hipótesis Específicas

- Con la tecnología TCC-Hammermill se reducirá el volumen total de residuos generados en aproximadamente 60%.
- Con la tecnología TCC-Hammermill, se disminuirá el tiempo de disposición, los riesgos de derrames, de los recortes de perforación.
- Con la tecnología TCC-Hammermill se reducirá la logística del transporte marítimo y en tierra firme.

1.6. Justificación de la Investigación

La tecnología TCC-Hammermill se utilizará en este proyecto de tesis, debido a las consecuencias generadas debido a un mal manejo y disposición de los recortes de perforación en aguas profundas en el zócalo del Noroeste Peruano, estos son:

- Primero, los recortes impregnados con hidrocarburos y otras sustancias perjudiciales en contacto con el ambiente genera una serie de procesos físicos y químicos, como evaporación de gases tóxicos o lixiviación de

sustancias nocivas que representa un daño potencial a la flora, fauna y la salud de las personas que habitan en las comunidades circundantes a las operaciones.

- Segundo, al aplicar una tecnología inadecuada para el manejo y disposición de recortes de perforación en la parte norte del Zócalo Peruano, podemos ocasionar efectos directos e indirectos en el ambiente, riesgo para la salud y seguridad de los operadores y la probabilidad alta de ocurrencia de accidentes.

1.7. Identificación de Variables

1.7.1. Variable Independiente

- Manejo y disposición de recortes

1.7.2. Variables Dependientes

- Tipo de fluido de perforación
- Litología de las formaciones
- Volumen de recortes de perforación

1.8. Tabla de Operacionalización de Variables

Tabla 1.

Operacionalización de Variables

MANEJO Y DISPOSICION DE RECORTES – TCC HAMMERMILL			
Indicador	Fórmula	Información Requerida	Fuente de Información
Mejor tecnología disponible y mejor practica ambiental	-	Confiabilidad del proceso y empleo actual de la tecnología	Antecedentes bibliográficos (Estudios previos)
TIPO DE FLUIDO DE PERFORACION			
Indicador	Fórmula	Información Requerida	Fuente de Información
Composición del lodo	-	Componentes líquidos y sólidos (aditivos)	Programa de lodos para cada sección del pozo
LITOLOGIA DE LAS FORMACIONES			
Indicador	Fórmula	Información Requerida	Fuente de Información
Consistencia de los recortes de perforación	-	Detalle de los sedimentos	Columna litológica para cada sección del pozo
LITOLOGIA DE LAS FORMACIONES			
Indicador	Fórmula	Información Requerida	Fuente de Información
Capacidad de la zona abierta del pozo (bl/pie)	Capacidad=ID ² /10 29	Diámetro externo de la broca	Diseño de trayectoria del pozo

1.9. Tabla de Matriz de Consistencia

Tabla 2.

Matriz de Consistencia

Problema	¿Cómo evaluar la tecnología termomecánico de limpieza de cortes de perforación, para habilitar el tratamiento y disposición de los desechos en el Zócalo Continental del Noroeste Peruano?						
Objetivo	Evaluar la tecnología termomecánico de limpieza de cortes de perforación, para habilitar el tratamiento y disposición de los desechos en el Zócalo Continental del Noroeste Peruano						
Hipótesis	Con la tecnología TCC-Hammermill (termomecánico de limpieza de cortes), se habilitará el tratamiento y disposición de los desechos en el Zócalo Continental del Noroeste Peruano						
Variables	Manejo y disposición de recortes	Tipo de fluido de perforación	Litología de las formaciones	Volumen de recortes de perforación			
Operacionalización	Composición del lodo	Consistencia de los recortes de perforación	Concentración de hidrocarburos presente en los recortes	Capacidad de la zona abierta del pozo	Líquidos recuperados	Sólidos recuperados	Mejor tecnología disponible y mejor practica ambiental
Metodología	Se identificará las diferentes alternativas para el manejo y disposición de recortes de perforación que existen en la actualidad así como los métodos ya empleados mar adentro en la parte norte del Zócalo Peruano. Así mismo se establecerá mediante la “Matriz de Consistencia” cuál es la opción más viable que permita la disposición de los recortes generando un impacto no significativo al ambiente. Finalmente se presentará un análisis técnico económica de la aplicación de la metodología, las conclusiones y recomendaciones pertinentes.						

Capítulo II: Marco Teórico

2.1. Sistema de Control de sólidos

La eliminación de partículas sólidas constituye una etapa fundamental durante la perforación de pozos de petróleo. Este proceso requiere el empleo de fluidos de perforación —conocidos como lodos— que acompañan el avance de la broca hasta alcanzar la profundidad planificada. Dichos lodos son mezclas formadas por agua o aceite, aditivos químicos y partículas sólidas, cuya función principal es transportar los recortes desprendidos desde el fondo del pozo a través del espacio anular, es decir, el intervalo entre la sarta de perforación y las paredes del pozo.

Los recortes extraídos son procesados por el sistema de control de sólidos, el cual tiene como objetivo principal separar las fracciones de mayor tamaño y recuperar la mayor proporción posible de fluido, reincorporándolo al circuito de circulación.

Un sistema de control de sólidos eficiente maximiza la reutilización del lodo y disminuye la acumulación de material no deseado. La elección de los equipos que lo integran depende de factores como el tipo de fluido empleado, las propiedades de la formación perforada y los requerimientos establecidos para la gestión de los recortes.

Estos sistemas están compuestos por una serie de dispositivos conectados en secuencia que permiten separar partículas finas mediante principios mecánicos y físicos. Entre los equipos más comunes se encuentran las zarandas vibratorias, los hidrociclones (desarenadores y deslimadores), las centrífugas y los sistemas de deshidratación. Cada uno presenta un “punto de corte” que define el tamaño mínimo de partícula que es capaz de retener; por ejemplo, una centrífuga puede trabajar con rangos que van de 3 a 10 micras.

La configuración de estos sistemas no es estándar y se ajusta según las condiciones específicas de cada pozo. El número y tipo de componentes se seleccionan

en función de las características del sitio de perforación y las exigencias del programa de control de sólidos establecido para la operación.

En las operaciones de perforación de pozos se emplea el fluido de perforación —o lodo—, el cual se hace circular desde la superficie, atravesando la sarta de perforación y la broca, para posteriormente ascender por el espacio anular acompañado de los recortes generados en el proceso.

El circuito de circulación está conformado por los tanques de lodo, las bombas principales, las líneas de flujo, las mangueras de alta presión, la unión giratoria y la sarta de perforación. Una vez que el lodo retorna a superficie, es dirigido nuevamente a los tanques para ser reutilizado en un ciclo continuo mientras dure la perforación.

Durante la perforación, el fluido cumple múltiples funciones esenciales, entre ellas:

- Elevar y transportar los recortes desde el fondo del pozo hasta superficie.
- Controlar la presión de la formación y estabilizar las paredes del pozo.
- Recubrir paredes con un revoque de baja permeabilidad para evitar pérdidas.
- Disipar el calor generado, lubricar y sostener la sarta de perforación.
- Transmitir energía hidráulica a la broca.
- Reducir y prevenir procesos de corrosión.
- Facilitar la cementación y la completación del pozo.
- Minimizar la afectación ambiental.

La tarea prioritaria del lodo es mantener al mínimo la concentración de recortes tanto en la zona de la broca como en el espacio anular, favoreciendo su remoción y asegurando así un reciclaje y reutilización eficientes del fluido.

2.2. Tipos de fluidos de perforación

Según la base que los compone, los lodos de perforación pueden clasificarse en:

2.2.1. Fluidos de perforación a base de agua (WBF)

Este tipo es el más empleado a nivel mundial. Se prepara con combinaciones de agua dulce o salada, bentonita y aditivos químicos cuya proporción se ajusta a las condiciones del fondo del pozo. Los lodos a base de agua son más económicos, de fácil manejo y presentan menor riesgo de contaminación de la formación. No obstante, su uso presenta limitaciones en formaciones sensibles al agua —como las arcillosas—, ya que estas tienden a hincharse y obstruir la formación al contacto con el fluido.

2.2.2. Fluidos de perforación a base de aceite (OBF)

Aunque su costo de preparación y mantenimiento es mayor, estos lodos no se ven afectados por zonas reactivas al agua y reducen significativamente la corrosión en la sarta de perforación. Son especialmente útiles en pozos con altos ángulos de desviación debido a su elevada capacidad de lubricación y a su eficacia para prevenir el hinchamiento de arcillas. También se emplean en condiciones extremas de temperatura y presión, y presentan resistencia frente a contaminantes como gases ácidos (CO_2 y H_2S).

2.3. Tecnologías para el manejo y disposición de recortes de perforación

A nivel mundial existen múltiples métodos aplicados para el tratamiento y disposición de los recortes de perforación, especialmente en operaciones en aguas profundas. Entre ellos se encuentran: el relleno en tierra firme, los procesos biológicos, las técnicas térmicas y la reinyección de recortes. Cada uno de estos métodos posee características particulares y beneficios específicos, habiéndose implementado exitosamente en diversos proyectos.

En el área de estudio, los recortes más gruesos resultantes de la perforación se eliminan mediante descarga directa al mar desde la plataforma. Por su parte, los sólidos finos son trasladados a tierra firme para su disposición final, ya sea en rellenos de seguridad (Landfill) o en fosas de confinamiento (PIT) construidas con ese propósito, cumpliendo con lo dispuesto por la Ley General de Residuos Sólidos y la normativa vigente.

A continuación, se describen las principales tecnologías utilizadas en la gestión y disposición de recortes:

2.3.1. Rellenos

Este método consiste en depositar recortes previamente tratados en excavaciones realizadas con maquinaria o en depresiones naturales adaptadas para tal fin. Se considera una técnica común en tierra firme para el almacenamiento de los desechos generados durante la perforación (fluido y recortes).

Con frecuencia, los residuos son colocados en compartimentos o fosas temporales (PIT) ubicados en el sitio de perforación, donde permanecen hasta que los líquidos se evaporan.

Esta tecnología resulta adecuada cuando el fluido de perforación requiere condiciones anaeróbicas para degradarse. Sin embargo, no es recomendable para desechos con alto contenido de aceites, sales, metales pesados, químicos u otras sustancias peligrosas, ya que estos compuestos pueden migrar y contaminar suelos y cuerpos de agua cercanos.

2.3.2. Landfarming

El landfarming es una técnica de tratamiento que emplea microorganismos nativos para degradar los compuestos de hidrocarburos presentes en los

recortes mezclados con lodo. En este proceso, las bacterias convierten dichos compuestos en dióxido de carbono y agua.

El procedimiento consiste en esparcir los recortes al aire libre sobre un área acondicionada llamada biocelda, a la cual se le añaden microorganismos especializados en la degradación de hidrocarburos. La mezcla permanece en tratamiento durante varios meses, con monitoreo periódico de sus condiciones. Este método funciona como un biorreactor de gran escala, reduciendo la concentración de contaminantes y transformando el material en un residuo seguro para el medio ambiente.

Antes de aplicar el landfarming, los recortes suelen ser sometidos a un proceso de secado en plataformas costa afuera para recuperar la mayor cantidad de lodo y fluidos de perforación, los cuales son almacenados para su posterior reutilización en las operaciones.

2.3.3. TCC – Hammermill

La tecnología TCC-Hammermill se desarrolló inicialmente para la limpieza de derrames de hidrocarburos, y posteriormente fue adaptada para el tratamiento de recortes de perforación. Se basa en un proceso de fricción mecánica generado por un conjunto de brazos con martillos montados en un eje central que gira a alta velocidad dentro de una cámara de procesamiento.

El calor necesario para la evaporación del agua y el aceite presentes en los recortes se genera principalmente en el interior de las partículas, como resultado de la energía friccional. El procedimiento inicia con la introducción de sólidos; una vez que la temperatura es suficientemente alta, se alimentan los recortes a tratar. Al atravesar la cámara, los impactos de los martillos generan calor, lo que provoca la vaporización de los líquidos contenidos.

Los vapores resultantes pasan por un condensador de aceite y otro de vapor de agua, recuperándose ambos fluidos en tanques separados para su reciclaje en las operaciones de perforación. El material sólido tratado presenta generalmente menos de un 1 % de hidrocarburos en peso. Estos sólidos, en forma de polvo limpio, pueden descargarse en el mar a una profundidad controlada, cumpliendo con las condiciones ambientales aceptadas.

2.3.4. Reinyección de recortes

La reinyección de recortes consiste en bombear, a alta presión, los recortes mezclados con agua y aditivos hacia formaciones porosas del subsuelo, utilizando el espacio anular o pozos de disposición. La presión de inyección debe superar la presión de fractura de la formación para generar zonas de alta permeabilidad donde se deposita la lechada resultante.

Este procedimiento puede llevarse a cabo de forma simultánea a la perforación, utilizando el espacio anular de las sartas de revestimiento, o posterior a ella, a través de pozos específicos para disposición. La mezcla, previamente triturada a un tamaño de partícula adecuado, se combina con viscosificantes y se almacena temporalmente en tanques para verificar sus propiedades reológicas antes de la inyección.

El objetivo es crear un sistema de fracturas hidráulicas donde los recortes permanezcan confinados, evitando así cualquier riesgo de contaminación superficial. La localización de la zona de inyección se define a partir de estudios geológicos y de campo que aseguren la viabilidad técnica y ambiental del proceso.

El éxito de esta técnica depende de un diseño adecuado del equipo superficial, del control del contenido de sólidos (generalmente no superior al 20 % en volumen de la lechada), de la optimización de la viscosidad para garantizar

un flujo constante hacia la fractura y del análisis de la granulometría para prevenir sedimentación o bloqueo del pozo. Además, se consideran aditivos adicionales como inhibidores de corrosión, secuestrantes de oxígeno y biocidas.

- **Proceso de Reinyección de Cortes**

Durante la perforación, los recortes son transportados a la superficie junto con el lodo utilizado. Una vez en superficie, pasan por el sistema de control de sólidos, donde se recupera parte del fluido y los sólidos se separan para su posterior manejo. Estos recortes, triturados hasta alcanzar un tamaño de partícula específico, se combinan con agua y viscosificantes en una unidad mezcladora para formar una lechada.

La mezcla se transfiere a un tanque de almacenamiento temporal, donde se verifican sus propiedades reológicas, asegurando que cumplan con los requisitos de ingeniería establecidos. Posteriormente, la lechada se inyecta, ya sea por el tubular o por el espacio anular, hacia la formación receptora. Este proceso se realiza a una presión, velocidad de bombeo y condiciones reológicas que garanticen la creación de fracturas hidráulicas capaces de alojar de manera segura el material sólido.

El propósito de este método es desarrollar un sistema de fracturas en el subsuelo que funcione como depósito permanente de los recortes, evitando riesgos de contaminación superficial. La elección de la zona de fractura depende de un análisis detallado de las características geológicas y operativas del campo.

El éxito de las operaciones de reinyección de recortes (CRI, por sus siglas en inglés) requiere un estudio exhaustivo del campo, la evaluación de las

alternativas, la identificación de posibles riesgos y la implementación de un plan de manejo que reduzca al mínimo las contingencias.

- **Parámetros involucrados en la reinyección**

- **Diseño del equipo superficial**

La selección y disposición del equipo en superficie se basa en los parámetros de ingeniería obtenidos y en las condiciones particulares de la perforación.

- **Concentración de sólidos**

Para asegurar una disposición segura y continua, el contenido de sólidos en la lechada no debe superar el 20 % en volumen, aunque este valor puede ajustarse en función de los requerimientos específicos de cada proyecto.

- **Condiciones reológicas de la lechada**

Es fundamental controlar parámetros como la viscosidad para garantizar que la lechada fluya sin interrupciones dentro de la fractura. Se realizan pruebas con diferentes concentraciones de sólidos para establecer las viscosidades óptimas y definir la selección de viscosificantes más adecuada.

- **Distribución del tamaño de partículas**

Un análisis granulométrico detallado es clave para evitar sedimentación y posibles bloqueos en el pozo durante la inyección.

- **Otros aditivos**

En coordinación con el operador, se pueden incluir aditivos como inhibidores de corrosión, agentes secuestrantes de oxígeno y biocidas, según la experiencia y necesidades del proyecto.

- **Especificaciones de cabeza de pozo**

Es necesario evaluar el desgaste por erosión que puede producirse en la cabeza de pozo y el tubular durante una inyección prolongada. Este análisis, respaldado por simulaciones numéricas, permite estimar la presión de inyección en superficie y definir las especificaciones del equipo requerido.

2.4. TCC marino de MI SWACO – Hammermill

La unidad TCC Hammermill ha sido diseñada para su instalación en operaciones costa afuera, aprovechando el espacio que normalmente se destinaría a contenedores para el transporte de recortes a tierra.

Este sistema compacto y portátil emplea tecnología de desorción térmica comprobada en campo, siendo especialmente útil en ubicaciones remotas, zonas ambientalmente sensibles y proyectos donde se prevé el uso de lodos base aceite (OBM) y sus recortes asociados.

Figura 1.

TCC costa afuera Hmolino de martillo Instalación del sistema



Fuente: Halliburton

Este sistema incorpora la avanzada tecnología de desorción térmica TCC de MI SWACO probada en campo. El sistema incorpora la alta eficiencia de separación, la calidad del petróleo recuperado, la rentabilidad y las bajas emisiones que han hecho de la tecnología TCC la preferida de la industria costa afuera. La unidad ofrece una construcción robusta y un diseño modular. Esta combinación de rendimiento y portabilidad hace que el TCC Hmolino de martillo es la solución preferida para el tratamiento de lodos y recortes para la exploración y perforación de fronteras.

Figura 2.

Instalación del sistema cerrado



Fuente: Halliburton

2.4.1. Características destacadas

- Recuperación superior al 99 % de aceites sintéticos, diésel o aceites minerales de baja toxicidad, listos para reutilización.
- El aceite recuperado no sufre fraccionamiento ni degradación significativa.
- Eliminación in situ de sólidos tratados.
- Contenido de hidrocarburos en sólidos tratados inferior al 0,1 % TPH; aceite base recuperado con menos del 1 % BS&W.

- Sistema completamente cerrado, con capacidad para tratar lodos, recortes, suelos y fondos de tanques, incluso con alto contenido de aceite y agua (hasta un 60 %).
- Rendimiento de hasta 5 toneladas métricas por hora.
- Diseño modular que facilita la movilización en cualquier condición geográfica y ambiental.
- Uso de accionamiento eléctrico modular, minimizando tiempos de instalación.
- Sistema de purga de nitrógeno que reduce la entrada de oxígeno.
- Martillos de alta resistencia para prolongar la vida útil del equipo.

2.4.2. Beneficios ambientales

Probado en países como Kazajistán y Alemania, este sistema es considerado uno de los más amigables con el medio ambiente para el tratamiento de lodos y recortes. Los sólidos tratados pueden ser descargados en alta mar (dependiendo de la normativa local), dispuestos en vertederos o empleados en obras civiles como material de base.

2.4.3. Funcionamiento de la tecnología TCC – Hammermill

El TCC es un sistema diseñado para separar los diferentes componentes presentes en recortes de perforación o en suelos contaminados cuando se han utilizado lodos a base de aceite (OBM) durante las operaciones, o cuando el terreno ha sido afectado por hidrocarburos.

En este equipo, los residuos se dividen en tres fracciones principales:

- Sólidos minerales
- Aceite base
- Agua

El principio de operación consiste en calentar la corriente de desecho a una temperatura que supere el punto de evaporación del aceite base, normalmente entre 250 °C y 300 °C. Este calentamiento provoca que tanto el aceite como el agua se transformen en vapor, para posteriormente ser condensados en recipientes independientes.

La generación de calor no se realiza mediante combustión, sino por energía de fricción. El núcleo del sistema es una cámara cilíndrica (de aproximadamente 1 m de diámetro y 1 m de longitud) denominada molino de proceso, que alberga un eje equipado con múltiples brazos de martillo. Este eje es impulsado por un motor eléctrico o diésel.

Antes de iniciar el tratamiento, se introduce arena en la cámara y se pone en marcha el eje. Las partículas son empujadas contra las paredes internas, donde los extremos de los martillos las golpean repetidamente, generando fricción y elevando la temperatura. El punto de mayor temperatura se alcanza dentro de las partículas mismas.

Cuando la temperatura del sistema es la adecuada, se alimentan los recortes contaminados. Los líquidos presentes se evaporan de manera instantánea y, en cuestión de segundos, salen de la cámara como vapores, que luego pasan a condensadores independientes para recuperar agua y aceite.

El proceso opera de forma continua: mientras aumenta la temperatura y se alimentan nuevos recortes, los sólidos tratados son descargados automáticamente una vez que la carga del motor alcanza el punto de ajuste predefinido. Todo el procedimiento es controlado mediante un sistema PLC (Controlador Lógico Programable) totalmente automatizado, lo que reduce la necesidad de intervención manual.

La exposición del aceite a altas temperaturas ocurre solo durante unos segundos, lo que garantiza que el producto recuperado mantenga una calidad elevada y pueda ser reutilizado en la formulación de nuevos OBM.

Tabla 3.

Récord de rendimiento

Actuación	Especificaciones	Mejor Grabado
Petróleo sobre recortes (TPH)	< 1%	0.0001%
Reducción del punto de inflamación del aceite recuperado (°C)	< 5	0
Sólidos en aceite recuperado (ppm)	< 1000	< 20
Agua en aceite recuperado (%)	< 1	< 0.5
Aceite en agua recuperado (ppm)	< 1000	< 50

2.4.4. Ventajas operativas

- Alta tasa de recuperación de aceite y diésel, lo que reduce costos.
- Eliminación in situ de sólidos tratados, evitando transporte a tierra.
- Menores gastos de movilización y tiempo de montaje.
- Capacidad de adaptación a cambios rápidos en las condiciones del sitio.
- Operación segura y rendimiento comprobado en campo.
- Control preciso de temperaturas de proceso.
- Prevención de exposición de recortes al medio ambiente.
- Mantenimiento de tasas de perforación constantes.
- Martillos de alta durabilidad.
- Automatización mediante PLC, minimizando la intervención humana.
- Contenedores certificados bajo la norma DNV 2-7.3.

2.5. Limpiador de recortes Termomecánicos (TCC) BaraPhase

2.5.1. Opciones de procesamiento térmico modulares y escalables para aplicaciones sensibles al medio ambiente

El TCC BaraPhase ofrece soluciones modulares y escalables para el tratamiento térmico de recortes y residuos de perforación en contextos con alta sensibilidad ambiental o restricciones de descarga. Su propósito es separar eficientemente sólidos y fluidos aprovechables, lo que impacta directamente en la reducción del volumen de desechos y en la recuperación de fluidos base para reutilización en el sistema de lodo activo.

Esta tecnología resulta especialmente relevante en zonas que han adoptado regulaciones más estrictas o políticas de descarga cero, pues permite minimizar la necesidad de transporte de residuos hacia instalaciones de disposición final.

2.5.2. Descripción General

El tratamiento térmico por fricción, característico del TCC BaraPhase, emplea martillos giratorios para generar calor, evitando el uso de llamas abiertas y reduciendo riesgos asociados a otras tecnologías térmicas. El diseño del sistema puede adaptarse a las limitaciones de espacio, capacidad y configuración de la instalación, tanto en operaciones terrestres como marítimas.

2.5.3. Características

- Capacidad de procesamiento: 3 o 6 toneladas métricas por hora en tierra y 6 toneladas por hora en alta mar
- Flexibilidad: Instalaciones terrestres con capacidad para recibir recortes de múltiples pozos o plataformas; módulos apilables en alta mar para optimizar el espacio en cubierta.

- Eficiencia: Capaz de reducir el contenido de petróleo en recortes (ROC) a valores promedio inferiores al 1 %.
- Recuperación de fluidos: El aceite recuperado puede reincorporarse al sistema activo de lodo, disminuyendo el consumo de materiales y los costos operativos.

Ventajas operativas y ambientales:

- Alta eficiencia en la recuperación de aceite base, lo que reduce el volumen de residuos y la necesidad de transporte.
- Procesamiento en el punto de generación, evitando riesgos asociados al traslado de materiales contaminados.
- Diseño modular y apilable que facilita la instalación y optimiza el uso del espacio disponible.

2.5.4. Aplicaciones

El sistema está diseñado para operaciones en tierra y mar, especialmente en entornos con limitaciones de descarga o alta sensibilidad ambiental. Al reducir el volumen de residuos, recuperar fluidos valiosos y minimizar riesgos en el transporte, el TCC BaraPhase contribuye significativamente a la optimización operativa y al cumplimiento normativo.

Figura 3.

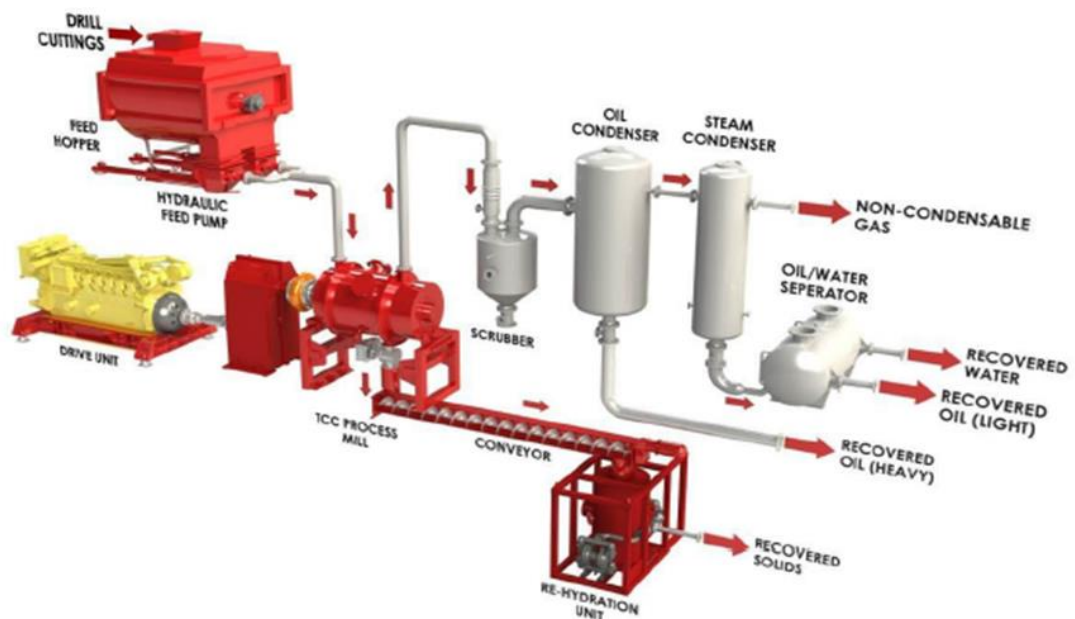
Instalación costa afuera de BaraPhase TCC



Fuente: Halliburton

Figura 4.

Instalación del modelo de BaraPhase TCC



Fuente: Halliburton

2.6. Tecnología Alternativa TCC – Hammermill

Como alternativa tecnológica para el tratamiento de recortes, se propone el uso del Sistema Termomecánico de Limpieza de Cortes (TCC – Hammermill), que permite descargar polvo limpio al mar bajo condiciones ambientalmente aceptadas y recuperar un mayor volumen de aceite base y agua para su reutilización.

Cabe destacar que la disposición de recortes mediante secadores y su transporte a tierra para disposición en rellenos de seguridad continúa siendo una opción autorizada por la Resolución Directoral N.º 163-2013-MEM/AAE, que aprobó el EIA-S del proyecto. Sin embargo, el presente trabajo plantea incorporar el TCC – Hammermill como alternativa ya avalada en dicho instrumento ambiental.

Aunque esta tecnología implica un mayor costo operativo que los secadores convencionales, se justifica su incorporación por considerarse la mejor tecnología disponible (BAT) y la mejor práctica ambiental (BEP) para el manejo de recortes de perforación, de acuerdo con el artículo 83.2a del Decreto Supremo N.º 039-2014-EM, Reglamento para la Protección Ambiental en las Actividades de Hidrocarburos.

2.6.1. Alcances del proyecto

La implementación del sistema contempla:

- Instalación del equipo a bordo del MODU para tratar recortes de perforación, en reemplazo o complemento del secador ya aprobado.
- Limpieza de recortes generados con fluidos no acuosos (NAF), reduciendo su contenido de hidrocarburos a menos del 1 %, para permitir su descarga al mar conforme a estándares internacionales (IFC/Banco Mundial, OSPAR) y la legislación peruana.
- Recuperación y reutilización del agua y aceite base obtenidos durante el proceso.

- Reducción de la logística marítima y terrestre asociada al transporte de recortes a rellenos de seguridad.
- Disminución del volumen de residuos generados en un 60 % respecto a los no tratados.
- Reducción del área requerida en rellenos de seguridad.
- Mejora de la seguridad en operaciones costa afuera y en tierra, minimizando maniobras de izado y riesgos de derrames.
- Disminución de riesgos en carretera al reducir la cantidad de transporte de residuos hacia disposición final.

2.6.2. Justificación de la Tecnología TCC

La modificación planteada se fundamenta en la incorporación de la mejor tecnología disponible (BAT) y de las mejores prácticas ambientales (BEP) para el tratamiento y disposición de recortes generados con fluidos no acuosos (NAF). Su objetivo es disminuir los impactos ambientales y los riesgos para la seguridad durante las operaciones.

El sistema TCC – Hammermill convierte recortes potencialmente peligrosos en un residuo sólido limpio con un contenido de hidrocarburos inferior al 1 %, incluso más seguro que los recortes tratados con lodos base agua, cuya disposición marina está autorizada según el artículo 83.2 del Decreto Supremo N.º 039-2014-EM.

Además, esta tecnología permite recuperar aceite base y agua del proceso, que pueden ser reincorporados a las operaciones a bordo del MODU. El polvo limpio obtenido cumple con las normativas internacionales más estrictas (IFC/Banco Mundial, OSPAR) para su descarga al mar.

La adopción de esta opción tecnológica implica beneficios significativos, entre ellos:

- Reducción de riesgos e impactos ambientales asociados al transporte de recortes hacia rellenos de seguridad.
- Minimización de la exposición del personal durante la manipulación y traslado de materiales.
- Cumplimiento de estándares internacionales y nacionales en materia ambiental.

2.6.3. Descarga de Detritus Limpio al Mar

Para viabilizar la descarga de polvo limpio al mar (con menos del 1 % de hidrocarburos residuales), se propone implementar la tecnología TCC – Hammermill como alternativa de manejo de recortes. Esta tecnología es reconocida globalmente como BAT y BEP, y ya ha sido aprobada previamente para operaciones de perforación en el Perú.

El sistema ha demostrado eficacia en proyectos internacionales, tanto en tierra como en alta mar, produciendo tres subproductos:

- Roca pulverizada limpia (polvo) con menos de 1 % de hidrocarburos.
- Agua destilada para reutilización.
- Aceite recuperado para reincorporar al sistema de lodo NAF.

Su funcionamiento se basa en fricción mecánica: brazos con martillos montados en un eje central giran a alta velocidad dentro de una cámara, generando calor que evapora el agua y el aceite presentes en los recortes. Los vapores son condensados por separado y almacenados para su posterior uso.

Entre sus ventajas frente a tecnologías convencionales se destacan:

- Menor temperatura de procesamiento y menor tiempo de retención, lo que preserva la calidad del aceite recuperado.
- Cumplimiento de estándares internacionales en Reino Unido, Noruega, Mediterráneo, Turquía, Angola y Camerún.
- Capacidad para lograr un contenido de hidrocarburos inferior al 1 %, ajustándose a las regulaciones OSPAR y del Banco Mundial.

Esta tecnología, además de cumplir con la normativa peruana, optimiza la gestión de residuos al reducir la manipulación, minimizar el consumo energético y disminuir riesgos para la salud, la seguridad y el ambiente.

Criterios técnicos, ambientales y energéticos para la disposición de cortes tratados con TCC – Hammermill:

La evaluación de esta tecnología debe considerar un enfoque integral que incluya factores de salud, seguridad, ambiente y eficiencia energética. Los principales aspectos analizados son los siguientes:

- Riesgo para la salud humana:

El incremento en la manipulación de residuos eleva proporcionalmente el riesgo de incidentes que afecten al personal, al ambiente y a la seguridad general de la operación. Transportar recortes en cajas hacia tierra firme puede requerir alrededor de 3 000 izamientos por pozo (Revista de Petróleo y Gas, 2004), aumentando las probabilidades de accidentes laborales y daños ambientales durante la carga y descarga.

- **Consumo energético**

Según estimaciones, el tratamiento de 100 toneladas de recortes mediante TCC – Hammermill permitiría recuperar aproximadamente 10 toneladas (80 barriles) de NAF, con un consumo de combustible de entre 2 y 2,2 toneladas para el proceso. En comparación, transportar y manipular el mismo volumen de recortes hacia tierra firme para su tratamiento requeriría alrededor de 3,5 toneladas de combustible (Revista de Petróleo y Gas, 2004).

- **Menor impacto sobre agua, aire, suelo y sedimentos marinos**

La disposición terrestre de recortes exige la existencia de infraestructura adecuada, incluyendo embarcaciones, servicios portuarios, grúas y transporte terrestre hacia instalaciones de disposición final. Estas operaciones generan riesgos adicionales, como la posibilidad de lixiviación de contaminantes en sitios de disposición, o incluso derrames accidentales de recortes sin tratar al mar durante el traslado, lo que provocaría impactos ambientales graves y altos costos de remediación.

- **Generación de residuos**

En EE. UU., la autoridad reguladora ha identificado que, dentro de los fluidos no acuosos, los SBF (Synthetic Based Fluids) ofrecen ventajas ambientales frente a los WBF (Water Based Fluids), ya que permiten perforar pozos más limpios, con menor desprendimiento de material y, por ende, menor volumen de recortes. El uso de SBF promueve la prevención de la contaminación mediante una mayor eficiencia en el control de sólidos y el incremento del reciclaje de estos fluidos, lo que

reduce la cantidad de SBF nuevos que deben adquirirse y la fracción de ellos que queda retenida en los recortes (Johnston et al., 2004).

- **Uso de productos químicos**

Mientras que los SBF se reciclan en la mayor medida posible, los WBF suelen descargarse sin tratamiento. Esto implica que, al utilizar SBF, la descarga de aditivos —principalmente barita— es menor. Antecedentes internacionales y validación de la tecnología TCC – Hammermill. En 2001, la tecnología TCC – Hammermill fue sometida a un programa de ensayos exhaustivos autorizados por el regulador de petróleo y gas costa afuera del Reino Unido (actualmente Departamento de Energía y Cambio Climático). El objetivo de estas pruebas era confirmar su eficiencia y confiabilidad en operaciones marinas.

Los resultados obtenidos fueron reportados al Comité de la Industria Costa Afuera de OSPAR, que reconoció oficialmente al TCC – Hammermill como Mejor Tecnología Disponible (BAT) y Mejor Práctica Ambiental (BEP) para el tratamiento de recortes de perforación con fluidos no acuosos (NAF) en entornos marinos.

Además, las características físicas y químicas de los recortes tratados —reducidos a polvo limpio— cumplen con las guías publicadas por la Corporación Financiera Internacional del Banco Mundial (IFC, 2007), en lo relativo a contenido máximo de hidrocarburos y ausencia de componentes peligrosos.

- **Comparación técnica con otros métodos**

La diferencia clave frente a sistemas de combustión directa o incineración radica en que el TCC–Hammermill utiliza fricción mecánica

controlada, lo que mantiene temperaturas más bajas y tiempos de exposición muy cortos. Esto minimiza la degradación del aceite recuperado y preserva sus propiedades para ser reutilizado en nuevos lodos base aceite.

Por su diseño, esta tecnología ha demostrado cumplir con las regulaciones de emisiones y estándares ambientales vigentes en América del Norte, América del Sur y el Reino Unido, además de países como Noruega, Turquía, Angola, Camerún y Libia.

- Beneficios de su adopción
- Cumplimiento con las exigencias de la Convención OSPAR en cuanto a contenido máximo de hidrocarburos (< 1 %).
- Recuperación de aceite base de alta calidad, utilizable directamente en el sistema de lodo activo.
- Eliminación in situ de recortes tratados, evitando transporte y reduciendo riesgos logísticos.
- Disminución de emisiones y reducción del consumo energético respecto a alternativas convencionales.
- Adaptabilidad para operaciones en condiciones geográficas y ambientales diversas, tanto en mar como en tierra.

2.7. Descargas de cortes de perforación en el mar

En las operaciones de petróleo y gas, los fluidos de perforación cumplen principalmente la función de transportar las rocas fragmentadas —denominadas cortes— hacia la superficie y mantener el control de las presiones de la formación. Además, desempeñan funciones esenciales como: sellar zonas permeables, estabilizar el pozo, enfriar y lubricar la broca, y transmitir energía hidráulica a las herramientas de perforación.

En la mayoría de los fluidos de perforación, el componente sólido predominante es la barita (sulfato de bario), utilizada para aumentar la densidad, mientras que las arcillas bentoníticas actúan como espesantes. A estos se suman aditivos químicos específicos, seleccionados según las condiciones geológicas encontradas.

Existen dos grandes grupos de fluidos de perforación:

- **Fluidos base agua (WBF)**

Su fase continua está compuesta por agua de mar o un fluido miscible en agua, que sirve de medio para la suspensión de sólidos.

- **Fluidos no acuosos (NAF)**

Su fase continua formada por un fluido inmisible en agua, que puede ser aceite base, aceite mineral mejorado o un fluido sintético.

Los WBF son predominantes en las primeras etapas de perforación costa afuera, especialmente en secciones “abiertas” del pozo, donde no es viable retornar cortes y lodo gastado a la plataforma. Sin embargo, sus prestaciones son limitadas en condiciones más exigentes, lo que ha impulsado el uso creciente de NAF en pozos más profundos o con alto grado de desviación, debido a su superior capacidad de lubricación y estabilidad del hueco.

Tanto los cortes de perforación como los lodos gastados constituyen las corrientes de residuos más voluminosas en la perforación. Generalmente, se emplea un sistema de control de sólidos en plataforma para separar los cortes y permitir la reutilización del fluido. Aun así, siempre queda un recubrimiento de fluido adherido al material sólido tratado.

El volumen total de cortes generados depende de variables como:

- Tipo de fluido de perforación utilizado.
- Profundidad final del pozo.
- Diámetro del hueco perforado.

Las autoridades regulatorias de varios países han aceptado, bajo ciertas condiciones, la descarga controlada de cortes tratados con NAF, evaluando no solo su impacto ambiental directo sino también los riesgos asociados a alternativas como la disposición terrestre (costos, consumo de recursos, emisiones, riesgos en transporte y exposición ocupacional a químicos).

2.7.1. Tipos de NAF y Criterios de Descarga para la Disposición de los Cortes

La clasificación de los NAF se basa en el contenido y tipo de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), debido a su incidencia en la toxicidad del fluido:

- **Grupo I – Fluidos a base de aceite (OBF)**

Utilizan diésel o aceite mineral convencional como fluido base. Poseen un contenido elevado de HAP (>10 %) y metales pesados, lo que los hace altamente tóxicos y de baja biodegradabilidad.

- **Grupo II – Fluidos mejorados a base de aceite mineral (EMOBF)**

Formulados con aceites parafinados convencionales tratados con hidrógeno y purificados, logrando reducir el contenido total de HAP a rangos de 0,35 % a 0,001 %.

- **Grupo III – Fluidos a base sintética (SBF)**

Elaborados con compuestos orgánicos sintéticos insolubles en agua, libres de HAP o con contenidos inferiores a 0,001 %, lo que los

hace menos tóxicos y más biodegradables que los OBM, manteniendo prestaciones de perforación similares (Gobierno de las Islas Malvinas, 2013).

En la mayoría de los marcos regulatorios, la descarga de NAF a granel en el océano está prohibida. Lo que se permite —cuando la legislación lo contempla— es la descarga de los cortes que retienen una fracción de fluido, siempre que cumplan con límites máximos de contenido de hidrocarburos.

En Estados Unidos y en el Mar del Norte, los OBF del Grupo I han sido eliminados casi por completo debido a su alto contenido de HAP y baja biodegradabilidad. Los fluidos de los Grupos II y III, con menor toxicidad, han demostrado un mejor comportamiento ambiental según estudios tanto de la industria como independientes.

El manejo y disposición de cortes tratados con NAF varía según la región, influido por regulaciones ambientales, condiciones operativas y avances en formulaciones de fluidos. Entre las tendencias más relevantes se encuentran:

- condiciones operativas extremas (alta temperatura y presión) que demandan formulaciones más resistentes.
- Exigencias técnicas como mayor lubricidad y estabilidad del pozo.
- Restricciones ambientales más estrictas sobre el uso de aceite base.

Las Guías de Medio Ambiente, Salud y Seguridad para el sector de petróleo y gas costa afuera del Banco Mundial (2015) recomiendan para NAF:

- Reinyectar o transportar a tierra firme para disposición final.
- Solo permitir descargas al mar si el contenido de aceite es inferior al 1 % en peso de corte seco y los niveles de metales

pesados (mercurio y cadmio) cumplen los límites establecidos.

- Realizar descargas mediante compuerta sumergida a 15 m. bajo la superficie.

A nivel global, la mayor limitación tecnológica en la disposición de cortes tratados con fluidos no acuosos está relacionada con el porcentaje de fluido residual que queda retenido en el sólido. La mayoría de las jurisdicciones adopta el concepto de mejor tecnología disponible (BAT) para referirse a las técnicas que permiten, de forma práctica y económicamente viable, reducir al mínimo la cantidad de contaminantes en las descargas.

En el Mar del Norte, la regulación más estricta corresponde a la Convención OSPAR, que establece que los cortes con NAF deben contener un máximo de 1 % de aceite en peso antes de ser descargados al mar. Según este organismo, el sistema TCC (Termomecánico para Limpieza de Cortes) es la tecnología más efectiva para cumplir este requisito, ya que permite calentar y vaporizar el aceite y el agua adheridos, para luego condensarlos y separarlos por gravedad, generando sólidos secos sin hidrocarburos, sales ni metales pesados.

El desempeño del TCC ha demostrado ser consistente, logrando de forma habitual contenidos de aceite inferiores al 0,1 %, por lo que su uso está ampliamente extendido y validado (Gobierno de las Islas Malvinas, 2013).

En Estados Unidos, la autorización para descargas está sujeta a las limitaciones de efluentes definidas por el Sistema Nacional de Eliminación de Descargas Contaminantes (NPDES). Estas limitaciones consideran la factibilidad técnica y económica de cumplir los límites, que en el caso de los SBF a base de olefinas internas C16–C18 es del 6,9 % de aceite residual (peso húmedo) y para los SBF a base de éster C12–C14 es del 9,4 %. Dichos valores

corresponden al rendimiento alcanzable con sistemas de centrífugas, que era la mejor tecnología disponible en 2001.

En Canadá, las Pautas para el Tratamiento de Residuos Costa Afuera (2010) establecen que los cortes asociados a SBF deben reinyectarse siempre que sea técnicamente posible. Si esta opción no es viable, la descarga marina está permitida únicamente si los cortes han sido tratados con la mejor tecnología disponible, manteniendo un contenido de aceite no superior al 6,9 % en sólidos húmedos, y aplicando prácticas operativas que logren la menor retención posible de fluido.

En Sudamérica, la tendencia regulatoria general permite descargas controladas de cortes tratados con SBF. En Brasil, se aplica el mismo estándar que en EE. UU., es decir, un máximo de 6,9 % de aceite sintético en los cortes (Génesis, 2014). Otros países de la región no cuentan con límites específicos para esta disposición, aunque adoptan prácticas basadas en referencias internacionales (Jacques Whitford Stantec Limited, 2009).

2.8. Componentes ambientales afectados por el uso del sistema TCC –

Hammermill

Para evaluar el impacto potencial de la implementación del sistema TCC – Hammermill en el área del Lote Z-38, se identificaron los siguientes componentes ambientales como prioritarios:

- Calidad del agua de mar.
- Calidad de los sedimentos marinos.
- Comunidades de plancton.
- Bentos.
- Recursos pesqueros.

2.8.1. Calidad del agua de mar

El análisis de calidad del agua se basó en muestras recolectadas en trece estaciones oceánicas distribuidas en el área de estudio.

- **Temperatura:**

En superficie, la temperatura varió entre 21,0 °C y 24,7 °C. Se registró una anomalía negativa de -1,0 °C al inicio del muestreo. En zonas cercanas a la costa de Tumbes se observaron anomalías positivas de hasta +1,0 °C, asociadas al ingreso de aguas ecuatoriales.

- **Potencial de hidrógeno (pH):**

Los valores oscilaron entre 8,06 (Bocapán) y 8,29 (frente a Cancas), dentro del rango establecido en el ECA-Agua Categoría 4 (6,8 – 8,5).

- **Oxígeno disuelto (OD):**

La concentración mínima fue 4,33 mg/L (P-10) y la máxima 11,08 mg/L (P-2), ambas superiores al mínimo requerido por el ECA Categoría 4 ($\geq 4,0$ mg/L).

- **Salinidad:**

Se registraron valores entre 32,7 ppt (Máncora) y 34,1 ppt (frente a Zorritos).

- **Turbidez:**

Los valores oscilaron de 0,45 NTU a 3,04 NTU, con máximos al noreste (P-10 y P-7) y gradiente decreciente hacia la costa este, incrementándose nuevamente hacia el oeste.

- **Transparencia:**

Fluctuó entre 5,10 m (P-9) y 12,0 m (P-12), con valores más altos cercanos a la costa y disminución hacia el noreste.

- **Sólidos totales suspendidos (STS):**

Entre 10,21 mg/L (P-5) y 12,96 mg/L (P-4, frente a Zorritos), sin exceder el límite del ECA Categoría 4 (30,0 mg/L).

- **Nutrientes:**

- Nitratos: Entre <0,06 mg/L y 0,19 mg/L, dentro del rango ECA (0,07 – 0,28 mg/L), aunque algunas estaciones estuvieron por debajo del mínimo.
- Nitritos: Entre 0,006 mg/L (P-7 y P-8) y 0,024 mg/L (P-10). La estación P-6 presentó valores inferiores al límite de cuantificación.
- Fosfatos: Entre 0,034 mg/L (P-8) y 0,21 mg/L (P-10), con algunas mediciones sobre el rango ECA (0,031 – 0,093 mg/L).
- Silicatos: De 0,3017 mg/L a 0,9467 mg/L; tres estaciones reportaron valores por debajo del rango ECA (0,14 – 0,70 mg/L).

- ***Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5):***

Menor a 0,10 mg/L en la mayoría de las estaciones, con máximo de 5,82 mg/L (P-9), por debajo del límite ECA (10 mg/L).

- **Coliformes termotolerantes, aceites y grasas, e hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH):**

Todos los parámetros estuvieron por debajo del límite de cuantificación de laboratorio y del máximo permitido por el ECA.

2.8.2. Calidad del sedimento marino

En ausencia de estándares nacionales, se aplicaron las Pautas Canadienses de Calidad Ambiental para Sedimentos (2003), que contemplan:

- ISQG (Interim Sediment Quality Guideline): Concentración por debajo de la cual no se esperan efectos biológicos adversos.
- PEL (Probable Effect Level): Concentración por encima de la cual se prevén efectos biológicos negativos.

- **Composición granulométrica:**

Los sedimentos del Lote Z-38 están compuestos por fracciones de arena y limo.

- **Composición Orgánica e Hidrocarburos Totales de Petróleo (TPH)**

Materia orgánica: 2,22 % (P-11) a 9,28 mg/kg (P-5).

- **Hidrocarburos totales de petróleo (TPH):**

Por debajo del límite de cuantificación (< 6,0 mg/kg) en todas las estaciones.

- **Metales totales:**

- Arsénico: 3,18 – 37,93 mg/kg; estaciones P-2 y P-13 superaron ISQG (7,24 mg/kg) pero no PEL (41,6 mg/kg).
- Cadmio: 0,81 – 5,96 mg/kg; P-11 superó ISQG (0,7 mg/kg) y PEL (4,2 mg/kg).
- Cobre: 9,14 – 35,73 mg/kg; algunas estaciones superaron ISQG (18,7 mg/kg) pero todas quedaron por debajo de PEL (108 mg/kg).
- Cromo: 37,97 – 212,42 mg/kg; estaciones P-5, P-6 y P-13 superaron ISQG (52,3 mg/kg) sin exceder PEL (160 mg/kg)
- Plomo: 4,09 – 21,03 mg/kg, todas por debajo de ISQG (30,2 mg/kg).
- Zinc: 28,63 – 141,39 mg/kg; P-2 superó ISQG (124 mg/kg) pero no PEL (271 mg/kg).
- Mercurio: Inferior al límite de cuantificación (< 0,01 mg/kg) y por debajo de ISQG (0,13 mg/kg).

Capítulo III: Desarrollo del Trabajo de Investigación

3.1. Tratamiento de Cortes de Perforación - Lote Z-38

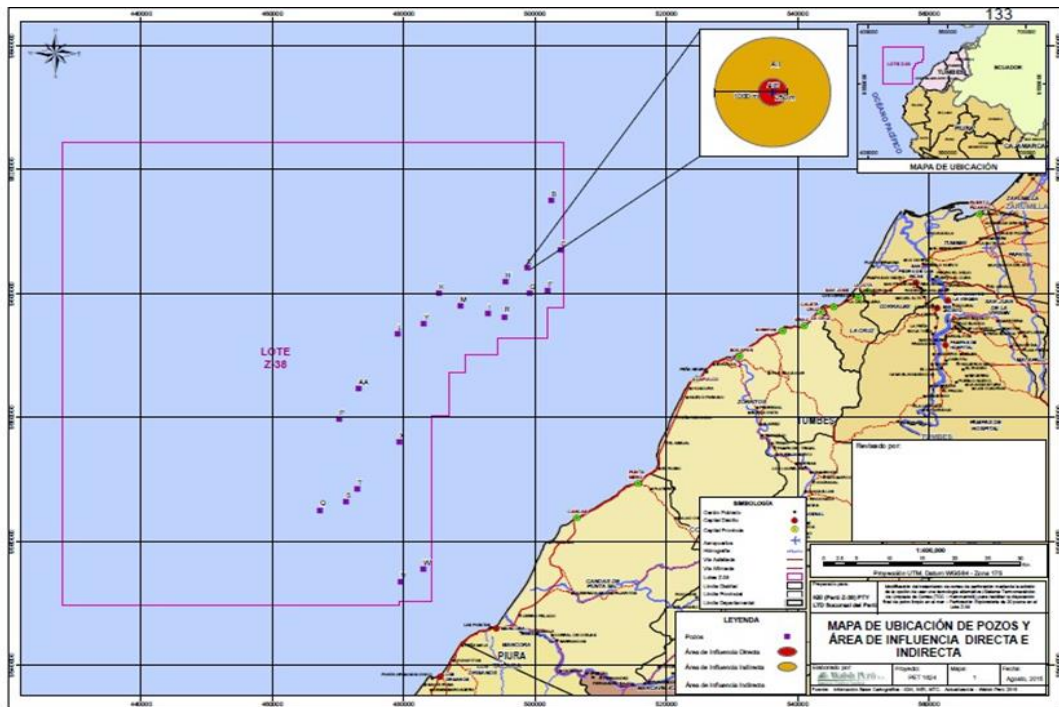
El propósito es aplicar una tecnología alternativa para el manejo y procesamiento de cortes generados con base en fluidos no acuosos (NAF), mediante la instalación de un Sistema Termomecánico de Limpieza de Cortes (TCC – Hammermill). Este sistema permitirá la disposición de los residuos sólidos limpios en el mar bajo condiciones ambientalmente seguras, así como la recuperación y reutilización de un mayor volumen de aceites base y agua.

3.2. Ubicación

En el departamento de Tumbes, dentro de su plataforma continental, se desarrolla el proyecto correspondiente al Lote Z-38, el cual se extiende frente a la costa y comprende áreas de las provincias de Zarumilla, Tumbes y contralmirante Villar.

Figura 5.

Ubicación del Lote Z-38



Fuente: Empresa Karoon

3.3. Descripción del Proyecto

3.3.1. Sistema de Control de Sólidos y Cortes

Se prevé que el sistema destinado al control de sólidos esté conformado por los siguientes equipos:

- 06 Zarandas "Brandt" utilizadas como separadores primarios para retener cortes de gran tamaño.
- 05 Zarandas "Brandt" equipadas con mallas de menor apertura para separar cortes de granulometría fina.
- 01 Desarenador con 2 conos de 10 pulgadas.
- 01 Filtro de Finos (Desilter) provisto de 20 conos de 4 pulgadas.
- 01 Un Limpiador de Lodos (mud cleaner).
- 01 Un Secador de Cortes (cuttings dryer).

Se estima que, en la perforación de un pozo de 12 500 pies durante un lapso continuo de 45 días, se generarán alrededor de 860 toneladas de cortes. Dicho material será trasladado a tierra para su procesamiento, disposición final y eliminación en un relleno de seguridad autorizado, en cumplimiento de lo estipulado en el derogado Decreto Supremo N.º 015-2006-MEM.

3.4. Acciones Específicas para el Manejo de Residuos y/o Actividades del Plan de Manejo de Residuos

3.4.1. Tratamiento y Descarga de Cortes de Perforación

- Los cortes de perforación no serán descargados al mar. No se efectuará la descarga de cortes de perforación al mar.
- Los sólidos extraídos mediante el equipo de circulación serán depositados en contenedores de acero diseñados para la

recolección y el transporte de cortes en la propia unidad de perforación.

- Una vez completada su capacidad, estos contenedores serán enviados a tierra firme (puerto de Paita). Desde allí, los residuos serán gestionados como peligrosos por una EPS-RS y trasladados a un relleno de seguridad autorizado para su disposición final.

3.4.2. Ubicación de los Componentes: Secador de Cortes y Diagrama de Flujo del Proceso

En la Figura 6, se presenta una disposición espacial tipo del secador de cortes (cuttings dryer) instalado a bordo de la unidad móvil de perforación costa afuera (MODU) y un diagrama de flujo estándar que describe el proceso correspondiente.

Figura 6.

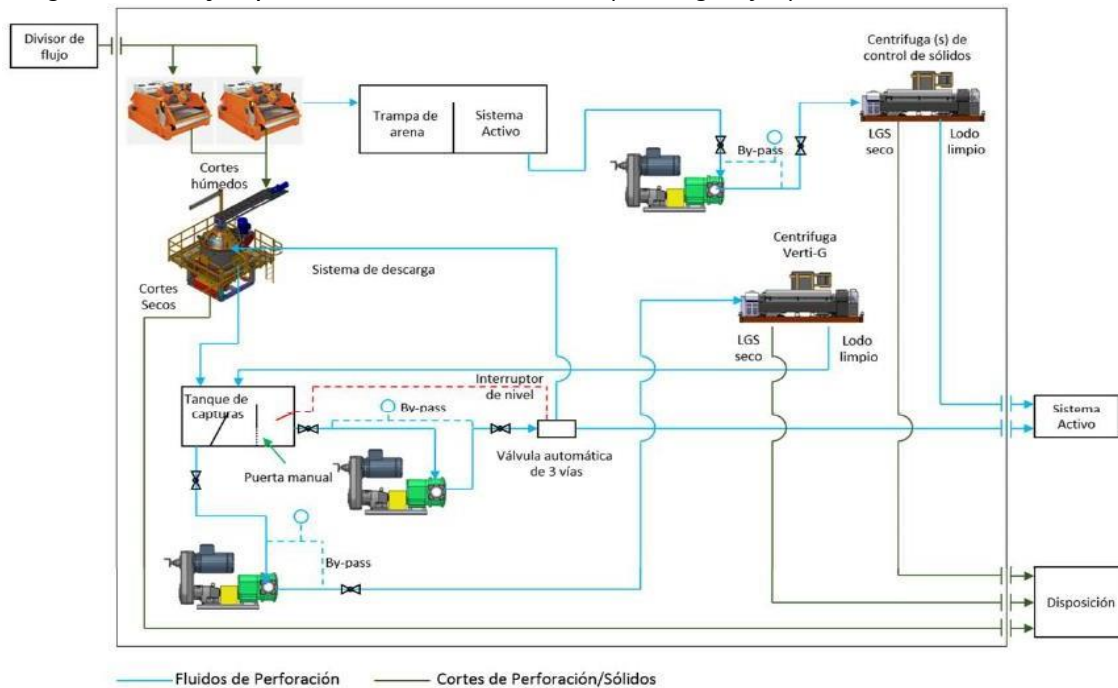
Foto referencial de la instalación del secador de cortes (Cutting Dryer) en el MODU



Fuente: Halliburton

Figura 7.

Diagrama de flujo típico del secador de cortes (Cutting Dryer)



Fuente: Halliburton

3.5. Manejo y Tratamiento de los Cortes

Se plantea incorporar como alternativa tecnológica para el manejo y procesamiento de cortes provenientes de fluidos no acuosos (NAF) la utilización de un Sistema Termomecánico de Limpieza de Cortes (TCC – Hammermill). Esta tecnología permitirá, bajo condiciones ambientalmente seguras, la descarga al mar de polvos previamente limpiados, así como la recuperación y reutilización de un volumen superior de aceites base y agua.

Asimismo, cabe destacar que la alternativa de manejo de cortes que contempla el uso del secador de cortes (cuttings dryer), su traslado marítimo hasta tierra firme y el transporte posterior en camiones hacia un relleno de seguridad para su disposición final, cuenta con autorización mediante la Resolución Directoral N.º 163-2013-MEM/AEE, la cual aprobó el EIA-S. Por este motivo, esta modalidad continuará siendo una opción válida para el tratamiento de dichos materiales.

En este sentido, el presente trabajo respalda la utilización del Sistema Termomecánico de Limpieza de Cortes (TCC – Hammermill) junto con la descarga de polvo limpio al mar como una alternativa tecnológica. Aunque su implementación implica un costo superior respecto a los secadores de cortes convencionales, la empresa operadora plantea incorporarlo debido a que está catalogado como la Mejor Tecnología Disponible (Best Available Technology – BAT) para el tratamiento de cortes de perforación y como la Mejor Práctica Ambiental (Best Environmental Practice – BEP) a nivel internacional, de acuerdo con los lineamientos establecidos por la Comisión Oslo – París (OSPAR).

Esta alternativa tecnológica para el manejo de cortes de perforación se ajusta a lo establecido en el artículo 83.2a del Decreto Supremo N.º 039-2014-EM, correspondiente al Reglamento para la Protección Ambiental en las Actividades de Hidrocarburos, que regula la disposición en el mar de cortes limpios provenientes de plataformas costa afuera.

3.5.1. Alcances del Proyecto

El presente proyecto incluye la instalación del sistema TCC a bordo de la unidad de perforación costa afuera (MODU), con el propósito de tratar los cortes de perforación como parte de las actividades de manejo de fluidos de perforación, y disponer posteriormente el polvo limpio resultante en el mar. Esta alternativa se plantea como una opción adicional para la empresa, en reemplazo o complemento del sistema de secador de cortes (cuttings dryer) previamente autorizado en el EIA.

- Realizar la limpieza de los cortes generados con fluidos no acuosos (NAF) y sus componentes autorizados, cumpliendo

los estándares internacionales (IFC/Banco Mundial, OSPAR) y las disposiciones vigentes en la normativa peruana.

- Recuperar el agua extraída durante el proceso del TCC – Hammermill para su reutilización en distintas operaciones dentro del MODU.
- Recuperar el aceite base obtenido del TCC – Hammermill para reincorporarlo en la formulación de lodos de perforación a base de NAF y en otras actividades a bordo de la unidad.
- Disminuir la logística asociada al transporte marítimo y terrestre de los cortes con NAF hasta un relleno de seguridad en tierra.
- Reducir el volumen total de residuos generados en aproximadamente un 60 %, lo que significa que el material tratado representará cerca del 40 % del volumen original de cortes sin tratar.
- Minimizar el área requerida en rellenos de seguridad para la disposición final de cortes contaminados.
- Mejorar la seguridad del personal en operaciones costa afuera y en tierra mediante la reducción del número de maniobras con grúa necesarias para movilizar las cajas con cortes.
- Disminuir la probabilidad de derrames de cortes, tanto en tierra como en el medio marino.
- Incrementar la seguridad vial y reducir la congestión en carreteras al disminuir la cantidad de camiones empleados para el traslado de cortes hacia el relleno de seguridad.

3.5.2. Sustento del Proyecto

Esta alternativa se respalda como una aplicación de la Mejor Tecnología Disponible (Best Available Technology – BAT) y de las Mejores Prácticas Ambientales (Best Environmental Practice – BEP) para el tratamiento y disposición de cortes de perforación generados con fluidos no acuosos (NAF), con el propósito principal de minimizar los impactos sobre el medio ambiente y reducir los riesgos vinculados con la seguridad y la protección ambiental.

En efecto, el Sistema TCC–Hammermill, diseñado para la limpieza de cortes de perforación, transforma este material —considerado potencialmente peligroso— en un residuo limpio con un contenido de hidrocarburos inferior al 1 %. Este nivel de pureza lo hace incluso más seguro que los cortes generados con lodos de base acuosa, cuya disposición en el mar está autorizada por el artículo 83.2 del Decreto Supremo N.º 039–2014-EM, parte del Reglamento para la Protección Ambiental en las Actividades de Hidrocarburos.

Además de la limpieza, el uso de la opción tecnológica TCC – Hammermill permite recuperar el aceite base utilizado en los lodos de perforación y el agua obtenida en el proceso, para su posterior reutilización en operaciones realizadas a bordo del MODU. Este procedimiento genera un polvo limpio y no peligroso, cuya descarga en el mar se lleva a cabo cumpliendo las normativas internacionales más estrictas, como las establecidas por el IFC/Banco Mundial y la OSPAR, en concordancia con las prácticas internacionales vigentes.

En consecuencia, la aplicación de esta tecnología alternativa posibilita la disposición en el mar de los residuos litológicos tratados y libres de contaminantes, junto con el reciclaje de los insumos recuperados. Esta práctica aporta beneficios significativos al proyecto, como la reducción de riesgos e

impactos ambientales derivados del transporte de cortes hacia un relleno de seguridad, así como la disminución de la exposición del personal durante estas operaciones, tanto en la zona del proyecto como en áreas más alejadas.

3.5.3. Análisis comparativo entre el Método Tradicional y el TCC Hammermill

Una vez instalado el BOP sobre el cabezal del pozo en el lecho marino, el proyecto de perforación costa afuera empleará un lodo a base sintética (Synthetic Based Mud – SBM), perteneciente a una categoría específica de fluidos de base no acuosa (NAF) con propiedades ambientalmente aceptables. Este tipo de lodo facilitará la circulación de los cortes tanto dentro como fuera del pozo durante las operaciones.

En el EIA-S del Proyecto de Perforación Exploratoria en el Lote Z-38 se dispuso que el tratamiento de los cortes se realizaría mediante un secador de cortes, equipo que generalmente produce un residuo con un contenido de hidrocarburos entre el 4 % y el 5 %. De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, 2000) y la normativa brasileña (IBAMA), el valor máximo permitido para la descarga de hidrocarburos en los cortes (Oil on Cuttings – OOC) es de 6,9 g/100 g (6,9 %) o menos en sólidos secos.

En la normativa peruana, el Decreto Supremo N.º 039–2014-EM establece en su artículo 83.2b que solo se permite la descarga de cortes limpios, y en el artículo 83.2c, que los lodos de base no acuosa, en cualquier condición, deben ser trasladados a tierra firme para su tratamiento y disposición final. Sin embargo, los avances tecnológicos actuales permiten separar los cortes de los lodos de base no acuosa bajo parámetros ambientalmente aceptables, lo que hace posible su disposición en el mar.

Con el fin de permitir la descarga en el mar de polvo limpio —con un contenido residual de hidrocarburos en los cortes (OOC) inferior al 1 %—, la empresa operadora plantea incorporar el uso del Sistema TCC–Hammermill como alternativa para el manejo de cortes. Esta tecnología está reconocida como la Mejor Tecnología Disponible (Best Available Technology – BAT) y la Mejor Práctica Ambiental (Best Environmental Practice – BEP), y se presenta como una opción adicional a la ya aprobada en el EIA-S.

El Sistema TCC cuenta con autorización para su empleo en operaciones de perforación en el Perú y ha demostrado su eficacia en distintos países, tanto en tierra como en costa afuera.

Su uso en el procesamiento de cortes a base de NAF produce un residuo seco y sólido compuesto por rocas pulverizadas limpias (polvo) con un contenido de hidrocarburos inferior al 1 %, cumpliendo con las regulaciones de la OSPAR y del Banco Mundial – IFC. Además, se obtienen agua destilada y aceite, ambos recuperados para su reutilización en las operaciones de perforación.

Esta tecnología fue desarrollada inicialmente en Noruega para la limpieza de derrames y posteriormente adoptada en el Reino Unido para el tratamiento de cortes. Su principio de funcionamiento se basa en la fricción, mediante una serie de brazos con martillos montados en un eje central que gira a alta velocidad dentro de una cámara de procesamiento. El calor generado por la fricción concentra la temperatura más elevada en el interior de las partículas.

El proceso comienza con la adición de sólidos o cortes; cuando se alcanza la temperatura adecuada, se incorporan los cortes a tratar. Al atravesar la cámara de procesamiento, la fricción de los martillos produce el calor necesario para evaporar el agua y el aceite presentes. Estos vapores se conducen a un

condensador de aceite y a un condensador de vapor, donde se recuperan ambos fluidos en tanques separados para su posterior reciclaje en las operaciones de perforación.

El material pulverizado resultante suele contener menos del 1 % de hidrocarburos. El aceite adherido a la roca pulverizada corresponde a cadenas de hidrocarburos generadas como subproducto de la incineración de los cortes. Todo el proceso se realiza de forma automática mediante un sistema de control lógico programable (PLC).

Entre sus ventajas frente a tecnologías de tratamiento convencionales, el sistema TCC – Hammermill opera a una temperatura general baja y con un tiempo de retención muy corto. El modelo propuesto para el Lote Z-38 ha sido reconocido en la industria petrolera como la Mejor Tecnología Disponible (BAT) para el tratamiento de cortes con NAF.

Finalmente, se cumplen los requisitos para la descarga de los cortes litológicos procesados por este sistema, los cuales consisten en roca pulverizada limpia y libre de contaminantes, apta para su disposición en el mar bajo condiciones ambientalmente aceptadas, conforme a los lineamientos internacionales del Banco Mundial y bajo los principios de la Mejor Tecnología Disponible (Best Available Technology – BAT) y la Mejor Práctica Ambiental (Best Environmental Practice – BEP).

3.5.4. Mejor Tecnología Disponible (BAT) y Mejor Práctica Ambiental (BEP)

La Mejor Tecnología Disponible (BAT) se refiere a los procedimientos, equipos o métodos operativos más avanzados que se emplean para minimizar descargas, emisiones y la generación de residuos. En complemento, la Mejor Práctica Ambiental (BEP) consiste en aplicar la combinación más adecuada de

medidas y estrategias de control ambiental, incluyendo diversas opciones de manejo.

Tanto la BAT como la BEP pueden experimentar cambios con el tiempo para una fuente específica, en respuesta a los avances tecnológicos, las condiciones económicas y sociales, así como a la evolución del conocimiento y la comprensión científica. En el escenario más favorable, las operaciones costa afuera aplican una combinación de BAT y BEP ajustada a las condiciones del sitio, con el objetivo de prevenir y reducir la contaminación al nivel más bajo posible que sea técnica y razonablemente alcanzable.

Mientras que la BAT se enfoca principalmente en la implementación de técnicas, la BEP se centra en la adopción de medidas y estrategias de control ambiental. Por ello, al analizar distintas opciones para la disposición de los cortes, es fundamental adoptar un enfoque integral de gestión de residuos, en el que la reducción sea un componente clave dentro del diseño del proyecto y se consideren los siguientes aspectos:

- **Riesgo para la salud humana:**

El aumento en la manipulación de residuos eleva los riesgos para el medio ambiente, la salud y la seguridad. El traslado de los cortes en cajas hasta tierra firme implica peligros para el personal, ya que por cada pozo podrían ser necesarios cerca de 3 000 izamientos (Revista de Petróleo y Gas, 2004).

- **Total de energía requerida:**

Se estima que, por cada 100 toneladas de cortes procesadas con el sistema TCC – Hammermill, se recuperarían aproximadamente 10 toneladas (equivalentes a 80 barriles) de NAF, utilizando entre 2 y 2,2

toneladas de combustible durante el procesamiento. En contraste, la manipulación y el transporte de 100 toneladas de cortes para su tratamiento en tierra firme demandarían alrededor de 3,5 toneladas de combustible.

- **Menor impacto al aire, agua, suelo y sedimentos marinos:**

Para que la disposición de cortes en tierra firme sea viable, es imprescindible contar con instalaciones adecuadas, que incluyan barcos, servicios portuarios apropiados, equipos pesados para el izaje y medios de transporte terrestre hasta las áreas autorizadas de disposición. Estos sitios deben asegurar que el impacto ambiental — por ejemplo, debido a la lixiviación de contaminantes— no supere al que se generaría si los cortes litológicos limpios fueran descargados costa afuera. Además, el traslado de cortes no tratados hacia tierra firme conlleva el riesgo de derrames accidentales en el mar, lo que podría provocar un incidente ambiental de magnitud y requerir costosas operaciones de limpieza.

- **Generación de residuos:**

En Estados Unidos, la autoridad reguladora identificó que, entre los fluidos no acuosos, los fluidos a base sintética (Synthetic Based Fluids – SBF) representan una alternativa que permite una mayor prevención de la contaminación en comparación con los fluidos a base de agua (Water Based Fluids – WBF).

Esto se debe a que los SBF facilitan la perforación de un pozo más limpio, con menor desprendimiento de material y una reducción en el volumen de cortes generados.

El empleo de SBF fomenta la prevención de la contaminación al impulsar tecnologías más eficientes para el control de sólidos y favorecer el reciclaje de estos fluidos en las operaciones de perforación. Un mayor nivel de reciclaje de SBF disminuye tanto la cantidad de fluido requerido para las operaciones como el volumen descargado junto con los cortes (Johnston et al., 2004).

- **Uso de químicos:**

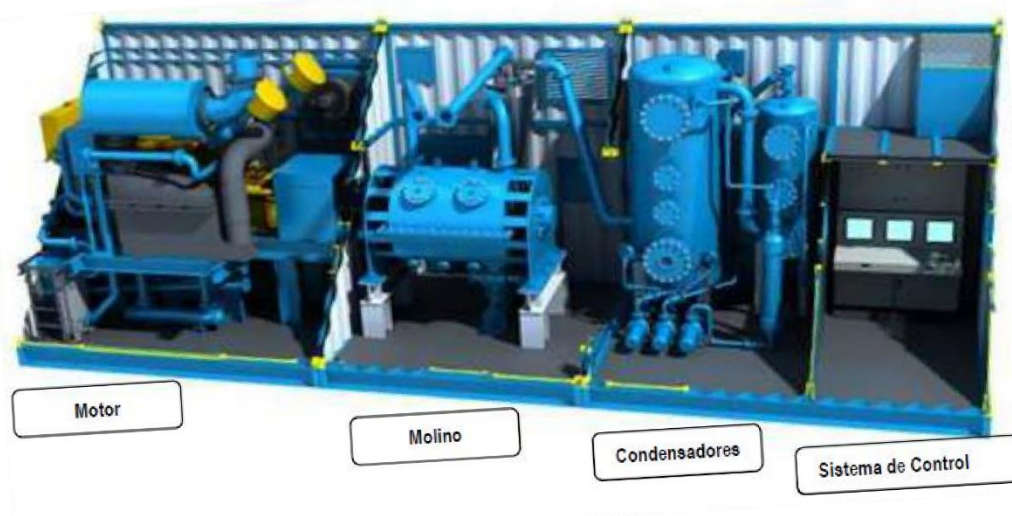
Los fluidos a base sintética (SBF) se reutilizan en la mayor medida posible, mientras que los fluidos a base de agua (WBF) suelen descargarse sin pasar por un tratamiento previo. En consecuencia, el empleo de SBF implica una menor liberación de productos químicos —principalmente barita— al medio ambiente.

3.6. Sistema Termomecánico para Limpieza de Cortes (TCC –Hammermill)

El TCC – Hammermill opera bajo el principio de la separación térmica.

Figura 8.

Configuración en línea recta, mostrando los componentes



Fuente: Halliburton

El equipo previsto para instalarse en el MODU (Figura 8) cuenta con un diseño modular, lo que permite su adaptación y montaje en cualquier plataforma o embarcación de perforación (MODU), de acuerdo con las necesidades de espacio y la disposición de los componentes de soporte.

Figura 9.

Vista panorámica en línea recta, mostrando los componentes



Fuente: Halliburton

3.6.1. Descripción del proceso TCC-Hammermill

El TCC–Hammermill es un molino de forma cilíndrica diseñado para triturar los residuos de cortes. Durante el proceso de molienda, la acción rápida genera calor interno que eleva la temperatura de las partículas molidas, provocando la evaporación inmediata del aceite y el agua presentes en los sólidos. Este calor se produce exclusivamente por la fricción generada entre los cortes y la acción de los martillos, que los impactan contra las paredes del molino.

Los gases liberados durante el proceso son conducidos desde el molino hacia un ciclón, donde se eliminan las partículas finas de roca. A continuación,

los gases pasan a los condensadores de aceite y de vapor, en los que se recuperan líquidos como el aceite y el agua. El polvo de roca resultante, con un contenido de hidrocarburos inferior al 1 %, se recolecta y analiza para confirmar que cumple con este límite, en concordancia con la práctica internacional para este tipo de residuo. El rendimiento del TCC–Hammermill está directamente vinculado a la energía transferida al material residual, manifestada como el calor generado durante la molienda.

Cuando se transfiere una mayor cantidad de calor a los residuos, se incrementa la velocidad de evaporación del aceite y del agua, lo que reduce el tiempo de permanencia del material en la cámara de procesamiento y permite aumentar la tasa de producción. La eficiencia del sistema también depende de la consistencia de los residuos tratados: un menor contenido de líquidos favorece un mayor rendimiento.

operadores capacitados, el sistema está diseñado para funcionar de forma autónoma.

Este sistema también previene que se excedan las temperaturas y presiones críticas, y dispone de la capacidad de apagar la unidad automáticamente si se presenta esta situación. Otra función importante es el almacenamiento de datos históricos del proceso, lo que permite analizar tendencias en cualquier momento. En cuanto al manejo del material, los cortes procedentes de las zarandas pueden dirigirse a las instalaciones de almacenamiento o enviarse directamente a la tolva situada en el patín de la bomba de alimentación.

Desde allí, una bomba hidráulica de desplazamiento positivo con pistón impulsa el flujo de residuos hacia la cámara de procesamiento del molino. El PLC regula la cantidad de material que ingresa en función de la temperatura interna del equipo. Para generar el calor necesario, el interior del molino contiene una serie de martillos que se desplazan a través de los residuos, provocando la fricción que eleva la temperatura.

El proceso de molienda no solo reduce el tamaño de las partículas, sino que también libera el aceite y el agua contenidos en ellas. A medida que el molino recibe los residuos, la carga del motor o impulsor aumenta. El sistema de control detecta este incremento y, para regularlo, activa la válvula giratoria de descarga, permitiendo que el polvo de los cortes salga del molino hacia el sistema de recolección. Los gases generados en el molino se canalizan hacia el ciclón por medio del tubo de escape, donde se separa el polvo fino arrastrado junto con el flujo gaseoso.

Posteriormente, el gas pasa desde la salida del ciclón al condensador de aceite. Para evitar la condensación prematura, el conducto de escape del molino,

el ciclón y su salida se mantienen calentados eléctricamente, asegurando una temperatura suficiente. Al ingresar al condensador de aceite, el gas atraviesa una cortina de aceite en flujo vertical, lo que provoca la condensación del aceite retenido. Este aceite se recircula mediante una bomba de circulación a través del intercambiador de calor del condensador, manteniendo así la temperatura óptima de condensación. Una válvula con control térmico regula el flujo del agua de enfriamiento por el intercambiador según sea necesario para mantener estable la temperatura interna del condensador.

El nivel de aceite dentro del condensador se controla mediante una bomba de aceite recuperado, accionada por un interruptor de nivel que activa su descarga hacia el almacenamiento cuando es necesario. Dado que el aceite tiene un punto de condensación más alto que el agua, en esta etapa únicamente se separa el aceite de la corriente de gas. El gas restante, compuesto por vapor y vapor de agua, se dirige desde el condensador de aceite hacia el condensador de vapor, donde atraviesa una cortina de agua enfriada que condensa el contenido de agua.

En el condensador de vapor, una bomba impulsa el agua de enfriamiento a través de un intercambiador de calor para optimizar la eficiencia de la condensación. El agua recolectada se hace circular por un separador provisto de un sistema de vertederos, diseñado para eliminar el aceite residual o las partículas ultrafinas del material de corte que hayan atravesado el sistema. Tanto el agua como el aceite recuperados se almacenan para su reutilización en las operaciones de perforación

El calor y su control constituyen el factor determinante en todo el proceso. Una regulación precisa asegura que los residuos alcancen la temperatura necesaria para liberar completamente el aceite y el agua, reduciendo su

contenido hasta niveles aceptables para su disposición final y garantizando que la calidad del aceite recuperado no se vea comprometida.

3.6.2. Componentes de un sistema TCC – Hammermill

- **Molino**

La cámara del molino está conformada por una carcasa cilíndrica equipada con bridas horizontales. Este diseño facilita que la unidad pueda dividirse en dos secciones, lo que permite un acceso más sencillo para labores de mantenimiento interno. Las paredes internas cuentan con un revestimiento de caras endurecidas, cuyo propósito es minimizar el desgaste por abrasión. En su interior, el rotor está compuesto por un eje central sobre el que se fijan varios brazos provistos de martillos cruciformes, también con extremos endurecidos para soportar el trabajo abrasivo (ver Figura 10).

El eje se encuentra soportado en ambos extremos mediante un conjunto de cojinetes externos, los cuales son refrigerados a través de un sistema de agua en circuito cerrado. Para el conjunto de glándulas de empaque del eje, se han instalado bombas de lavado que suministran agua potable.

En la parte superior del molino se ubican un disco de ruptura, la salida o escape del molino y una puerta de inspección desmontable. En la parte inferior, se localiza una válvula giratoria encargada de descargar el polvo, cuyo funcionamiento es similar al de una bomba de paletas. El revestimiento exterior del molino tiene la función de contener el calor generado durante la molienda y, al mismo tiempo, reducir la temperatura en la superficie externa

El escape del molino conduce los gases generados en la cámara de procesamiento hacia el ciclón. Dicho conducto cuenta con un sistema de traceado eléctrico que lo mantiene a una temperatura suficiente para evitar la condensación de los gases antes de llegar a los condensadores. Este sistema de traceado es controlado y supervisado automáticamente por el sistema de control.

La válvula giratoria inferior opera bajo la orden del sistema de control, descargando el polvo hacia el transportador de tornillo sinfín cuando la carga en la unidad impulsora alcanza un valor preestablecido. Si la carga disminuye por debajo de ese valor, el sistema detiene la válvula, manteniendo una cama de polvo en el interior de la cámara de procesamiento.

El transporte de cortes hacia el molino se realiza mediante una línea flexible, a través de la cual opera una bomba de alimentación de desplazamiento positivo con pistón. Esta bomba cuenta con dos cilindros paralelos, con aberturas hacia la tolva. Su funcionamiento es alterno: mientras el cilindro 1 se extiende, impulsa el material residual contenido hacia el tubo de transferencia, y de manera simultánea, el cilindro 2 se retrae para succionar nuevo material.

El ciclo de trabajo se repite de forma automática, siendo la velocidad de operación de los cilindros ajustada por el sistema de control en función de la temperatura interna del molino. Finalmente, la bomba de alimentación obtiene su energía de un motor eléctrico que acciona su generador.

- **Ciclón**

La función principal del ciclón consiste en separar y eliminar el polvo presente en el flujo de gas que pudiera escapar del molino. Los gases desprendidos de los residuos dentro de la cámara del molino se desplazan hacia el ciclón impulsados por la presión generada internamente. Este dispositivo está conformado por dos recipientes de forma cónica dispuestos verticalmente, con la sección de mayor diámetro situada en la parte superior. En el extremo inferior del cono más pequeño se encuentra la válvula rotativa de descarga, mientras que en la parte más elevada del recipiente superior se instala un disco de ruptura. (Ver Figura 10).

- **Condensador de Aceite**

El condensador de aceite está conformado por un cilindro dispuesto de manera vertical, el cual incorpora en su interior un deflector y un sistema de vertederos. En su parte superior cuenta con un disco de ruptura. Desde la parte alta del condensador se introduce un flujo de aceite que forma una cortina descendente, a través de la cual debe atravesar el gas caliente proveniente del ciclón antes de abandonar el equipo. Para conservar dicha cortina a la temperatura óptima —que suele ser de aproximadamente 110 °C—, el aceite circula a través del intercambiador de calor del propio condensador. El paso de agua de enfriamiento por este intercambiador es regulado por una válvula con control térmico, que ajusta el flujo según las necesidades para mantener estable la temperatura interna del condensador.

- **Condensador de Vapor de Agua**

Una vez que el gas abandona el condensador de aceite, ingresa al condensador de vapor, donde el vapor remanente se transforma en agua líquida. El ingreso del vapor se realiza por la parte inferior de este condensador, atravesando una cortina de agua descendente que provoca su condensación. El agua resultante fluye por gravedad hacia los tanques de tratamiento, en los cuales pasa por un separador provisto de un sistema de vertederos que, de forma natural, permite separar el aceite del agua.

El aceite flota en la parte superior del agua y hasta un compartimiento aparte donde se recolecta y se transfiere al almacenamiento de aceite recuperado, el agua se recolecta a través de tubos que está en un nivel inferior y fluye a un tanque de agua recuperada, el tanque de agua recuperada tiene un interruptor de nivel alto que, cuando es activado, señala al sistema de control que arranque la bomba de agua recuperada, transfiriendo el agua al almacenamiento para su reciclaje en otros procesos a bordo del MODU.

- **Sistema de Control**

- **Pantallas del Sistema**

El TCC - Hammermill cuenta con un sistema de control gestionado a través de un PLC, el cual opera habitualmente con una intervención mínima por parte del operador. Este sistema supervisa y regula el proceso recopilando datos sobre variables como presión, temperatura, flujo y nivel, y ejecuta las acciones de control necesarias para mantener la operación dentro de los valores de ajuste establecidos. Desde

la pantalla de control, es posible manejar cada motor del sistema de forma individual o bien controlarlos en conjunto.

- **Alarmas**

Dentro del proceso se han dispuesto diversas alarmas y mecanismos de cierre. Las alarmas actúan como avisos de que un componente específico se ha desactivado o que alguno de los parámetros monitoreados ha sobrepasado los límites establecidos. En los elementos más críticos, el sistema incorpora además una función de cierre automático que detiene la operación si la condición de alarma persiste o se agrava.

3.6.3. Materiales Recuperados del Proceso TCC

Los cortes de perforación extraídos del pozo se separan inicialmente en dos fases principales: una fase líquida, compuesta por agua y aceite base, y una fase sólida, formada por fragmentos litológicos de la formación perforada junto con sólidos añadidos para la preparación de los lodos de perforación. Antes de su procesamiento, la composición promedio de estos cortes suele ser la siguiente:

- 50% en volumen de sólidos
- 20% en volumen de agua
- 30% en volumen de aceite sintético

Los tres materiales se recuperan por separado después del procesamiento de los cortes en el TCC -Hammermill.

- **Fase Líquida:**

Todos los líquidos recuperados por el proceso del TCC - Hammermill serán reciclados en los distintos procesos a bordo del MODU.

- **Aceite**

El contenido de aceite del fluido de perforación contenido dentro de la materia prima del TCC – Hammermill se transfiere directamente de vuelta al MODU para volver a usarla después de su recuperación.

- **Agua**

El contenido de agua adentro de la materia prima se recupera principalmente del fluido de perforación, aunque también se encuentra una parte de la formación; ésta estará disponible para volver a usarla en los procesos a bordo del MODU.

- **Fase Líquida:**

- **Cortes limpios (Polvo)**

Después del tratamiento en el TCC-Hammermill, los cortes limpios —compuestos por roca pulverizada de la formación geológica y sólidos de los lodos— presentan un contenido de hidrocarburos inferior al 1 %, cumpliendo así con los límites establecidos por la OSPAR para el Mar del Norte y por el IFC/Banco Mundial.

Estos sólidos son descargados al mar mediante una línea de dispersión ubicada a 15 m de profundidad, de acuerdo con los lineamientos del IFC/Banco Mundial.

Los tres productos recuperados corresponden a los principales constituyentes de los cortes antes de su procesamiento. La composición de la fracción de polvo limpio depende directamente de la naturaleza de la formación perforada. Dichos cortes consisten en fragmentos de roca recubiertos por lodo de base sintética sin aditivos adicionales. En general, alrededor del 90 % del polvo corresponde a material rocoso de la formación, mientras que el porcentaje restante está compuesto por sólidos comúnmente incorporados en sistemas de lodos de base sintética, como barita y bentonita, en concentraciones permitidas.

3.6.4. Descarga de Polvo Limpio

El residuo sólido limpio generado en el TCC–Hammermill, conocido como polvo limpio, será conducido hacia la línea de descarga del MODU. El punto final de esta línea estará ubicado a 15 metros bajo el nivel del mar, en cumplimiento con los estándares internacionales definidos por el IFC/Banco Mundial. Esta profundidad asegura una dispersión eficiente de los cortes y mantiene la descarga alejada de las tomas de agua de mar del MODU.

La tubería utilizada para la descarga estará firmemente fijada a la estructura del MODU con el fin de evitar desplazamientos o impactos ocasionados por las corrientes marinas. En caso de que la longitud de la tubería supere el calado del MODU, ésta podría quedar expuesta a la acción de las corrientes. Cabe destacar que, según la normativa OSPAR, los cortes litológicos pulverizados provenientes del TCC–Hammermill presentan un comportamiento ambiental en el medio marino equivalente al de los cortes con partículas de lodo a base de agua, y que la legislación peruana permite su descarga siempre que no contengan contaminantes.

Para transportar el polvo de roca limpio desde el TCC hasta el punto de descarga a 15 m de profundidad, se empleará agua como medio de arrastre. Este método favorece la dispersión natural y evita bloqueos o acumulaciones dentro de la tubería. Las corrientes predominantes en la zona de operación del MODU facilitarán la distribución de estos sólidos limpios en el mar.

En términos operativos, considerando una capacidad de procesamiento de aproximadamente 5 toneladas/hora y la composición promedio de los cortes, la cantidad final de polvo limpio descargado sería de:

- **Cortes limpios (polvo) – aproximadamente 2.5 t/hora**

Para el transporte de estas 2,5 toneladas por hora, se requerirán aproximadamente 54 m³/hora de agua de mar, lo que equivale a una descarga continua de cerca de 41 kg de polvo por minuto. Este sistema de transporte por agua representa la mejor práctica ambiental según las directrices del IFC/Banco Mundial y OSPAR, ya que resulta más favorable que la descarga directa del residuo sólido al mar.

Es importante subrayar que el agua utilizada para el arrastre del polvo limpio no forma parte del proceso de limpieza de los cortes, por lo que esta descarga no se clasifica como un efluente líquido. En cambio, la fase líquida efectivamente recuperada durante el proceso de limpieza de cortes será destinada al reciclaje en distintas operaciones a bordo del MODU (Unidad de Perforación Marítima – Mobile Offshore Drilling Unit).

Capítulo IV: Análisis Económico

El análisis económico se centra en comparar los costos asociados a dos métodos distintos para el manejo de cortes de perforación generados con fluidos no acuosos (NAF):

- La disposición mediante secador de cortes y su transporte a tierra firme para eliminación en relleno de seguridad.
- El tratamiento in situ con el sistema Termomecánico de Limpieza de Cortes (TCC – Hammermill).

En la primera alternativa, se contempla la logística marítima para trasladar el material desde la plataforma hasta el puerto de recepción, el transporte terrestre hacia el relleno autorizado y el pago de tarifas por disposición final. Estos costos se incrementan con el número de viajes requeridos, la manipulación de carga y el combustible consumido en cada tramo. Además, este esquema conlleva riesgos operativos y ambientales asociados al traslado de residuos peligrosos.

Tabla 4.

Costo Estimado del Secador de Cortes

Descripción	Costo Unitario (MM \$)	Cantidad	Costo Total (MM \$)	Comentarios
Movilización / Desmovilización	2.4	1	2.4	Incluye transporte, ensamblaje, comisionamiento y desensamblaje
Costo	2.2	2	4.4	Incluye personal, equipamiento, combustible, costo de disposición en relleno, etc.
Total			6.8	Requiere menor inversión, pero presenta mayor riesgo de contaminación y no permite recuperar activos como el aceite.

En contraste, la implementación del sistema TCC – Hammermill a bordo del MODU permite procesar los cortes directamente en el sitio de perforación. De esta manera, se eliminan los gastos vinculados al transporte y disposición externa, al tiempo que se recupera aceite base y agua reutilizable. El sistema posibilita reducir el volumen de residuos en aproximadamente un 60 %, generando un ahorro significativo en términos logísticos y de gestión.

El costo de adquisición, instalación y operación del TCC – Hammermill es mayor que el de un secador convencional; sin embargo, este desembolso se compensa con la disminución de costos recurrentes por transporte y disposición final, así como por la valorización de los subproductos recuperados. Los beneficios económicos incluyen:

- Reducción del consumo de combustibles fósiles debido a la eliminación de transporte marítimo y terrestre.
- Ahorro en tarifas de disposición final en rellenos de seguridad.
- Menor gasto en la compra de fluidos base nuevos gracias a la recuperación del aceite.
- Disminución del tiempo de inactividad operacional por traslado y manipulación de residuos.

Tabla 5.*Costo Estimado de la Técnica TCC-Hammermill*

Descripción	Costo Unitario (MM \$)	Cantidad	Costo Total (MM \$)	Comentarios
Movilización / Desmovilización	2.8	1	2.8	Incluye transporte, ensamblaje, comisionamiento y desensamblaje
Costo	2.5	2	5	Incluye personal, equipamiento, combustible, etc.
Total			7.8	Inversión inicial mayor, pero balance favorable a mediano y largo plazo frente a tecnologías convencionales.

En resumen, aunque la inversión inicial para implementar el TCC – Hammermill es más elevada, el análisis económico evidencia que su adopción resulta más eficiente a largo plazo. El retorno de la inversión se justifica por la reducción de costos logísticos, la valorización de subproductos, el cumplimiento de normativas ambientales estrictas y la minimización de riesgos asociados al transporte y y manipulación de residuos.

Tabla 6.*Estimado de Costos de ambas Tecnologías*

Descripción	Secador de Recortes (MM \$)	TCC Hammermill (MM \$)	Diferencia (MM \$)	Comentario Comparativo
Movilización / Desmovilización	2.4	2.8	0.4	Ambos incluyen transporte y pruebas iniciales.
Costo (Operación)	4.4	5	0.6	Ambos incluyen personal, equipamiento y combustible, con leve mayor costo en TCC.
Total	6.8	7.8	1	TCC tiene mayor inversión inicial, pero menor riesgo ambiental y permite recuperar aceite; el secador es más económico, aunque con mayor riesgo de contaminación y sin recuperación de aceite.

Conclusiones

- La evaluación técnica y económica demuestra que el Sistema Termomecánico de Limpieza de Cortes (TCC – Hammermill) constituye la mejor alternativa para el tratamiento de recortes generados con fluidos no acuosos en el Zócalo Continental del Noroeste Peruano. Este método permite cumplir con las normativas ambientales más exigentes y reduce significativamente el impacto sobre el medio marino.
- La tecnología TCC – Hammermill logra disminuir el contenido de hidrocarburos en los sólidos tratados a niveles inferiores al 1 %, lo que posibilita su descarga controlada al mar bajo estándares internacionales.
- La implementación de este sistema reduce en aproximadamente un 60 % el volumen de residuos a disponer, optimiza el uso de espacios en rellenos de seguridad y disminuye la necesidad de transporte marítimo y terrestre, con la consiguiente reducción de riesgos operativos y costos logísticos.
- La recuperación de aceite base y agua durante el proceso no solo representa un beneficio ambiental, sino también económico, ya que disminuye la compra de insumos nuevos y mejora la eficiencia en el uso de recursos.
- Comparado con tecnologías convencionales, el TCC – Hammermill ofrece un balance más favorable entre inversión inicial y beneficios a mediano y largo plazo, justificando su aplicación en operaciones de perforación costa afuera.

Recomendaciones

- Adoptar el TCC – Hammermill como tecnología principal para el manejo de cortes de perforación con fluidos no acuosos, complementando o sustituyendo progresivamente el uso de secadores convencionales.
- Capacitar al personal operativo en la utilización y mantenimiento del sistema, con énfasis en procedimientos de seguridad y control ambiental.
- Implementar un programa de monitoreo continuo de parámetros ambientales (agua, sedimentos y biota) en las áreas cercanas a la descarga, a fin de garantizar que los impactos se mantengan dentro de los límites permitidos por la normativa nacional e internacional.
- Establecer un plan de valorización de los subproductos recuperados, priorizando la reutilización del aceite base y del agua destilada en las operaciones, con el fin de reducir costos y minimizar la generación de residuos.
- Incluir en los estudios de factibilidad futuros una evaluación detallada de los costos de ciclo de vida del sistema, para respaldar decisiones de inversión en proyectos similares.

Referencias Bibliográfica

ASME, S. S. (2011). *Drilling fluids processing handbook*. Elsevier.

Castillo, R. P. (2017). *Aplicación de la técnica de landfarming para la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos*.

Charles, M., & Sayle, S. (Abril del 2010). *Evaluación de tecnología de tratamiento de recortes de perforación costa afuera. En la Conferencia Internacional de la SPE sobre Salud, Seguridad y Medio Ambiente en la Exploración y Producción de Petróleo y Gas . On*.

Higley, D. (2004). *La cuenca del Progreso Provincia del noroeste de Perú y suroeste de Ecuador Sistemas de petróleo total Neógeno y Cretácico-Paleógeno . Editorial DIANE*.

Kirkness,, A. (Marzo de 2008). *Tratamiento de recortes de perforación contaminados con fluidos no acuosos: elevando los estándares ambientales y de seguridad. En IADC / SPE Drilling Conference . OnePetro*.

Liu, H. (2017). *Remediación de recortes de perforación a base de aceite mediante desorción térmica a baja temperatura (Tesis doctoral, Universidad del Norte de Columbia Británica)*.

Paulsen,, J., Omland, T., Igeltjarn,, H., & Solvang,, S. (2003 Octubre). *Eliminación de recortes de perforación, equilibrio de descarga cero y uso de la mejor técnica disponible. En SPE / IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibitio*.

Rodriguez, L. L. (2004). *TURISMO SOSTENIBLE EN EL ATLÁNTICO NORDESTE: EL PAPEL DE ESPAÑA EN LAS REUNIONES DEL COMITÉ DE BIODIVERSIDAD DEL*

CONVENIO OSPAR. *Revista Española de Derecho Internacional*, 56(1), 521-525.

Siddique, S. (2020). *Procesamiento, estructura y propiedades termomecánicas de nanoarcillas recuperadas, y su aplicación en nanocompuestos de poliamida 6 y polietileno de baja densidad (Tesis doctoral).*

Sinchitullo, J. (2020). *Evaluación del cuaternario. Energética.*

Stephenson, R. S., McCharen, R., & Hernandez,, E. (2004 Octubre).
Desorción térmica de aceite procedente de recortes de fluidos de perforación a base de aceite: procesos y tecnologías. En SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhib.