

**EVALUACIÓN LA IMPLEMENTACIÓN DE CENTRÍFUGAS DE VELOCIDAD  
VARIABLE DE ALTA CAPACIDAD CEN-TEX 1865 PARA EL CONTROL DE  
SÓLIDOS EN LA PERFORACIÓN DE UN POZO DEL CAMPO E EN LA CUENCA  
LLANOS ORIENTALES**

**AYALA PINZÓN JUAN DAVID  
GUTIERREZ GARCIA CAMILO ANDRES**

**Proyecto integral de grado para optar el título de  
Ingeniería de Petróleos**

**Orientador**

**Jorge Andrés Tovar**

**Ingeniero de Petróleos**

**FUNDACION UNIVERSIDAD DE AMERICA  
FACULTAD DE INGENIERIAS  
PROGRAMA DE INGENIERIA DE PETROLEOS  
BOGOTA**

**2021**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

---

---

**NOMBRE**

**Firma del director**

**Jurado**

---

**Nombre**

**Firma del presidente**

---

**Nombre**

**Firma del Jurado**

---

**Nombre**

**Firma del Jurado**

**Bogotá D.C. febrero de 2021**

## **DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro  
Dr. MARIO POSADA GARCÍA-PEÑA

Consejero Institucional  
Dr. LUÍS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Investigaciones  
Dra. MARÍA CLAUDIA APONTE GONZALEZ

Vicerrector Administrativo y financiero  
Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO

Secretaria General  
Dra. ALEXANDRA MEJÍA GUZMÁN

Decano de Facultad de Ingenierías  
Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director de Programa de Petróleos  
Ing. JUAN CARLOS RODRÍGUEZ ESPARZA

## **DEDICATORIA**

## **AGRADECIMIENTOS**

**PÁGINA DE CLÁUSULA SOBRE PROPIEDAD INTELECTUAL**

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>pág.</b>
RESUMEN	12
INTRODUCCIÓN	13
1.	MARCO TEÓRICO 17
1.1 Generalidades del sistema de control de sólidos	17
1.1.1 <i>Efectos de la acumulación de sólidos en el fluido de perforación.</i>	18
1.1.2 <i>Beneficios del control de sólidos.</i>	18
1.2 Métodos de control de sólidos	18
1.3 Principales equipos para control de sólidos (separación mecánica)	20
1.3.1 <i>Zarandas vibratorias o Shakers.</i>	20
1.3.2 <i>Mallas.</i>	20
1.3.3 <i>Mud cleaner.</i>	20
1.3.4 <i>Centrífugas decantadoras.</i>	21
1.3.5 <i>Principales componentes de las centrifugas</i>	22
1.3.6 <i>Parámetros de desempeño de las centrifugas</i>	23
1.3.7 <i>Tipos de centrifugas</i>	23
2.	METODOLOGÍA 25
2.1 Primera Etapa: Evaluación de las condiciones operativas de las unidades centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco en campo.	26
2.2 Segunda Etapa: Implementación de las centrifugas Centex-1865 y toma de muestras del lodo (líneas de succión y descarga).	28
2.3 Tercera Etapa: Evaluación de muestras de lodo en laboratorio para cada unidad centrifuga Cen-Tex 1865 y Kubco.	33
2.3.1 <i>Prueba del Azul de Metileno (MBT)</i>	35
2.3.2 <i>Porcentaje de Sólidos y Líquidos</i>	36
2.3.3 <i>Análisis de distribución de tamaño de partícula (Cilas)</i>	38
2.4 Cuarta Etapa: Análisis financiero de la implementación de las unidades centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco	39
2.4.1 <i>Datos financieros</i>	39
3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS 44

3.1	Análisis de la evaluación en campo junto con el estudio de las condiciones operativas de las centrifugas	44
3.2	Análisis de la evaluación de muestras de lodo en laboratorio para cada unidad centrifuga:	47
3.2.1	<i>Peso del lodo</i>	48
3.2.2	<i>Reología</i>	50
3.2.3	<i>Prueba de azul de metileno</i>	54
3.2.4	<i>Análisis de distribución de tamaño de partícula</i>	55
3.3	Análisis financiero de la implementación de las unidades centrifugas	63
3.3.1	<i>Valor presente neto (VPN)</i>	64
3.3.2	<i>Costo anual uniforme equivalente (CAUE)</i>	66
3.3.3	<i>Análisis financiero escenario operativo</i>	70
4.	CONCLUSIONES	72
	BIBLIOGRAFIA	74
	ANEXOS	76

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág.</b>
Figura 1. <i>Clasificación de partículas según su tamaño</i>	19
Figura 2. <i>Diagrama general de centrifugas decantadoras</i>	21
Figura 3. <i>Principales componentes de las unidades centrifugas</i>	23
Figura 4. <i>Diagrama general del proyecto</i>	26
Figura 5. <i>Estado mecánico pozo A</i>	27
Figura 6. <i>Dimensiones largo centrifuga Cen-Tex 1865</i>	29
Figura 7. <i>Dimensiones ancho Centrifuga Cen-Tex 1865</i>	29
Figura 8. <i>Distribución de las unidades centrifugas en Campo</i>	30
Figura 9. <i>Unidades centrifugas en operación</i>	31
Figura 10. <i>Mesas de soporte de las unidades centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco</i>	31
Figura 11. <i>Zona de centrifugas - Layout Holsan Top Drilling Pozo A</i>	32
Figura 12. <i>Prueba del Azul de Metileno (MBT)</i>	36
Figura 13. <i>Prueba de porcentaje de sólidos y líquidos.</i>	38
Figura 14. <i>Principio básico del analizador CILAS</i>	39
Figura 15. <i>Procedimiento para desarrollo del indicador económico valor presente neto</i>	43
Figura 16. <i>Procedimiento para desarrollo del indicador económico costo anual equivalente</i>	43
Figura 17. <i>Parámetros de operación centrifuga Cen-Tex 1865</i>	45
Figura 18. <i>Parámetros de operación centrifuga Kubco</i>	46
Figura 19. <i>Prueba de densidad</i>	49
Figura 20. <i>Prueba de viscosidad de embudo</i>	50
Figura 21. <i>Viscosidad plástica</i>	51
Figura 22. <i>Punto cedente</i>	52
Figura 23. <i>Esfuerzos de gel</i>	53
Figura 24. <i>Sólidos de baja gravedad específica</i>	54
Figura 25. <i>Prueba de azul de metileno</i>	55
Figura 26. <i>Línea de succión</i>	56
Figura 27. <i>Línea de descarga solida LGS</i>	58
Figura 28. <i>Línea de descarga liquida LGS</i>	59

Figura 29. <i>Línea de descarga solida LGS</i>	60
Figura 30. <i>Línea de descarga liquida LGS</i>	61
Figura 31. <i>Contraste de resultados en las líneas de descarga liquida de los equipos</i>	62
Figura 32. <i>Contraste de resultados en las líneas de descarga solida de los equipos</i>	63
Figura 33. <i>Flujo de caja centrifuga Cen-Tex 1865</i>	67
Figura 34. <i>Línea de tiempo de la maquina Kubco</i>	68

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. <i>Ficha técnica de las centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco</i>	28
Tabla 2. <i>Parámetros de operación de centrifugas Kubco y Cen-Tex 1865 en la perforación del pozo A</i>	32
Tabla 3. <i>Rangos para las propiedades según el programa de control de sólidos</i>	34
Tabla 4. <i>Propiedades típicas lodo PHPA</i>	35
Tabla 5 <i>Ingresos de operación</i>	40
Tabla 6. <i>Costos por equipo</i>	40
Tabla 7. <i>Costo de mantenimiento Kubco</i>	40
Tabla 8. <i>Costo de mantenimiento Cen-Tex 1865</i>	41
Tabla 9. <i>Costo de alistamiento</i>	41
Tabla 10. <i>Costo de transporte</i>	42
Tabla 11. <i>Especificaciones técnicas de centrifugas Kubco y Cen-Tex 1865</i>	44
Tabla 12. <i>Tabla de clasificación API de partículas según su tamaño</i>	47
Tabla 13. <i>Resultados Pruebas de laboratorio</i>	48
Tabla 14. <i>Reporte de resultados línea de succión</i>	57
Tabla 15. <i>Reporte de resultados línea de descarga solida LGS</i>	59
Tabla 16. <i>Reporte de resultados línea de descarga liquida LGS</i>	59
Tabla 17. <i>Reporte de resultados línea de descarga solida LGS</i>	60
Tabla 18. <i>Reporte de resultados línea de descarga liquida LGS</i>	61
Tabla 19. <i>Cálculo del VPN a través de Excel</i>	65
Tabla 20. <i>Consolidación de los costos cuatrimestrales</i>	66
Tabla 21. <i>Presentación de los datos agrupados para efectuar el cálculo</i>	66
Tabla 22. <i>Cálculo del CAUE con ayuda de Excel</i>	69
Tabla 23 <i>Costos de formulación y disposición final del fluido de perforación</i>	70

## RESUMEN

Un deficiente proceso de control de sólidos trae consigo consecuencias que se traducen en un aumento de los costos en la operación de perforación, pues se hace necesaria desde una inversión en tratamiento o formulación de nuevos lodos destinados al proyecto, hasta el mantenimiento de equipos que sufren desgaste; se propone a través del presente proyecto de grado una forma de hacer más eficiente el proceso de control de sólidos a partir de la implementación y posterior evaluación del desempeño de centrifugas de alta capacidad Cen-Tex 1865 en un campo de la cuenca de los Llanos Orientales. La validación del proyecto se llevó a cabo a partir de la comparación entre el rendimiento en la remoción de finos, y el tamaño de partícula resultante de la circulación del lodo de perforación en las citadas unidades centrífugas de alta capacidad, contra centrifugas convencionales de baja capacidad Kubco, para lo cual se realizaron pruebas de laboratorio al lodo de perforación a la descarga de cada centrifuga como la prueba de azul de metileno, con resultado de 22,5 lb/bbl en ambos equipos, la prueba de retorta, que en sólidos de baja gravedad específica arrojó 7,7% para la centrifuga Cen-Tex 1865 y 8% para la Kubco, y por último la prueba de Cilas, cuyo resultado para el tamaño de partícula fue de 9,03 micras contra 13,47 micras en cada equipo respectivamente. Finalmente, tras evaluar los indicadores financieros VPN y CAUE se concluyó que la centrifuga Kubco genera menos costos y más ganancias que la centrifuga Cen-Tex 1865, pero a nivel operativo la centrifuga Cen-Tex 1865 permite un ahorro de 539.175.960 COPS diarios en la formulación y disposición final del lodo de perforación, lo que hace de esta, sumado a los resultados de las pruebas de laboratorio la mejor opción en términos de eficiencia operativa.

Palabras claves: Control Sólidos, Centrifugas Alta Capacidad, Cen-Tex 1865, Eficiencia, Implementación, Perforación.

## INTRODUCCIÓN

La eficiencia del proceso de control de sólidos radica en el correcto funcionamiento de equipos esenciales como shakers, mud cleaners, centrífugas, etc. que ubicados de forma secuencial en campo, se encargan de reducir o eliminar progresivamente los sólidos o recortes que fluyen dentro del lodo de perforación cuando la broca se abre paso a través de la formación a perforar; dichos recortes se clasifican de acuerdo a su tamaño en micras (coloidales, ultrafinos, finos, medios, intermedios y gruesos), siendo los más difíciles de retirar los sólidos finos y ultrafinos (74-2 micras), de los que se encargan en específico las centrífugas decantadoras.

Estudios como ¿Qué tan efectivo es el equipo de control de sólidos actual para fluidos de perforación con peso de material de peso micronizado? (Jarrod Massam, Shannon K. Stocks, Douglas Oakley, Colin Bremmer- 2008) plantea si los equipos usados en campo son verdaderamente eficientes en la remoción de partículas extremadamente pequeñas como finos y ultrafinos, haciendo un análisis de los parámetros de diseño de equipos como las shakers y las centrífugas decantadoras, con énfasis en cuan finas son las mallas (mesh) para las shakers y pruebas en campo para unidades centrífugas de distintos tamaños y velocidades; en este estudio se concluye que mientras más finas son las mallas, y mientras más volumen de fluido y más velocidad manejen las centrífugas, mayor es su capacidad de remover partículas de tamaño micrón, sin embargo, así como es mayor esta capacidad de remoción, también es mayor la posibilidad de quitar al lodo de perforación agentes densificantes como arcillas, que son usadas en su formulación, por lo que las empresas deben hacer un balance entre los elementos químicos que se pierden del lodo, el desgaste generado en las mallas de las shakers, y los costos en que se incurriría si el lodo se contamina y es necesario un proceso de dilución como tratamiento, esto en pro de establecer los mayores beneficios a nivel de costos operativos, y los mejores parámetros de operación de los equipos. Otro estudio como “Método de campo para evaluar la eficiencia del equipo de control de sólidos” (J.S. Patel, J.F. Steinhauser- 1979) nos muestra de forma general los perjuicios que trae para la operación de perforación tener lodos contaminados por sólidos, además de las distintas formas de tratar estos sólidos, como la dilución y la separación mecánica, y las fórmulas usadas para estos tratamientos; concluyendo a partir de la muestra de ejemplos prácticos que el método mecánico (uso de equipos de control de sólidos) es más eficiente y económico, sin embargo hay que tener en cuenta un apropiado uso e instalación de dichos equipos por parte del personal encargado de la operación, además de los parámetros de diseño de los equipos, pues factores como

el tamaño del hueco perforado, la tasa de circulación de lodo, la tasa de penetración, y la densidad y tipo de lodo también son determinantes para que cada equipo pueda trabajar de forma óptima. Por último, el paper “Evaluación de centrifugas de fluidos de perforación” (Charles A. Willson-1970) describe una técnica utilizada para evaluar el rendimiento de centrifugas decantadoras basada en la distribución del tamaño de partícula de los sólidos en el lodo de alimentación y las corrientes de efluentes del equipo, evidenciando a partir de su implementación en campo, y a través de una descripción del procedimiento a seguir, mayor exactitud en la información obtenida en las corrientes efluentes respecto a formas de calcular la cantidad de sólidos presentes en el lodo como en las pruebas de retorta (es las que se observa sobreestimación de datos) partiendo de los resultados deseados a partir de las especificaciones de diseño de fábrica de las unidades centrifugas.

Un mal control de solidos trae consigo consecuencias como el aumento del peso del lodo, mayor requerimiento de agua y aditivos químicos en el tratamiento del fluido de perforación y un aumento de costos en el mantenimiento de las centrifugas; se plantea para el año 2020 bajo la premisa de una baja eficiencia en la remoción de finos por el uso de centrifugas de baja capacidad en el control de sólidos en un pozo en un campo de la cuenca Llanos Orientales, a través de la empresa Holsan la implementación de centrifugas de alta capacidad Cen-Tex 1865 en la perforación de un pozo en dicha cuenca, evaluando el desempeño de estas y haciendo el respectivo análisis financiero producto de su implementación en campo; brindando a la empresa la oportunidad de tener un soporte teórico que afirme los posibles beneficios que trae el implementar por primera vez en un campo colombiano las ya mencionadas centrifugas de velocidad variable, haciendo énfasis en el aprovechamiento de los recursos invertidos en la formulación del lodo de perforación, y el aumento de la eficiencia del proceso de control de sólidos en general.

En este trabajo se hace una presentación de los fundamentos teóricos sobre el proceso de control de sólidos; adicionalmente, una descripción los equipos utilizados en el sistema de control de sólidos del campo E, haciendo énfasis en las centrifugas decantadoras; evidenciando sus principales componentes, principios de funcionamiento, parámetros usados para evaluar su desempeño y algunas variaciones de las mismas. Se lleva a cabo una descripción de las condiciones bajo las que operaron en campo las centrifugas Kubco y Cen-Tex 1865, en la perforación del pozo A, tales como: galonaje, cortes producidos, peso del lodo, lodo descartado, RPM y fuerza G, anexando las características técnicas de cada uno de los mencionados equipos con la finalidad de

establecer si el proceso cumple con los parámetros para los cuales fueron diseñadas las centrifugas, dando cumplimiento al objetivo específico uno (1). Se implementaron las centrifugas de velocidad variable Cen-Tex 1865 por parte de personal especializado en el campo E para la perforación del pozo A (cumpliendo con el segundo objetivo específico), que operaron a la par con la centrifuga Kubco dada la configuración del sistema de control de sólidos para el pozo, pero funcionaron con líneas de flujo de fluido de perforación independientes, lo que permite garantizar que las condiciones operativas sean iguales para ambas centrifugas, y además sea posible desarrollar la subsecuente comparación de la eficiencia de ambos equipos, para lo cual se utilizaron los resultados obtenidos a partir del análisis de distribución de partículas (Cilas) llevadas a cabo por la empresa Holsan S.A.S, además de los resultados obtenidos en laboratorio por parte de los autores del documento para pruebas de azul de metileno (MBT) y retorta para determinar el contenido de sólidos en el lodo de perforación; a partir de los cuales se determina si finalmente el rendimiento de las centrifugas Cen-Tex 1865 es mayor o menor que las unidades Kubco, teniendo en cuenta el tamaño de las partículas resultantes, y la cantidad de sólidos presentes cuando el fluido de perforación termina el proceso de circulación a través de las unidades centrifugas (realizando así el tercer objetivo específico); finalmente, se establece la viabilidad financiera del uso de las centrifugas Cen-Tex 1865 mediante el análisis comparativo de costos de operación, de mantenimiento, y de transporte, con respecto a las centrifugas Kubco; además de una comparación entre el dinero invertido en la formulación del lodo utilizado en la operación de perforación del pozo que usa las centrifugas Cen-Tex 1865, respecto a la operación de perforación en la que se usan unidades Kubco, empleando para el análisis los indicadores valor presente neto (VPN) y costo anual uniforme equivalente (CAUE) desarrollando en conclusión el cuarto objetivo específico.

El objetivo general de este trabajo de grado es evaluar la implementación de centrifugas de velocidad variable de alta capacidad Cen-Tex 1865 para el control de sólidos en la perforación de un pozo del Campo E en la cuenca Llanos Orientales. Los objetivos específicos son:

1. Estudiar el comportamiento de las centrifugas de baja capacidad (Kubco) en un pozo del Campo E.
2. Implementar las centrifugas de velocidad variable de alta capacidad en la perforación de un pozo.

3. Analizar la eficiencia de la implementación de las centrífugas de alta capacidad en comparación con las centrífugas de baja capacidad (método convencional), en la remoción de finos.
4. Evaluar financieramente la implementación de las centrífugas de alta capacidad mediante los indicadores de VPN y CAUE.

Según lo anterior, implementar las centrifugas de velocidad variable de alta capacidad Cen-Tex 1865 mejorará la eficiencia del proceso de control de sólidos, generando una reducción del volumen de lodo descartado y por tanto de costos a nivel operativo para el mantenimiento del citado lodo, brindando a la empresa de Holsan un soporte para ofrecer un servicio de control de solidos más acorde con su propósito empresarial.

En el presente trabajo de grado se muestran 7 capítulos que tienen como finalidad desarrollar cada uno de los objetivos presentados con anterioridad; el primero de ellos es el marco teórico en el que se exponen generalidades acerca del sistema del control de sólidos, haciendo énfasis en temáticas relacionadas con las unidades centrifugas que son el enfoque del proyecto, el segundo capítulo se denomina como metodología, y en él se presentan una serie de procedimientos divididos en etapas que se siguieron paso a paso para dar cumplimiento a cada uno de los objetivos propuestos, luego se desarrolla el capítulo de análisis de resultados, cuya finalidad es interpretar y dar explicación a los datos obtenidos como consecuencia de seguir los procedimientos indicados en el capítulo anterior, a continuación se llevan a cabo las conclusiones a las que se llegan fruto de examinar los resultados obtenidos, además del capítulo de recomendaciones en el que se expresan sugerencias para dar continuidad al proyecto de grado; culminando con la bibliografía y anexos que cumplen con el propósito de hacer listado del material de consulta o soporte documental con el que se realizó el documento, y complementar la información suministrada a lo largo del desarrollo del mismo respectivamente.

## 1. MARCO TEÓRICO

“Se puede definir el proceso de control de sólidos como aquel en el cual se busca la eliminación y remoción de la mayor cantidad posible de los sólidos indeseables generados durante el proceso de perforación, mediante la utilización de equipos especializados para tal fin, en función del tamaño y tipo de sólido” [1]

El objetivo de este proceso es remover progresivamente la mayor cantidad de recortes en el lodo usado en la perforación del pozo, a través de la circulación de dicho lodo en los diferentes equipos que componen el sistema, con la finalidad de descartar los sólidos indeseables como las arenas (que son altamente abrasivas), y recuperar la mayor cantidad de material densificaste como la barita, lo que permite minimizar la pérdida de lodo, disminuir la pérdida de los sólidos usados en la preparación del mismo, y reducir el volumen de desechos en pro de mitigar el impacto ambiental.

### 1.1 Generalidades del sistema de control de sólidos

Se define al lodo de perforación de un yacimiento como un fluido especial diseñado exclusivamente para la perforación que atraviesa la sección del yacimiento de un pozo [2], para su desarrollo es necesaria la utilización de múltiples químicos que se mezclan en una base acuosa u aceitosa dependiendo de las necesidades de quienes llevan a cabo la operación de perforación, el citado fluido cumple con múltiples funciones como la de lubricar la broca de perforación, brindar soporte a las paredes del pozo, y llevar a superficie los residuos llamados recortes, que concluyen de la remoción de rocas que genera la rotación de la broca al abrirse paso por el subsuelo; dichos recortes se acumulan en el fluido de perforación alterando sus propiedades reológicas, y haciendo que el mismo no pueda cumplir con los propósitos para los que fue diseñado, por lo que se hace necesario buscar alternativas para remediar dicha situación, y mantener la funcionalidad del fluido; en este punto existen dos posibles soluciones: dilución o separación mecánica, dos términos que serán tratados posteriormente, pero que se centran en la reducción de la cantidad de recortes que alteran de forma negativa el funcionamiento del lodo de perforación ya sea a través de la formulación un nuevo fluido de perforación, o utilizando equipos especiales para la remoción de recortes según el tamaño de los mismos, los equipos más usados son las zarandas vibratorias o “shakers”, los hidrociclones o “limpiadores de lodos” y las centrifugas decantadoras.

### **1.1.1 Efectos de la acumulación de sólidos en el fluido de perforación**

Cuando no se hace un debido control de sólidos, se incurre directamente en repercusiones que vienen desde el desgaste de los equipos que componen el sistema de circulación de lodo, ya sea por abrasión o taponamiento, hasta daños a la broca por embotamiento; también se reduce la tasa de perforación, se cambian las propiedades reológicas del fluido de perforación, aumentando la posibilidad de generar daño a la formación por el aumento del peso del fluido, además de incrementar el riesgo de pega diferencial

### **1.1.2 Beneficios del control de sólidos**

«Aparte de mejorar calidad del fluido de perforación una vez se circula el mismo durante la perforación de los pozos, el control de sólidos trae consigo beneficios como:

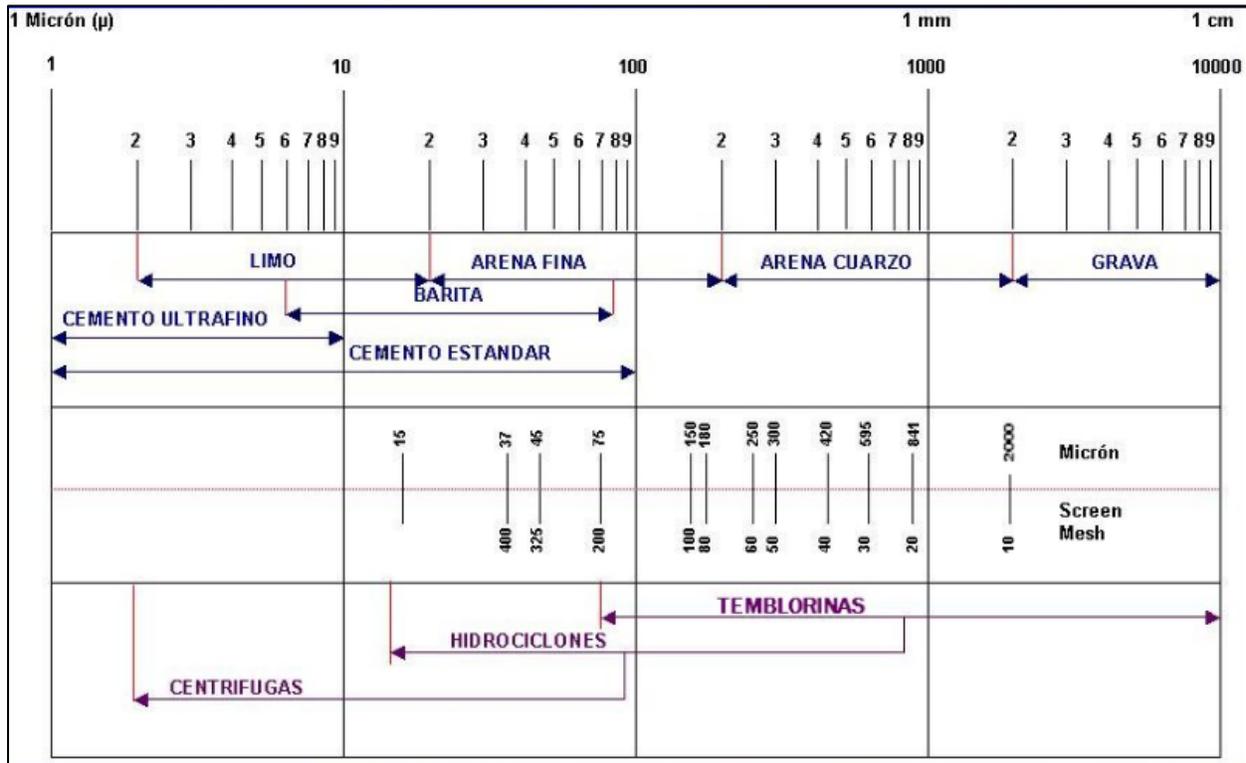
- Aumento en la tasa de penetración (ROP)
- Incremento en la vida útil de la broca
- Mejoramiento en la vida útil de las bombas
- Disminución de la probabilidad de tener pegas diferenciales
- Estabilidad de la pared de pozo
- Mejores trabajos de cementación
- Mejor interpretación de los registros eléctricos
- Menores problemas de torque y arrastre
- Mejor control reológico del fluido de perforación
- Disminución de los costos operacionales
- Menos daño a la formación» [3]

### **1.2 Métodos de control de sólidos**

«Principalmente se utilizan dos procesos para el control de sólidos en los fluidos de perforación: dilución y separación mecánica. La dilución es la disminución de la concentración de sólidos en el fluido con agua, lodo fresco (bajo contenido de sólidos), u otros líquidos, generalmente requiere de tratamiento químico adicional y genera excesivos volúmenes de fluido que tienen que ser almacenados o desechados, lo cual es particularmente difícil y costoso en áreas ambientalmente sensitivas». [4]

La separación mecánica consiste en la utilización de múltiples equipos que cumplen una función particular dentro del sistema de control de sólidos, y operan dependiendo el tamaño de partícula que se desee remover como se puede observar en la siguiente figura

**Figura 1.**  
*Clasificación de partículas según su tamaño*



**Nota.** La figura representa la clasificación de las partículas según su tamaño, además de los equipos usados en campo para su separación. Tomado de: <https://es.slideshare.net/VanessaMerchancano/control-de-solidos-ecapetrol>

A modo de anotación, la mencionada separación mecánica se podría dividir en separación por métodos primarios y la clasificación húmeda. «Los métodos primarios son los métodos que tienen como principio fundamental el asentamiento gravitacional (zarandas vibratorias), mientras que la clasificación húmeda, se refiere a los métodos en donde el asentamiento de las partículas se lleva a cabo mediante aceleración centrífuga (hidrociclones, desarenadores y deslimadores, centrífugas decantadoras). Todos los métodos se rigen según las mismas leyes físicas, así que, si el fluido se mantiene en movimiento, el asentamiento de las partículas está gobernado por la LEY DE STOKES, la cual se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$V_s = \frac{G * D_s^2 (\rho_s - \rho_L)}{46.3 * \mu}$$

Donde:

VS = Velocidad de asentamiento (pies/seg), G = Fuerza Gravitacional (pies/seg<sup>2</sup>), DS = Diámetro

del Sólido (pies),  $\rho_s$  = Densidad del sólido (lb/pies<sup>3</sup>),  $\rho_L$ =Densidad del Líquido (lb/pies<sup>3</sup>),  $\mu$  = Viscosidad del Líquido (cp.)» [4]

### **1.3 Principales equipos para control de sólidos (separación mecánica)**

En este apartado se harán mención de los equipos que se usan de forma más usual en las campañas de perforación.

#### **1.3.1 Zarandas vibratorias o Shakers**

“Conocida también como “shale shaker”, colador, cernidor, rumbera, temblorina, entre otros; según se expresa en el manual de control de sólidos”[5] la zaranda constituye el principal equipo que integra el sistema de control de sólidos, básicamente, de la eficiencia en su operación depende el rendimiento de los demás equipos, este es el único elemento que procesa todo tipo de fluido (con o sin peso), pues a diferencia de los hidrociclones y de las centrifugas de decantación, separa partículas basándose en su tamaño. Según el manual de control de sólidos “La zaranda debe funcionar desde el inicio de la perforación con máxima eficiencia para lograr:

- Máximo descarte de sólidos limpios y secos con mínima pérdida de fluido.
- Máxima recuperación de fluidos costosos.
- Mayor durabilidad y capacidad de procesamiento de las mallas.
- Mínimo daño a los equipos agua abajo.
- Reducir los gastos operacionales” [5]

Este equipo, debe tener la capacidad de procesar todo el caudal en circulación, no debe operar con mallas rotas ni presentar fugas; su funcionamiento depende de múltiples factores, pero al hablar de la eficiencia en lo que a remoción de cortes respecta, la mayor relevancia está en la calidad de las mallas, el tipo de fluido de perforación (y su tasa de bombeo), y la localización del vibrador respecto al centro de gravedad de la máquina, se debe operar con mallas finas que no causen pérdidas excesivas de fluido ni sobrecarguen a los hidrociclones.

#### **1.3.2 Mallas**

Hacen parte de los componentes de la zaranda, realizan el control de los sólidos a través de la tamización del fluido, de su funcionamiento depende el rendimiento del equipo en general; los parámetros que comúnmente consideran las empresas de servicios para su selección son el caudal de fluido a que van a ser sometidas, y la viscosidad plástica de dicho fluido.

#### **1.3.3 Mud cleaner**

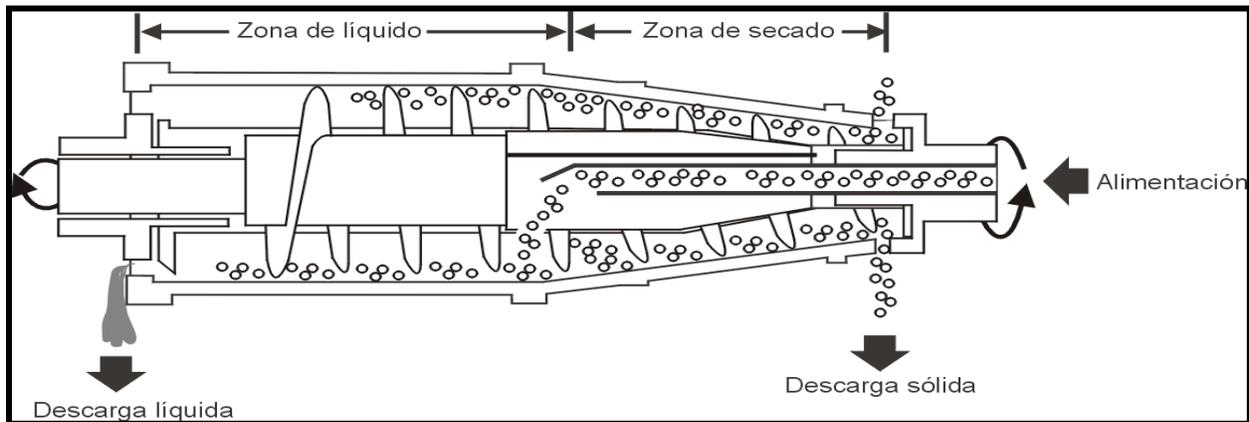
Básicamente este es un equipo compuesto por hidrociclones (desarenador o desarcillador) dispuestos sobre mallas finas (generalmente de 180-200 mesh), sirven como equipo de respaldo cuando las propiedades del fluido y las condiciones de perforación no permiten el uso de mallas finas en las zarandas; su función es la recuperación de barita, carbonatos del lodo, fases líquidas costosas como aceites sintéticos, sales, etc., que permiten reducir costos para la formulación del lodo de perforación, además de la separación de partículas de tamaño intermedio para que las centrífugas decantadoras operen de forma eficiente.

### 1.3.4 Centrífugas decantadoras

Son el último dispositivo mecánico del sistema de control de sólidos, se encargan de remover aquellas partículas que no lograron ser extraídas del lodo por las shakers, hidrociclones, o limpiadores de lodo; son un recipiente de forma cónica conformado por un tazón (bowl), que rota sobre su eje a diferentes velocidades, y un transportador o tornillo helicoidal conocido como conveyor, situado dentro del bowl, que gira en el mismo sentido de este, pero a una menor velocidad.

**Figura 2.**

*Diagrama general de centrífugas decantadoras*



**Nota.** La figura es una representación general de una unidad centrífuga al interior, y evidencia las zonas principales en las que desarrolla su funcionamiento. Tomado de: <http://perfob.blogspot.com/2015/04/manual-de-control-de-solidos.html> (p.36)

**1.3.4.i. Funcionamiento.** El lodo puede ingresar por la parte más ancha o más angosta del equipo, los sólidos decantados por la fuerza centrífuga son transportados a lo largo de las paredes del bowl por las hélices situadas al interior del mismo; la ya mencionada diferencia de velocidades entre ambos componentes facilita la separación de los sólidos, que gradualmente son trasladados hacia la zona de descarga en la parte de menor diámetro de la unidad, mientras que la fase líquida del fluido

que es desprendida parcialmente durante el recorrido, es dirigida hacia la parte de mayor diámetro y sale también por los orificios de descarga.

**1.3.4.ii. Separación por sedimentación.** «La separación de los sólidos de un líquido utilizando un tanque de sedimentación abierto. El fluido cargado de sólidos entra por un extremo y sale por el otro. el tiempo de viaje del punto de entrada al punto de salida permite que los sólidos más grandes se sedimentan a una profundidad que afecta a su separación.

La separación entre los sólidos y líquidos se produce básicamente por:

- La diferencia de densidad entre el sólido y el líquido
- La fuerza de gravedad
- El tiempo

las diferencias de densidad, la gravedad y otros factores que controlan este proceso están definidos por la LEY DE STOKES» [6] ya mencionada anteriormente.

**1.3.4.iii. Separación centrífuga.** «Basada en el principio de la aceleración centrífuga para aumentar la fuerza de gravedad o fuerza “G”. cuando un objeto se hace girar alrededor de un eje, la gravedad aumenta de un “G” en el eje de rotación a cierta fuerza G máxima de la periferia del objeto.

$$\text{Fuerza } G = D * \text{rpm}^2 * 0.0000142$$

En donde, D = diámetro del bowl (in)

Rpm = velocidad del bowl

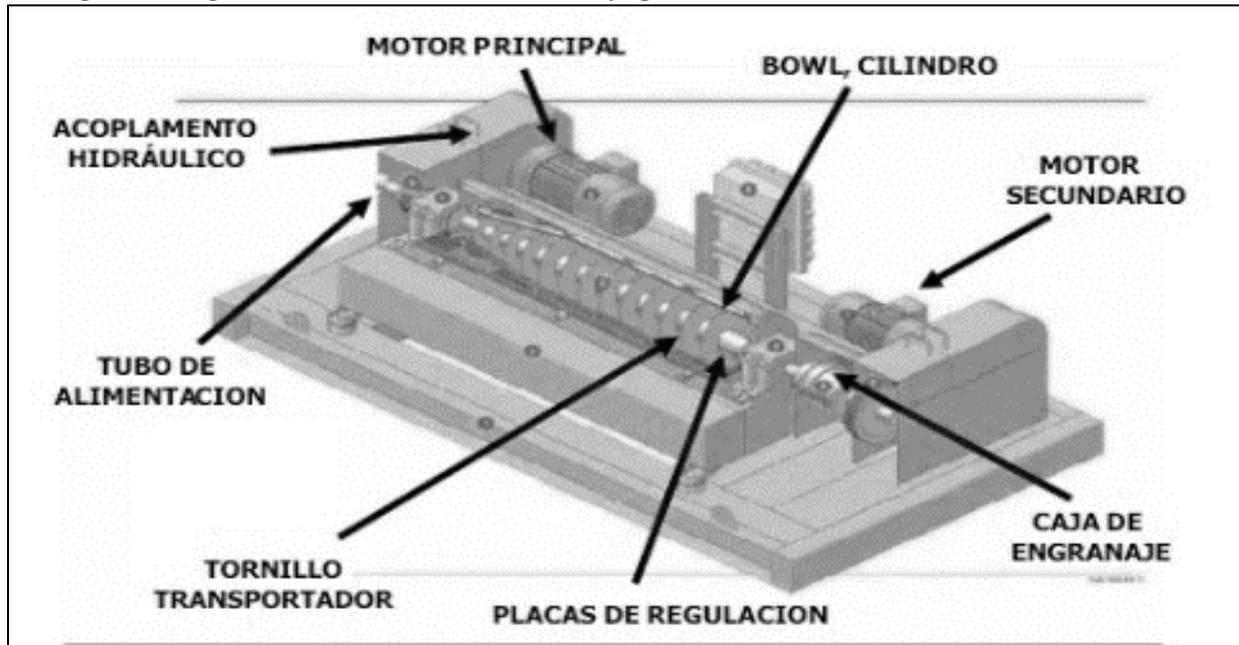
Por lo tanto, los sólidos que necesitan horas o días para separarse por sedimentación, pueden separarse en segundos con una centrífuga, y el punto de corte en la separación centrífuga depende de la fuerza G y del tiempo» [6].

### **1.3.5 Principales componentes de las centrifugas**

A continuación, se muestran los componentes esenciales de una centrífuga para control de sólidos convencional:

**Figura 3.**

*Principales componentes de las unidades centrífugas*



*Nota.* Representación de una centrífuga para control de sólidos convencional, haciendo énfasis en los principales componentes de su funcionamiento. Tomado de: <https://es.slideshare.net/magnusgabrielhuertafernandez/curso-control-solidos-mi-swaco>

### **1.3.6 Parámetros de desempeño de las centrífugas**

«Los siguientes son algunos de los parámetros que determinan el desempeño de las centrífugas:

La fuerza G, la cual depende del diámetro y la velocidad del bowl

La viscosidad del fluido

La rata de procesamiento

La profundidad del deposito

La velocidad diferencial entre el bowl y el conveyor

La posición del tubo de alimentación de la centrífuga» [6]

### **1.3.7 Tipos de centrífugas**

Según la parte del tambor por dónde se alimenta la centrífuga se pueden tener de corriente positiva (alimentada por la parte ancha del tambor) o negativa (alimentada por la parte angosta del tambor), y aunque en ambos casos funcionan de igual manera, su diferencia radica en que para las de corriente negativa se tiene el agujero de descarga en el centro del tambor por cuanto los sólidos que se descartan son más húmedos que los obtenidos en las centrífugas de corriente positiva; por

otra parte, en el proceso de perforación se utilizan centrífugas cuya diferencia radica en las revoluciones que maneja el equipo, obteniendo de esta manera centrífugas de altas revoluciones (o alta velocidad), y centrífugas de bajas revoluciones (o baja velocidad)

**1.3.7.i. Centrífugas de altas revoluciones.** “Esta centrifuga trabaja a  $\pm 3400$  RPM, desarrolla una fuerza “G” de  $\pm 3000$ , con punto de corte de  $2\mu$ . Procesa de 40 a 90 GPM, dependiendo, por supuesto,

del peso del fluido. No usa dilución, salvo cuando el fluido tenga alta viscosidad”. [5]

**1.3.7.ii. Centrifuga de Bajas revoluciones.** “Esta centrifuga trabaja a  $\pm 1800$  RPM, desarrolla una fuerza “G” de  $\pm 1000$ , con punto de corte de  $5\mu$ . Procesa de 10 a 30 GPM, con un factor de dilución de 2

24 a 6 GPM, dependiendo del peso y viscosidad del fluido”. [5]

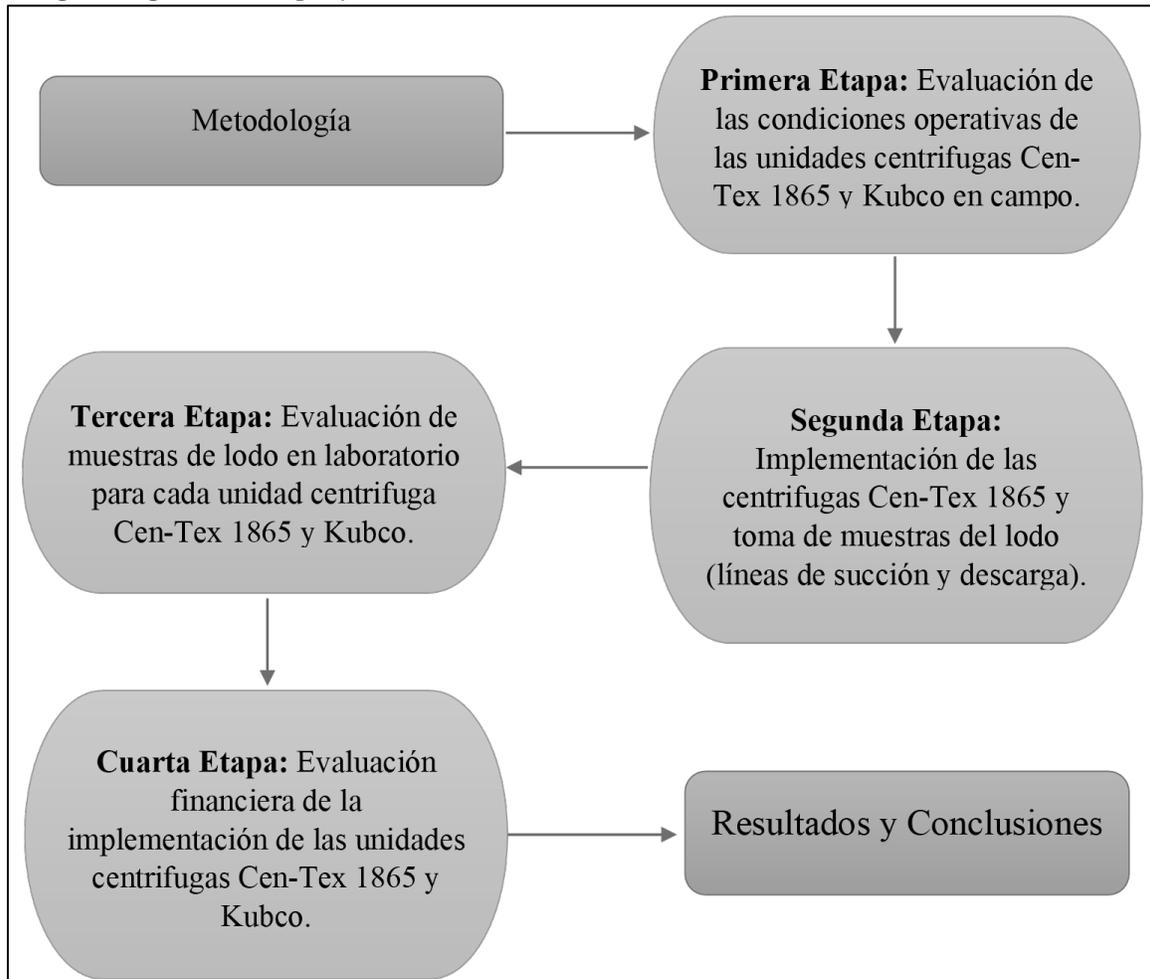
## **2. METODOLOGÍA**

La elaboración de esta metodología tiene como fin comparar las eficiencias de operación de unidades centrifugas Kubco y Cen-Tex 1865 de diferentes capacidades que se han instalado en el Campo E por la empresa Holsan S.A.S., en un pozo en la Cuenca de los Llanos Orientales; lo anterior, tomando en cuenta las variables de operación a las que trabajan las centrifugas Kubco de baja capacidad y Cen-Tex 1865 de mayor capacidad, con la finalidad de hacer un contraste y verificar que dichas variables se estén manejando bajo los rangos preestablecidos según el fabricante de los equipos. Para lograr estudiar el comportamiento de las centrifugas, se tomaron muestras de lodo a la entrada y salida de las unidades para realizar las debidas pruebas de laboratorio que serán posteriormente explicadas con el fin de dar claridad a su propósito dentro del objetivo del presente trabajo de grado. Por último, se determinará la viabilidad financiera del uso de las centrifugas Cen-Tex 1865 mediante el análisis comparativo de costos de operación, de mantenimiento, y de transporte, con respecto a las centrífugas Kubco; empleando para el análisis los indicadores valor presente neto (VPN) y costo anual uniforme equivalente (CAUE).

A continuación, se muestran los procedimientos que se emplearon para cumplir cada objetivo descrito en el proyecto, junto con las pruebas de laboratorio efectuadas al lodo de perforación para su posterior análisis.

**Figura 4.**

*Diagrama general del proyecto*



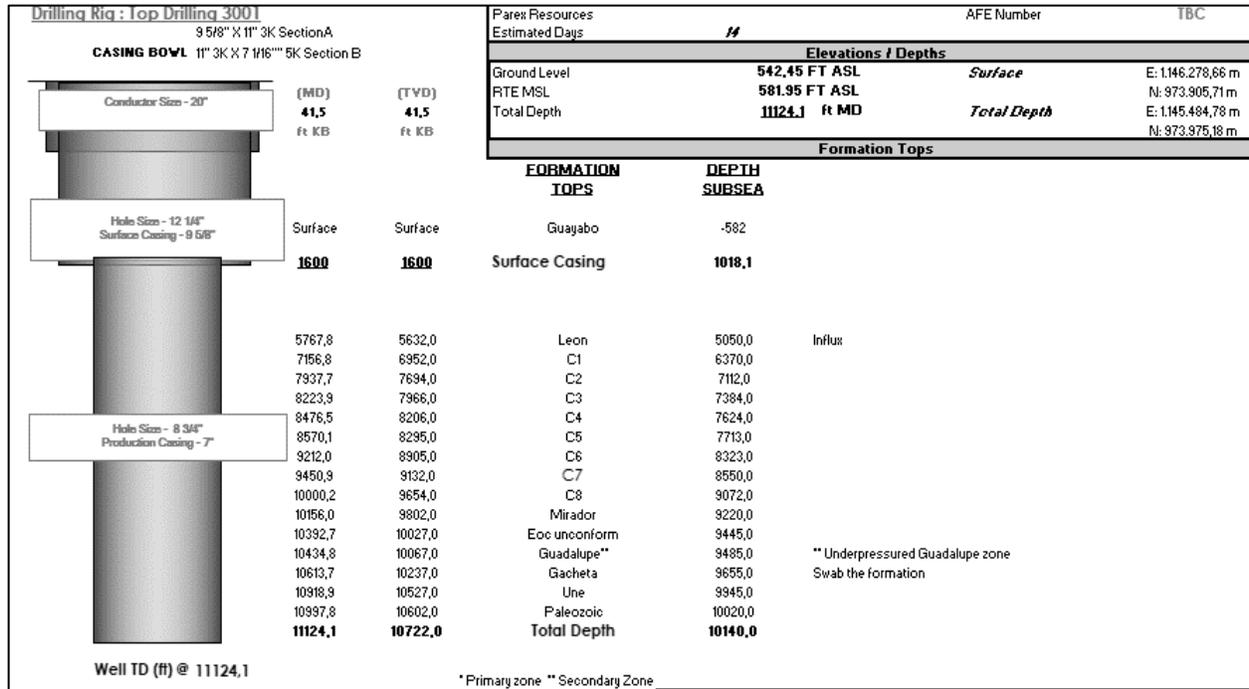
*Nota.* Representación del diagrama procedimental que se llevó a cabo en este proyecto, resumiendo los pasos para realizar el análisis de la eficiencia de los equipos.

### **2.1 Primera Etapa: Evaluación de las condiciones operativas de las unidades centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco en campo**

La evaluación en campo se realizó con una descripción de los parámetros bajo los que operaron las centrifugas Kubco y Cen-Tex 1865, en la perforación de un pozo A, tales como: cortes producidos, peso del lodo, galonaje, RPM y fuerza G de los equipos, elegidos según el estudio titulado “*Método de campo para evaluar la eficiencia del equipo de control de sólidos*” en el que se exponen como factores determinantes para que los equipos puedan trabajar de forma óptima, dado que de su fluctuación depende el encontrar un punto de corte optimo según las necesidades de la operación de control de solidos en campo, entendiendo que el punto de corte, hace referencia a la cantidad de partículas descartadas por una centrifuga de decantación de acuerdo con un

porcentaje establecido; dichos parámetros se tomaron del reporte diario de control de sólidos suministrado por la empresa Holsan S.A.S. para la sección 8 3/4” del pozo (figura 5) , haciendo énfasis en la formación León a una profundidad de 5881 ft según la recomendación de la empresa responsable del trabajo de grado, profundidad a la que también se extrajeron las muestras del lodo para futuros análisis.

**Figura 5.**  
*Estado mecánico pozo A*



**Nota.** Representación gráfica del pozo A en la que se evidencia sus etapas de perforación. Tomado de: Reporte diario pozo A - HOLSAN S.A.S.

Posteriormente, y tras consignar los antes citados parámetros se anexaron las características técnicas de cada una de las unidades centrifugas, enfatizando en los parámetros de operación galonaje máximo, RPM del bowl máxima y fuerza g máxima, derivados de la tabla 1, estableciendo si el proceso cumplió con los parámetros para los cuales fueron diseñadas las centrifugas.

**Tabla 1.***Ficha técnica de las centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco*

<b>Ficha técnica centrifugas</b>			
<b>CENTRIFUGA</b>	<b>ATRIBUTO</b>	<b>VALOR</b>	<b>UNIDAD</b>
<b>CENTEX 1865</b>	PESO	10250	lb
	LONGITUD	174,15	in
	ALTURA	53.89	in
	ANCHO	43	in
	CAPACIDAD	250	GPM
	POTENCIA REQUERIDA	100 (75)	Hp (KW)
	VOLTAJE DE ENTRADA	440	V
	FRECUENCIA	60	Hz
	REVOLUCIONES	3000	Rpm
	FUERZA G MAX	2300	G`s
	RELACION CAJA REDUCTORA	80:1	---
	FRAME DEL MOTOR	444/ST	N/A
	AMPERAJE	170	A
<b>KUBCO</b>	PESO	7716,2	Lb
	LONGITUD	120,1	in
	ALTURA	75,6	in
	ANCHO	59,06	in
	CAPACIDAD	150	GPM
	POTENCIA REQUERIDA	60 (45)	Hp (KW)
	VOLTAJE DE ENTRADA	440	V
	FRECUENCIA	60	Hz
	REVOLUCIONES	3600	Rpm
	FUERZA G MAX	2944	G`s
	RELACION CAJA REDUCTORA	47:1	---
	FRAME DEL MOTOR	364/ST	N/A
	AMPERAJE	70	A

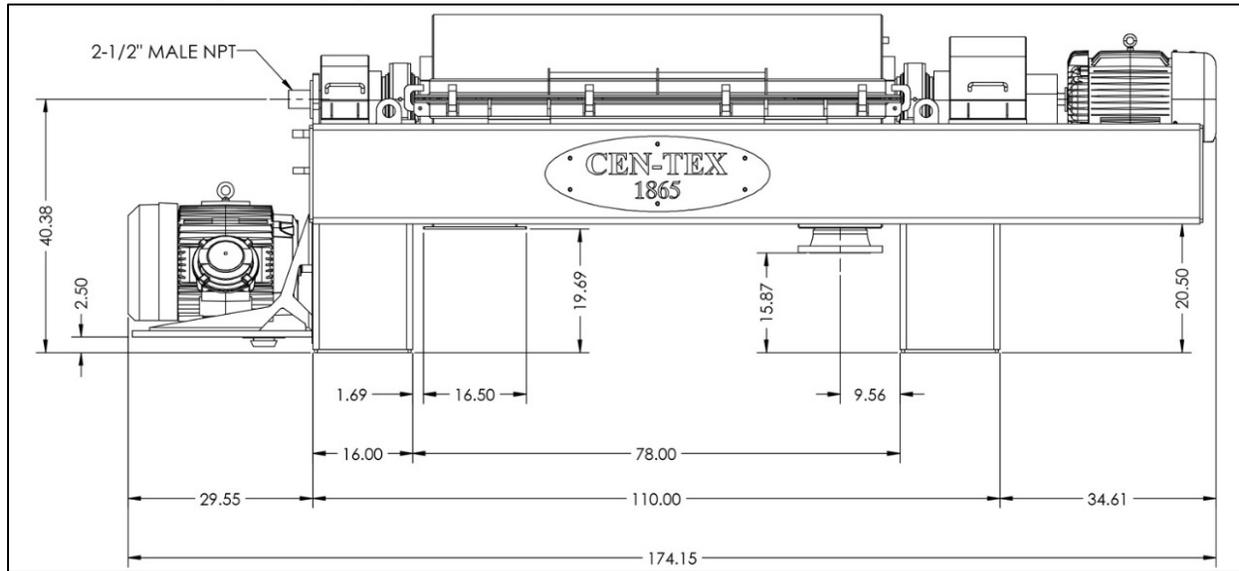
*Nota.* En esta tabla se evidencian los atributos de diseño y detalles técnicos de las centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco. Tomada de: Ficha técnica centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco, Holsan S.A.S., Elaboración propia.

## **2.2 Segunda Etapa: Implementación de las centrifugas Centex-1865 y toma de muestras del lodo (líneas de succión y descarga)**

Se llevó a cabo la implementación de las centrifugas de velocidad variable Cen-Tex 1865 en el campo E para la perforación del pozo A por la empresa Holsan S.A.S., responsable de financiar el

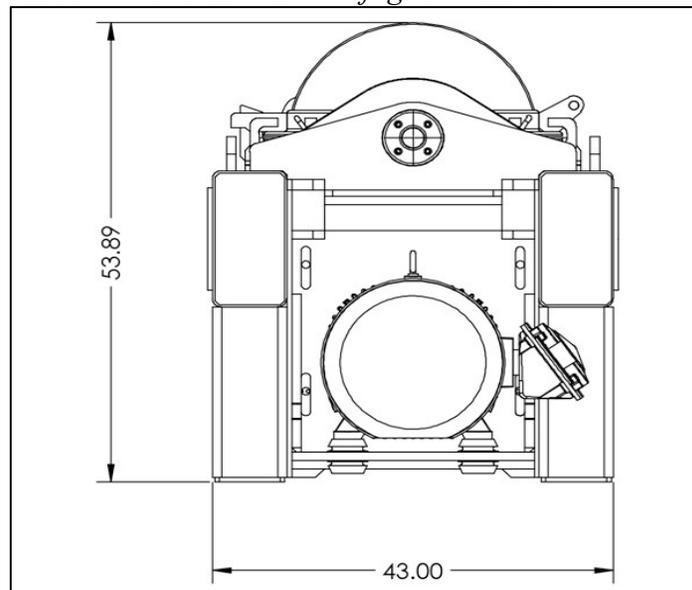
transporte y alistamiento de las unidades; para la instalación de los equipos se tuvo en cuenta sus dimensiones básicas de altura (53.89in), longitud (174.15in), ancho (43in) y peso (10250lb), como se observa en las figuras 6 y 7.

**Figura 6.**  
*Dimensiones largo centrifuga Cen-Tex 1865*



**Nota.** Esta figura muestra el plano de alzado de la centrifuga Cen-Tex 1865 con sus respectivas dimensiones en pulgadas.

**Figura 7.**  
*Dimensiones ancho Centrifuga Cen-Tex 1865*



**Nota.** Esta figura muestra el plano de perfil de la centrifuga Cen-Tex 1865 con sus respectivas dimensiones en pulgadas.

Las centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco se dispusieron sobre mesas de 118.11 in de altura y área superficial de 22320.04 in<sup>2</sup>, diseñadas para resistir el peso de las unidades y facilitar el proceso de descarga de las líneas de sólidos y líquidos como se evidencia en las figuras 8, 9 y 10, que son prueba de la instalación de los equipos en campo.

**Figura 8.**

*Distribución de las unidades centrifugas en Campo*



**Nota.** En esta imagen se evidencia la distribución de las centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco en el campo E, según como se muestra en el Layout.

**Figura 9.**  
*Unidades centrifugas en operación*



*Nota.* La imagen muestra la línea de descarga de solidos de las unidades centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco en operación.

**Figura 10.**  
*Mesas de soporte de las unidades centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco*



*Nota.* En la figura se resaltan las mesas diseñadas para facilitar la operación de las centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco.

El funcionamiento de las centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco se muestra a través de los parámetros de operación: cortes producidos, peso del lodo, galonaje, RPM y fuerza G, mostrados en la tabla 2, y finalmente su distribución en campo se señala a través del Layout representado en la figura 11.

**Tabla 2.**

*Parámetros de operación de centrifugas Kubco y Cen-Tex 1865 en la perforación del pozo A*

Parámetro	Galonaje (GPM)	Cortes (bbl/dia)	Ppg in	Ppg out	Rpm bowl	Fuerza g
<b>CEN-TEX 1865</b>	145.5	154.2857	9.3	9.15	2800	2003.5
<b>KUBCO</b>	116.4	92.5714	9.3	9.2	2920	2178.9

*Nota.* Esta tabla muestra la variación de los valores de los parámetros de operación para las centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco a una profundidad de 5881 ft.

**Figura 11.**

*Zona de centrifugas - Layout Holsan Top Drilling Pozo A*



*Nota.* En esta figura se representa la distribución de equipos en la perforación del pozo A. Se encierra de color rojo las centrifugas Cen-Tex1865 y la única centrifuga Kubco, se encierra en color verde.

Teniendo en cuenta que las unidades Cen-Tex 1865 funcionaron a la par que las centrífugas Kubco dada la configuración del sistema de control de sólidos para el pozo (figura 11), y dado que las condiciones operativas fueron iguales para ambos equipos, pero se “alimentaron” con líneas de flujo independientes, se tomaron muestras de lodo de perforación en la línea de succión y en la línea de descarga de cada una de las unidades centrifugas con la finalidad de remitirlas a laboratorios especializados para llevar a cabo las pruebas pertinentes que serán posteriormente explicadas.

### **2.3 Tercera Etapa: Evaluación de muestras de lodo en laboratorio para cada unidad centrifuga Cen-Tex 1865 y Kubco**

Para analizar la eficiencia de la implementación de las unidades centrifugas Kubco y Cen-Tex1865, se realizaron las siguientes pruebas de laboratorio a la descarga de cada unidad: Densidad, Viscosidad embudo, Viscosidad plástica, Punto cedente, Esfuerzo de gel inicial y a 10min, MBT (Prueba de azul de metileno) y Porcentaje de sólidos y líquidos, las cuales se llevaron a cabo siguiendo los lineamientos descritos en el Manual API de Fluidos de Perforación, además del análisis de distribución de tamaño de partícula (Cilas) desarrollado según lo estipulado en la norma técnica ISO 13320 “Particle size analysis - Laser diffraction methods” (Análisis de distribución de tamaño de partícula); siendo determinantes para contrastar la eficiencia operativa de las centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco las pruebas de porcentaje de sólidos y líquidos, y distribución de tamaño de partículas, dado que a partir de la primera prueba se procedió a hacer el cálculo de los sólidos de baja gravedad específica (LGS) explicado en la sección 2.3.2 del presente trabajo de grado, que representan aquellos solidos en el fluido de perforación que aumentan su densidad (solidos producto de la perforación) más la bentonita adicionada al lodo, si el porcentaje de LGS fue menor en el lodo que circuló a través de la centrifuga Cen-Tex 1865 o la centrifuga Kubco, se determinó cuál de las dos tuvo un mejor rendimiento, teniendo en cuenta además que según la empresa encargada del trabajo de grado, los LGS debían mantenerse en un porcentaje de 3% a 10% para determinar el correcto funcionamiento de las centrifugas; la prueba de distribución de tamaño de partícula, permitió a partir de un contraste entre los resultados obtenidos para el lodo de la línea de succión versus el lodo de las líneas de descarga de las centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco, establecer según el tamaño de las partículas presentes de cada muestra analizada la eficiencia de las centrifugas, dependiendo de la muestra que obtuvo un valor menor en el tamaño

de partícula en las líneas de descarga, respecto al valor obtenido en tamaño de partícula para la línea de succión de las centrifugas, determinando a partir de una diferencia en porcentaje con estos dos datos, el grado de eficiencia de las centrifugas en reducción de tamaño de partícula.

Con excepción de la prueba de Cilas, las pruebas de laboratorio antes mencionadas debían cumplir con un programa que indicaba los rangos óptimos de operación según la empresa responsable del presente trabajo de grado, dichos rangos se expresan en la tabla a continuación:

**Tabla 3.**

*Rangos para las propiedades según el programa de control de sólidos*

<b>Propiedades</b>	<b>Programa</b>
Densidad (lb/gal)	9,2 – 9,5
Viscosidad embudo (seg/qt)	50 - 75
Viscosidad plástica (cP)	6 - 10
Punto cedente (lb/100pies2)	22 - 25
Esfuerzo de gel inicial (lb/100pies2)	8 - 12
Esfuerzo de gel a 10 min. (lb/100pies2)	15 - 21
Agua / Aceite (%Vol-%Vol)	-
Solidos totales	-
Solidos de baja gravedad especifica (LGS) (% Vol-lb/bbl)	3% - 10%
MBT (lb/bbl)	0 – 22,5

**Nota.** Esta tabla muestra los rangos de las propiedades establecidas según el programa de control de propiedades del lodo de perforación de la empresa encargada del proyecto de grado.

Y han sido complementados con los datos expresados en la tabla 4, debido a que por cuestiones de políticas de privacidad de la compañía encargada de desarrollar el lodo de perforación utilizado en la formación de interés (León) no fue posible conocer la composición del fluido, por cuanto fue necesario utilizar las tablas de las propiedades típicas para un lodo que manejara rangos cercanos a los propuestos en el programa, con la finalidad de llenar los vacíos existentes para propiedades cuyos rangos no fueron especificados; el lodo seleccionado además requería tener un carácter inhibidor de arcillas debido a que la formación León así lo requiere.

**Tabla 4.**  
*Propiedades típicas lodo PHPA*

<b>Propiedades típicas</b>	
Densidad (lb/gal)	9 – 13
Viscosidad embudo (seg/qt)	32 - 45
Viscosidad plástica (cP)	6 - 10
Punto cedente (lb/100pies <sup>2</sup> )	10 -20
Esfuerzo de gel inicial (lb/100pies <sup>2</sup> )	3 - 6
Esfuerzo de gel a 10 min. (lb/100pies <sup>2</sup> )	5 - 10
Sólidos de baja gravedad específica (%-lb/bbl)	3 – 10
MBT (lb/bbl)	7,5 – 17,5

**Nota.** Esta tabla muestra los rangos de las propiedades típicas de un lodo PHPA luego de realizadas las pruebas de laboratorio especificadas en la columna de la izquierda.

Luego de estudiar los tipos de lodos inhibidores de arcillas en el Manual de fluidos de perforación API: Poly-Plus, Drilplex, Glydril y Sildril [7]; se seleccionó para este fin el lodo inhibido Poly-Plus (PHPA), ya que dadas sus propiedades es el que más se asemejó con el lodo para la operación en cuestión.

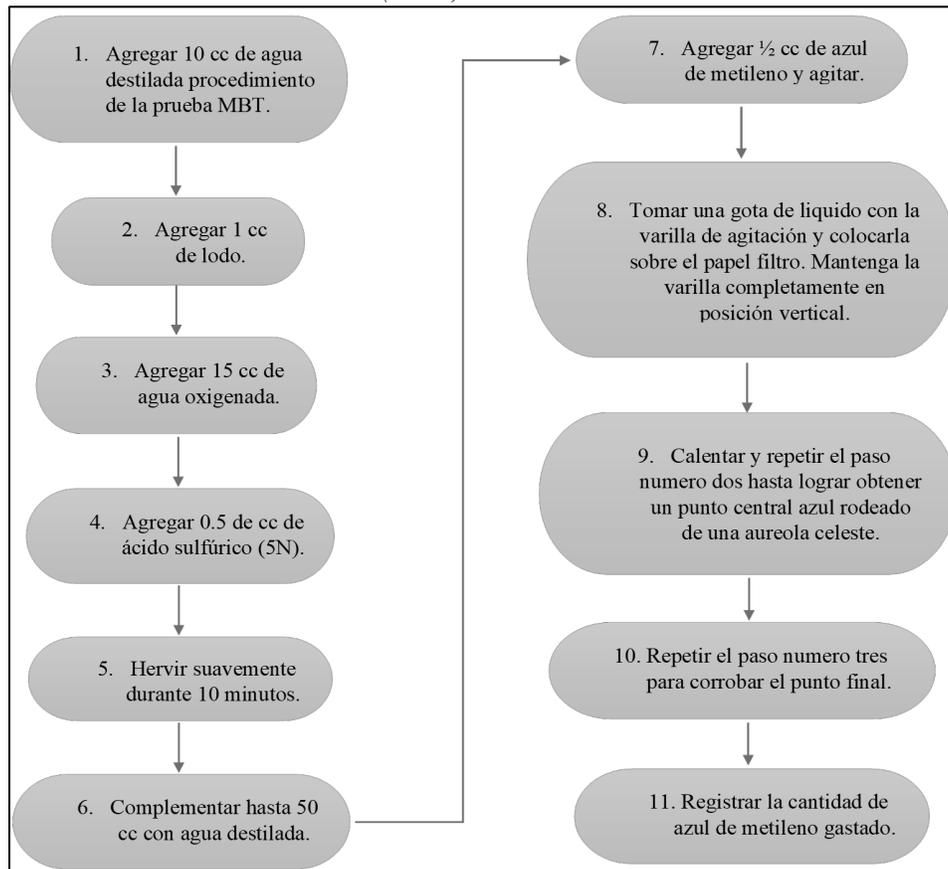
Las pruebas de mayor relevancia para el análisis de la eficiencia de las centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco realizadas al lodo de perforación se muestran a continuación:

### **2.3.1 Prueba del Azul de Metileno (MBT)**

La importancia de esta prueba radica en que “determina la concentración total de sólidos reactivos presentes en el fluido. La prueba MBT da la concentración total de los sólidos arcillosos que contiene el fluido, es decir, la concentración de los sólidos arcillosos comerciales agregados (Bentonita) y la concentración de sólidos arcillosos aportados por la formación” [8], permitiendo saber si las unidades centrifugas están cumpliendo con su objetivo de remover las arcillas provenientes de la formación.

El siguiente esquema muestra cómo se llevó a cabo la prueba de azul de metileno en un laboratorio siguiendo los lineamientos descritos en el Manual API de Fluidos de Perforación [7]:

**Figura 12.**  
*Prueba del Azul de Metileno (MBT)*



**Nota.** La figura representa un diagrama de flujo del proceso que se lleva a cabo en laboratorio para determinar concentración total de los sólidos arcillosos que contiene el fluido. Tomado de: Manual de Fluido de Perforación. American Petroleum Institute (API).

### 2.3.2 Porcentaje de Sólidos y Líquidos

Esta prueba permite a partir del calentamiento de un determinado volumen de una muestra de lodo de perforación determinar el porcentaje en volumen de los sólidos y líquidos (acuosos y aceitosos) presentes en el fluido; siendo de utilidad porque permite conocer a través de cálculos el volumen de sólidos de baja gravedad específica presentes en el lodo, para evaluar el funcionamiento de las unidades centrifugas. A continuación, se muestra la fórmula para llevar a cabo el cálculo del porcentaje en volumen de sólidos de baja gravedad:

$$\ll \%V_{LGS} = \left[ \frac{1}{(\rho_B - \rho_{LGS})} \right] [100\rho_f + (\rho_B - \rho_f)V_{SS} - 12\rho_{fP} - (\rho_f - \rho_o)V_o]$$

donde:

$\%V_{LGS}$ =Porcentaje en volumen de sólidos de baja gravedad

$\rho_{fp}$ =Densidad del lodo (Lbm/gal)

$\rho_f$ =Densidad del filtrado ( $\text{g/cm}^3$ )

$\rho_B$ =Densidad del material densificante ( $\text{g/cm}^3$ )

$\rho_{LGS}$ =Densidad de solidos de baja gravedad ( $\text{g/cm}^3$ ) (usar 2.6 si se desconoce el dato)

$\rho_o$ =Densidad del aceite ( $\text{g/cm}^3$ ) (usar 0.84 si se desconoce el dato),

$V_o$ =Porcentaje en volumen de aceite

$V_{ss}$ =Porcentaje en volumen de solidos suspendidos.

La densidad del filtrado es función de la concentración en cloruros y es calculada en la siguiente ecuación:

$$\rho_f = 1.0 + (6.45 \times 10^{-7} [NaCl]) + (1.67 \times 10^{-3} [KCl]) + (7.6 \times 10^{-7} [CaCl_2]) + (7.5 \times 10^{-7} [MgCl_2]).$$

La concentración de cloruros está en mg/L, excepto la concentración de KCl, que está en Lb/bbl.

El volumen de solidos suspendidos se obtiene con la expresión:

$$V_{ss} = 100 - V_o - \frac{V_w}{\rho_f - 10^{-6} [NaCl] + [CaCl_2] + [MgCl_2]} - 0.00286 [KCl].$$

Los sólidos calculados con la ecuación de  $\%V_{LGS}$  incluyen la bentonita, por lo tanto:

$$V_{ds} = V_{LGS} - V_B$$

donde:

$V_{ds}$ =Porcentaje en volumen de solidos incorporados en la perforación

$V_B$ =Porcentaje en volumen de bentonita.

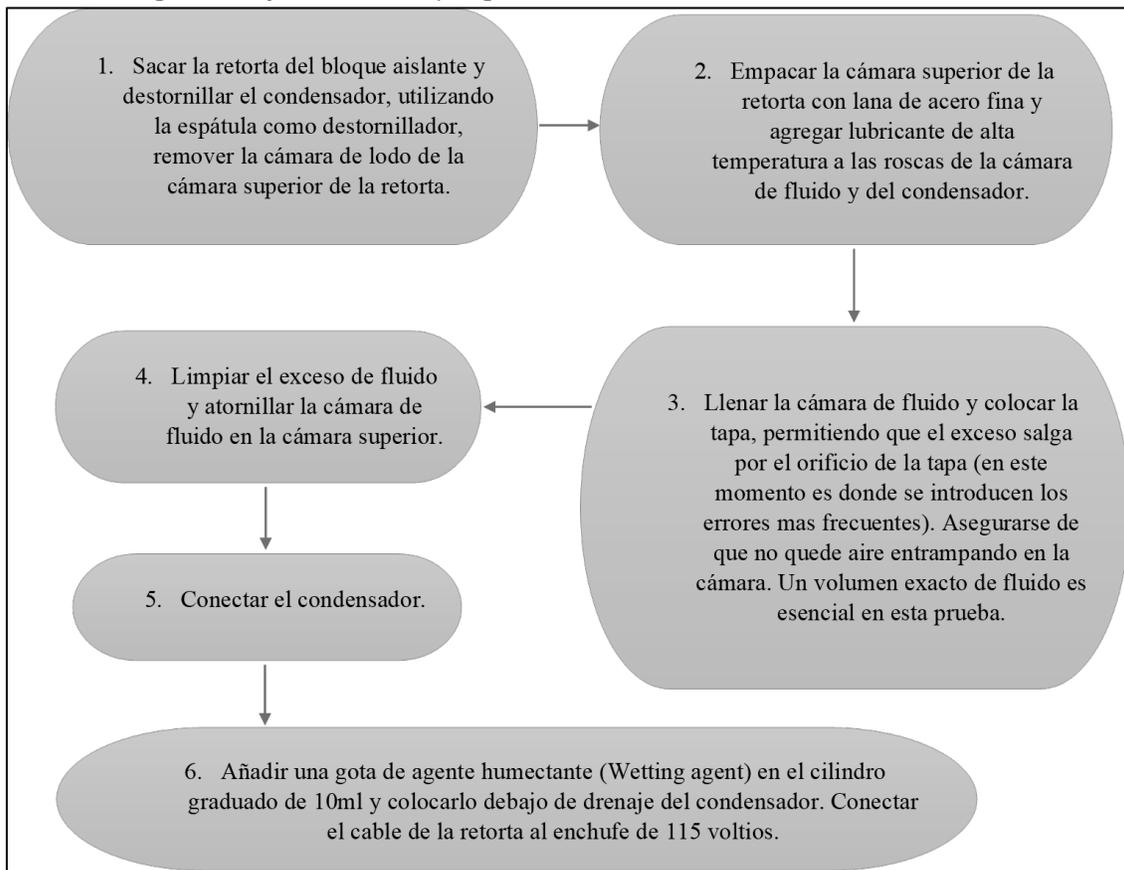
El porcentaje en volumen del material densificante ( $V_{Ba}$ ):

$$V_{Ba} = V_{ss} - V_{LGS} \gg [9]$$

El siguiente esquema muestra cómo se llevó a cabo la prueba de porcentaje de sólidos y líquidos en un laboratorio siguiendo los lineamientos descritos en el Manual de Fluidos de Perforación [8]:

**Figura 13.**

*Prueba de porcentaje de sólidos y líquidos.*



**Nota.** La figura representa un diagrama de flujo del proceso que se lleva a cabo en laboratorio para determinar el porcentaje en volumen de los sólidos de alta y baja gravedad específica. Tomado de: Manual de Fluido de Perforación. American Petroleum Institute (API).

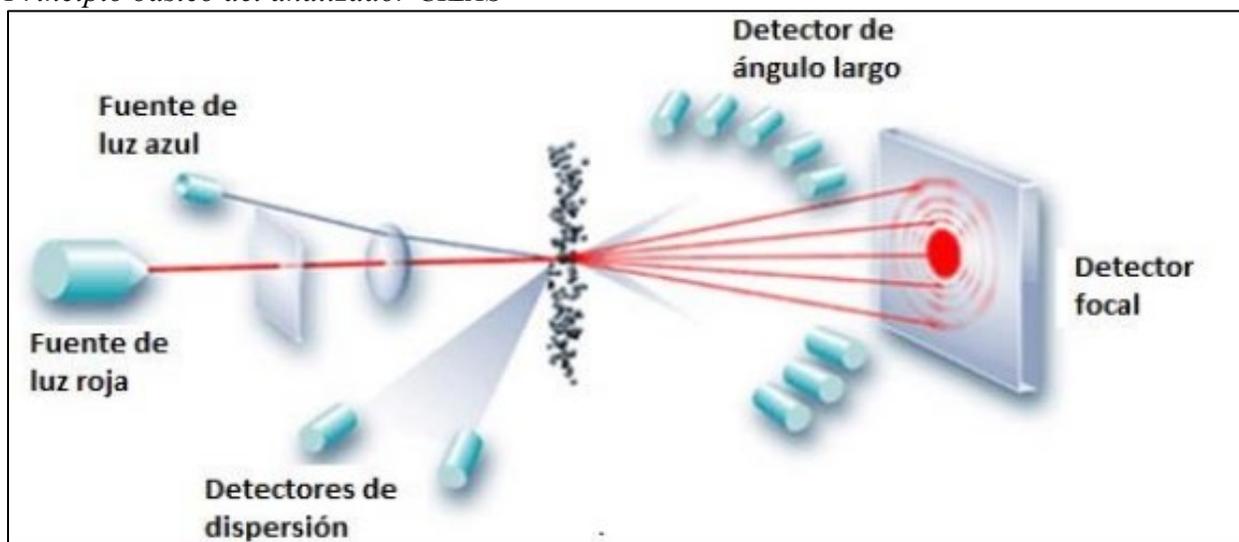
### **2.3.3 Análisis de distribución de tamaño de partícula (Cilas)**

Esta prueba fue llevada a cabo por las empresas ChemiLab y Malvern Instruments Ltd, contratadas por la empresa Holsan S.A.S. de la cual hace parte el director del presente trabajo de grado.

«Este tipo de prueba realiza un análisis de distribución de tamaño de partícula electrónicamente, midiendo la dispersión de un láser que incide sobre la muestra (figura 14), el ángulo de dispersión del haz de luz es inversamente proporcional al tamaño de partícula. La intensidad angular de la luz dispersa es capturada por una serie de detectores fotosensibles, luego el analizador, que se encuentra conectado a un computador, descarga los datos y un software especializado se encarga de mostrar una gráfica, que describe el tamaño y distribución de los diferentes elementos en la píldora (donde se carga la muestra)» [10].

El procedimiento que se llevó a cabo para el desarrollo de esta prueba no pudo ser anexado al presente documento debido a las políticas de confidencialidad de las empresas que prestaron el servicio de análisis de la muestra de lodo extraída del pozo A en el campo E. (Anexo 2). El resultado de llevar a cabo esta prueba se refleja en un gráfico estadístico de distribución de datos en el que se puede observar el tamaño de partícula que predomina en la muestra de lodo tomado, lo que es importante para determinar el rendimiento de las unidades centrifugas en cuanto a la reducción de partículas provenientes de la formación que pueden causar diversos efectos en el lodo de perforación (véase inciso *1.1.1 Efectos de la acumulación de sólidos en el fluido de perforación*).

**Figura 14.**  
*Principio básico del analizador CILAS*



*Nota.* Esquema del funcionamiento del equipo Particle Size Distribución. HALLIBURTON. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/455/1/5112755-2016-2-IP.pdf>

## **2.4 Cuarta Etapa: Análisis financiero de la implementación de las unidades centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco**

Para el desarrollo del análisis financiero se tomaron en cuenta los datos de los ingresos que generan por cada día las centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco expresados en la tabla 4, además de sus respectivos egresos indicados como: costo por equipo, costo de alistamiento, costos de mantenimiento y costos de transporte, representados en las tablas 5, 6, 7, 8, 9 y 10 respectivamente.

### **2.4.1 Datos financieros**

A continuación, se presenta la información pertinente para desarrollar el capítulo de análisis financiero, teniendo en cuenta que todos los valores monetarios expresados tendrán como base el peso colombiano (COPS).

Los ingresos de operación diarios reflejan el costo de alquiler de cada centrifuga (Cen-Tex 1865 y Kubco), el cual se suma desde la puesta en marcha de los equipos, hasta el final de la operación de perforación.

**Tabla 5**  
*Ingresos de operación*

<b>Ingresos de operación (día)</b>	
<b>CENTEX 1865</b>	\$ 650.000
<b>KUBCO 5800</b>	\$ 550.000

*Nota.* En esta tabla se muestran los ingresos por día que generan las centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco.

Los costos por equipo representan el valor monetario de las centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco al que fueron adquiridas por la empresa encargada del presente trabajo de grado.

**Tabla 6.**  
*Costos por equipo*

<b>Costo de equipo</b>		<b>Vida útil (años)</b>
<b>CENTEX 1865</b>	\$ 1'345.662.500	20
<b>KUBCO 5800</b>	\$ 768.950.000	20

*Nota.* En esta tabla se consigna los costos de inversión y la vida útil de las centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco.

El costo de mantenimiento (tabla 7 y 8) muestra los insumos necesarios para realizar el sostenimiento de las centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco, y su respectivo precio.

**Tabla 7.**  
*Costo de mantenimiento Kubco*

<b>Insumo de mantenimiento Kubco 5800</b>				
<b>Repuesto/insumo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Costo</b>	<b>Costo total</b>
ACEITE SAE 90	3	GALÓN	\$ 9.000,00	\$ 27.000,00
GRASA SKF LTG	10	LIBRA	\$ 17.000,00	\$ 170.000,00
CORREA 3VX 960	5	UNIDAD	\$ 27.000,00	\$ 135.000,00
CORREA 3VX 1060	5	UNIDAD	\$ 38.000,00	\$ 190.000,00

*Nota.* En esta tabla se muestran los insumos necesarios y datos complementarios para el mantenimiento de la centrifuga Kubco.

**Tabla 8.***Costo de mantenimiento Cen-Tex 1865*

<b>Insumo de mantenimiento Cen-Tex 1865</b>				
<b>Repuesto/insumo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Costo</b>	<b>Costo total</b>
ACEITE SAE 90	3	GALÓN	\$ 9.000,00	\$ 27.000,00
GRASA CHEVRON	10	LIBRA	\$ 9.000,00	\$ 90.000,00
CORREA 5VX 710	5	UNIDAD	\$ 50.000,00	\$ 250.000,00
CORREA 5VX 670	5	UNIDAD	\$ 40.000,00	\$ 200.000,00

*Nota.* En esta tabla se muestran los insumos necesarios y datos complementarios para el mantenimiento de la centrifuga Cen-Tex 1865.

El costo de alistamiento indica los repuestos requeridos por la centrifuga Cen-Tex 1865 y Kubco necesarios para preparar los equipos antes de su puesta en marcha en una operación de perforación determinada.

**Tabla 9.***Costo de alistamiento*

<b>Costo alistamiento de equipo Bacano Este</b>					
<b>Equipo</b>	<b>Repuesto</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Costo</b>	<b>Costo total</b>
<b>CENTRIFUGA KUBCO 5800</b>	RODAMIEN O 6220/C3	2	UNIDAD	\$ 357.000	\$ 714.000
	GRASA SKF LTG	8	LIBRAS	\$ 17.000	\$ 136.000
	RODAMIEN O 6021/C3	1	UNIDAD	\$ 288.800	\$ 288.800
	RODAMIEN O 6005/C3	1	UNIDAD	\$ 14.800	\$ 14.800
	ACEITE 80W90	1,5	GALÓN	\$ 9.000	\$ 13.500
	VÁLVULA DE BOLA	1	UNIDAD	\$ 9.800	\$ 9.800
	TORNILLERIA WA	10	UNIDAD	\$ 45	\$ 450
	PINTURA AZUL	1	GALÓN	\$ 39.000	\$ 39.000
	PINTURA NARANJA	1	GALÓN	\$ 39.000	\$ 39.000
<b>TOTAL</b>					\$ 1.259.400
<b>IVA</b>					\$ 239.286
<b>TOTAL+IVA</b>					\$ 1.498.686

Continuación tabla 8 (Costo de alistamiento)

<b>CENTRIFUGA CENTEX</b>	RODAMIENT O 6230 M/C3	2	UNIDAD	\$ 1.800.000	\$ 3.600.000
	GRASA CHEVRON	9	LIBRA	\$ 9.000	\$ 81.000
	PASTILLA INSERTO TUNGSTENO	45	UNIDAD	\$ 21.600	\$ 972.000
	TORNILLERÍA	4	UNIDAD	\$ 2.000	\$ 8.000
<b>TOTAL</b>					\$ 4.661.000
<b>IVA</b>					\$ 885.590
<b>TOTAL+IVA</b>					\$ 5.546.590

*Nota* En esta tabla se consignan los insumos necesarios y datos complementarios para preparar las centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco para su operación en campo.

El costo de transporte contempla el precio de alquiler de los vehículos utilizados para el desplazamiento de las centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco, desde la base de la empresa ubicada en Tocancipá (Cundinamarca) al campo de interés.

**Tabla 10.**  
*Costo de transporte*

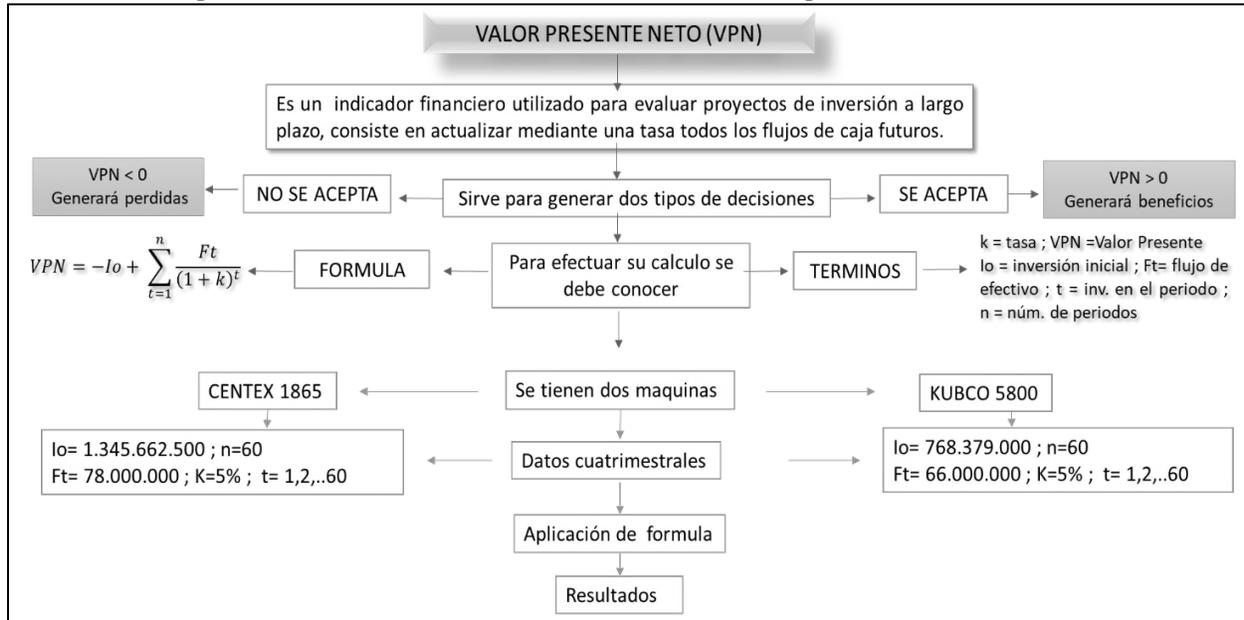
<b>Costo de transporte</b>	
<b>CENTEX 1865</b>	\$ 3.500.000
<b>KUBCO 5800</b>	\$ 2.500.000

*Nota.* En esta tabla se muestran los costos de movilización de las centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco.

Como indicadores de viabilidad financiera de la implementación de las centrifugas se utilizaron los indicadores financieros VPN (valor presente neto) y CAUE (costo anual uniforme equivalente) siguiendo el procedimiento indicado en las figuras 15 y 16.

**Figura 15.**

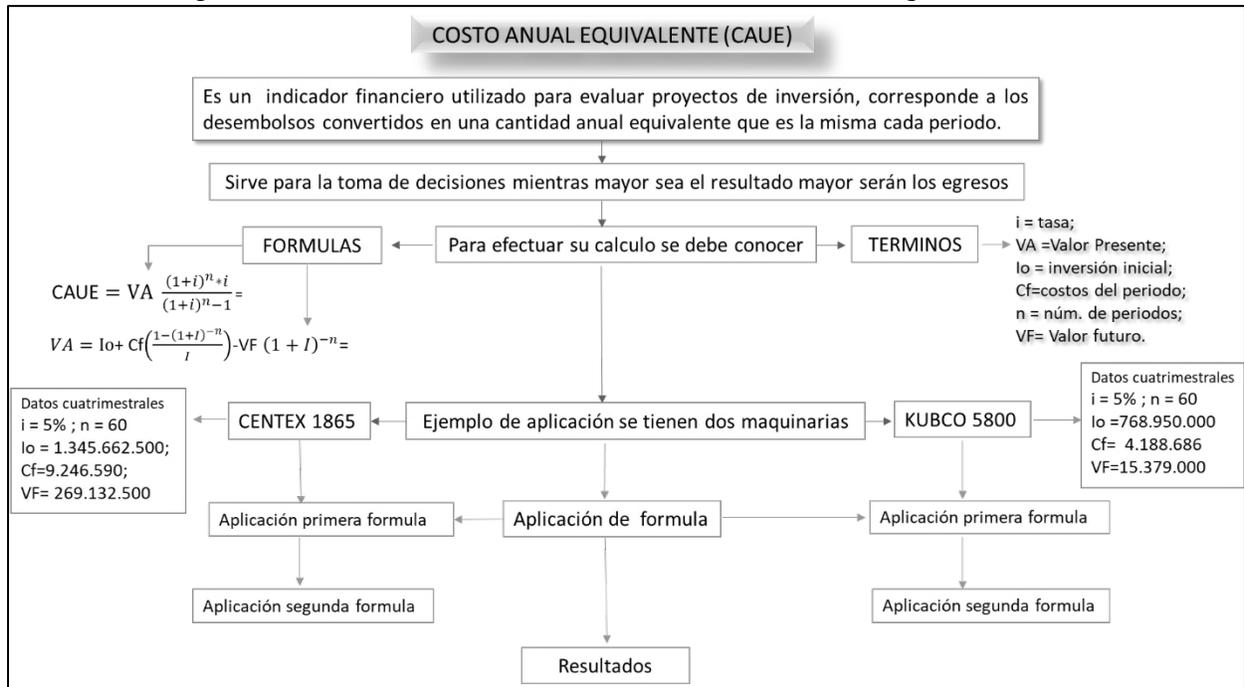
*Procedimiento para desarrollo del indicador económico valor presente neto*



**Nota.** La figura representa los pasos a seguir para calcular el indicador financiero valor presente neto.

**Figura 16.**

*Procedimiento para desarrollo del indicador económico costo anual equivalente*



**Nota.** La figura representa los pasos a seguir para calcular el indicador financiero costo anual equivalente.

### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se desarrolla el análisis de las consecuencias de implementar las unidades centrifugas Cen-Tex 1865 en contraste con el uso de las centrifugas Kubco, haciendo uso de los resultados obtenidos de cada una de las etapas planteadas en el capítulo anterior; mostrando cada dato logrado a partir de las evaluaciones en campo, pruebas de laboratorio e impacto a nivel financiero que generan las mencionadas centrifugas para la empresa responsable del presente trabajo de grado.

#### 3.1 Análisis de la evaluación en campo junto con el estudio de las condiciones operativas de las centrifugas

Teniendo en cuenta la tabla 2 *Parámetros de operación de centrifugas Kubco y Cen-Tex 1865 en la perforación del pozo A*, haciendo énfasis en galonaje, cortes producidos, peso del lodo, RPM y fuerza G, seguido de las especificaciones técnicas de los equipos (tabla 11), se obtienen las gráficas (figura 17 y 18) en las que se contrastan los parámetros para los que fueron diseñadas las centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco.

**Tabla 11.**

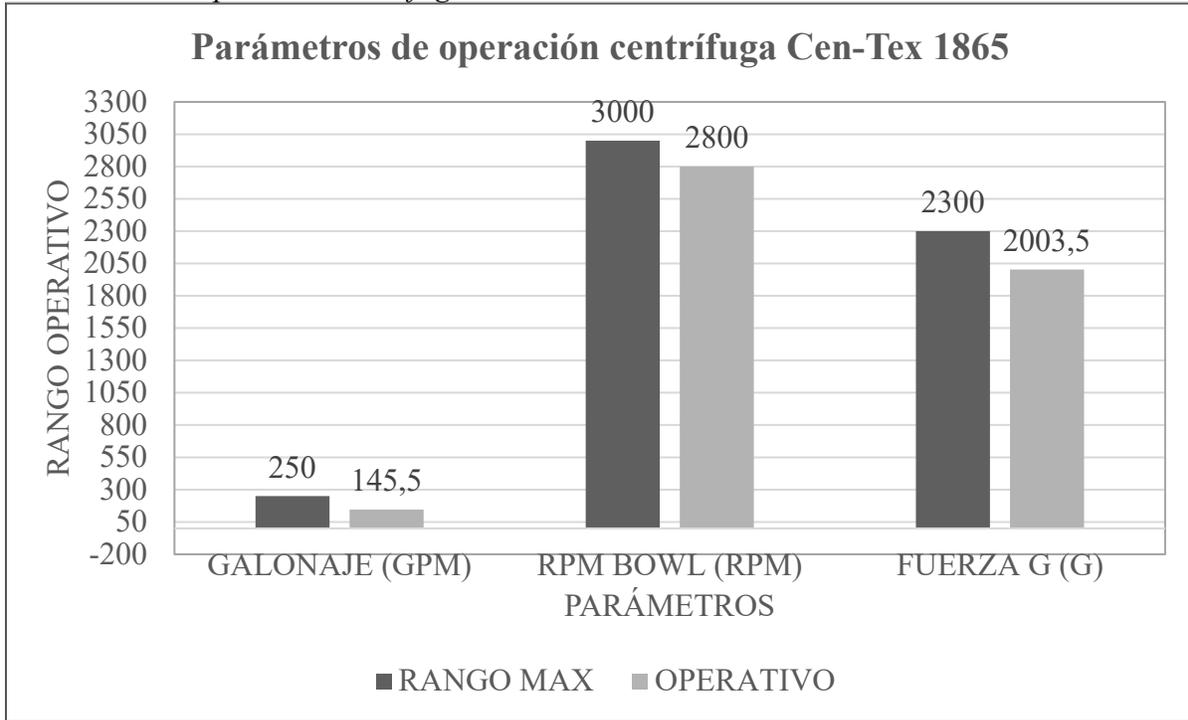
*Especificaciones técnicas de centrifugas Kubco y Cen-Tex 1865*

Parámetro	Galonaje (GPM) max	Rpm bowl max	Fuerza g max
<b>CEN-TEX 1865</b>	250	3000	2300
<b>KUBCO</b>	150	3600	2944

*Nota.* Esta tabla muestra una recopilación los valores máximos para los parámetros galonaje, rpm y fuerza g establecidos en las fichas técnicas de cada equipo.

**Figura 17.**

*Parámetros de operación centrífuga Cen-Tex 1865*

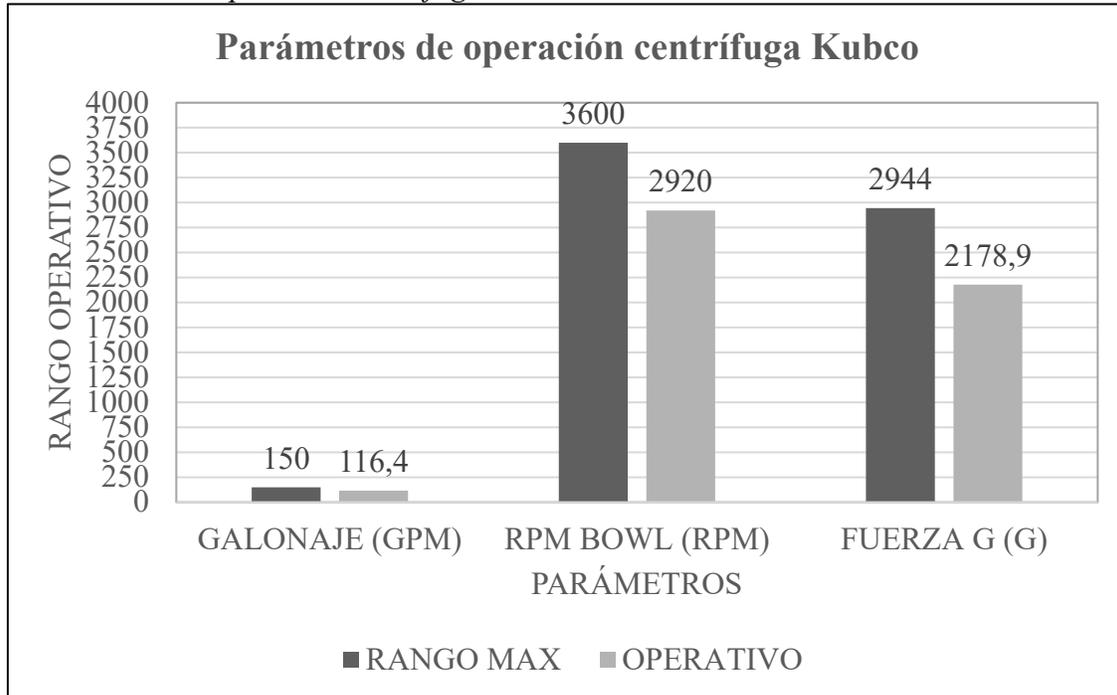


**Nota.** Esta figura representa gráficamente los valores máximos (ficha técnica-Tabla 1) y operativos para los parámetros de operación de la centrífuga Cen-Tex 1865.

Como se evidencia en la figura anterior, la operación para la perforación del pozo A del Campo E, ubicado en la cuenca de Llanos Orientales se llevó a cabo cumpliendo los rangos de exigencia máxima para la unidad Cen-Tex 1865, la cual se trabajó a un 58.2% de la capacidad de flujo (GPM), a 93.3% de las revoluciones por minuto del Bowl (RPM), y finalmente a un 87.1% de la Fuerza G que se genera en la centrífuga.

**Figura 18.**

*Parámetros de operación centrífuga Kubco*



**Nota.** Esta figura representa gráficamente los valores máximos (ficha técnica-Tabla 1) y operativos para los parámetros de operación de la centrífuga Kubco.

En la figura 18 se muestra que la operación con la centrífuga Kubco al igual que con la Cen-Tex 1865 se llevó a cabo cumpliendo los rangos de exigencia máxima para la unida; el equipo trabajo a un 77.6% de la capacidad de flujo (GPM), a 81.1% de las revoluciones por minuto del Bowl (RPM), y finalmente a un 74% de la Fuerza G que se genera en la centrífuga.

Dado que los parámetros de operación son determinados por el ingeniero a cargo del control de sólidos, según el punto de corte requerido, podemos observar que para un mismo instante la centrífuga Cen-Tex 1865 puede trabajar con una mayor capacidad de flujo (145,5 GPM), requiriendo de menos revoluciones por minuto del bowl (2800 RPM) y fuerza g (2003,5 G) para lograr el mismo punto de corte que la centrífuga Kubco, que trabaja con menor capacidad de flujo (116,4 GPM) y mayores revoluciones por minuto del bowl (2920 RPM) y fuerza g (2178,9 G), lo que se traduce en un mayor esfuerzo y por ende desgaste del equipo en comparación con la centrífuga Cen-Tex 1865.

A modo de anotación, es importante aclarar que la formación León se tuvo en cuenta entre las demás formaciones que componen la columna estratigráfica de la Cuenca de Llanos Orientales, gracias a que en esta predomina una geología mayormente compuesta por lodolitas grises y gris

verdes [11], siendo de interés manejar una formación en la que las unidades centrifugas pudieran enfocarse en la remoción de partículas ultra finas y finas (2-74 micrones) según la clasificación API de las partículas según su tamaño (Tabla 12).

**Tabla 12.**

*Tabla de clasificación API de partículas según su tamaño*

<b>Lodos y cortes de perforación</b>	
Clasificación API del tamaño de los solidos	
<u>CLASIFICACION</u>	<u>TAMAÑO EN MICRONES</u>
COLOIDA	Menor de 2
ULTRA FINO	2 a 44
FINO	44 a 74
MEDIO	74 a 250
INTERMEDIO	250 &

*Nota.* En esta figura se representa la denominación de las partículas sólidas según su rango de tamaño en micras. Tomado de: Manual de control de solidos M-I Swaco, M-I Swaco, <https://es.slideshare.net/VanessaMerchancano/control-de-solidos-ecapetrol>.

### **3.2 Análisis de la evaluación de muestras de lodo en laboratorio para cada unidad centrifuga**

El lodo de perforación utilizado en la perforación de la sección 8 3/4’’ del pozo A (figura 5), a una profundidad de 5881 ft (formación León) es un lodo de tipo inhibido, dado que a partir de esta profundidad se presentan en la geología arcillas que se hinchan al contacto con el agua utilizada en la preparación del lodo de perforación; que sea de tipo inhibido, indica que lentifica o detiene la hidratación, hinchamiento y desintegración de las lutitas [2], lo que se logra a partir de la adición de agentes químicos durante la preparación del lodo como Poliacrilamida parcialmente hidrolizada (PHPA), Cloruro de potasio, Poli glicoles, Poliaminas, Asfalto y Gilsonita [7]; previniendo así el embotamiento de la broca de perforación, además de reducir el riesgo de pegas diferenciales y otros problemas tanto para la formación como para los equipos utilizados en la operación de perforación.

A continuación, se presenta la tabla de los resultados de realizar al lodo de perforación las pruebas de laboratorio físicas y químicas, mencionadas en la metodología para el desarrollo de la presente etapa del proyecto, tomando muestras del mismo en las líneas de descarga líquida de las unidades centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco:

**Tabla 13.***Resultados Pruebas de laboratorio*

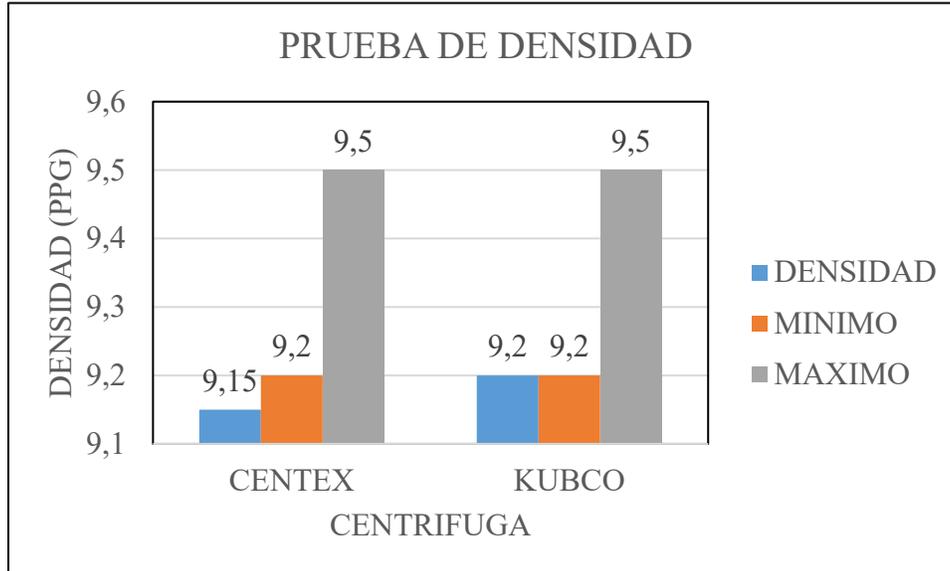
<b>Propiedades</b>	<b>Programa</b>	<b>Cen-tex 1865</b>	<b>Kubco</b>
Densidad (lb/gal)	9,2 – 9,5	9,15	9,2
Viscosidad embudo (seg/qt)	50 - 75	42	40
Viscosidad plástica (cP)	6 - 10	7	7
Punto cedente (lb/100pies2)	22 - 25	12	12
Esfuerzo de gel inicial (lb/100pies2)	8 - 12	8	8
Esfuerzo de gel a 10 min. (lb/100pies2)	15 - 21	15	15
Agua / Aceite (%Vol-%Vol)	-	92-0	92-0
Solidos totales	-	8	8
<Solidos de baja gravedad especifica (LGS) (% Vol-lb/bbl)	3% - 10%	7,7%-73,051	8%-75,861
MBT (lb/bbl)	0 – 22,5	22,5	22,5

**Nota.** Esta tabla resume el resultado de las pruebas de laboratorio efectuadas a las muestras del lodo tomadas de la línea de descarga de líquidos de las centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco en la perforación del pozo A, además de los rangos para cada propiedad estipulados en el programa de fluidos de perforación.

### **3.2.1 Peso del lodo**

Luego de que el lodo de perforación circulara a través de las centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco se obtuvieron los siguientes resultados para la prueba de densidad:

**Figura 19.**  
*Prueba de densidad*



**Nota.** La figura representa gráficamente los rangos mínimo y máximo para la densidad en ppg según el programa de control de sólidos, con el respectivo resultado de ejecutar la prueba en laboratorio.

Como se observa en el gráfico anterior, la densidad del lodo que circula por la centrifuga Kubco se mantiene dentro del rango establecido en el programa de control de propiedades del lodo de perforación, mientras que para la centrifuga Cen-Tex 1865 la densidad se reduce en 0.05 ppg; recordando lo expuesto en la tabla 2 (*Parámetros de operación de centrifugas Kubco y Cen-Tex 1865 en la perforación del pozo A*) el lodo de perforación ingresaba a la centrifugas con un peso de 9.3 ppg, por lo que puede decirse que ambas centrifugas están cumpliendo tanto con su función de reducir las partículas finas provenientes de la formación perforada (puesto que no hay un aumento en la densidad del lodo), como con la función de recuperar barita, que es un mineral utilizado comúnmente como agente densificante en los fluidos de perforación, lo que se ve reflejado en la disminución del peso del lodo.

El hecho de que en la centrifuga Cen-Tex 1865 el valor de la densidad sea inferior a lo establecido en el programa, puede generar serios problemas para la operación de perforación, puesto que la reducción del peso de la columna hidrostática produce un derrumbamiento de las paredes del pozo, además de la reducción de la presión hidrostática, que causa que los fluidos provenientes de la formación y el mismo lodo de perforación suban repentinamente a la superficie, generando las llamadas patadas de pozo. Sin embargo, como se menciona anteriormente, una de las funciones de

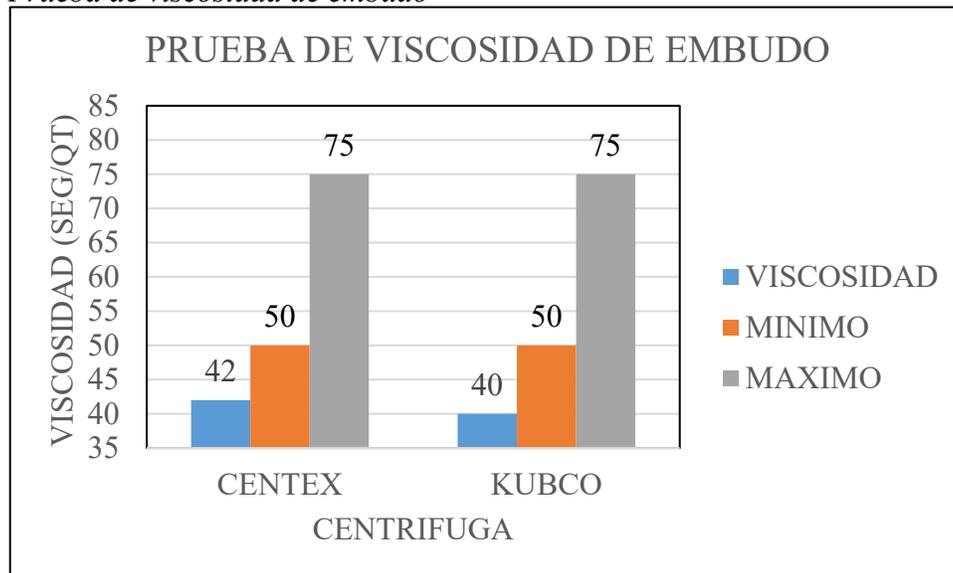
las centrifugas es recuperar material densificante como la barita, lo que quiere decir que las centrifugas extraen una parte de este material del fluido de perforación mientras están en operación, por lo que puede presentarse como en el caso expuesto una reducción del peso del lodo en la líneas de descarga de los equipos, lo que se contrarresta para evitar los problemas antes mencionados añadiendo al fluido de perforación el material densificante extraído, esto con el fin de recircular el lodo en condiciones óptimas para cumplir con sus funciones en la operación de perforación.

### 3.2.2 Reología

“Reología es la ciencia que trata de la deformación y del flujo de la materia. Al tomar ciertas medidas en un fluido, es posible determinar la manera en que dicho fluido fluirá bajo diversas condiciones, incluyendo la temperatura y la presión.” [7], a continuación, se enlistan algunos de los términos que se usan para describir las propiedades reológicas y la viscosidad del fluido de perforación:

**3.2.2.i. Viscosidad de embudo.** Su valor se obtiene luego de realizar una prueba de laboratorio usando el viscosímetro de Marsh, su unidad de medida es segundos sobre cuarto de galón (seg/qt) como se muestra en la figura a continuación:

**Figura 20.**  
*Prueba de viscosidad de embudo*

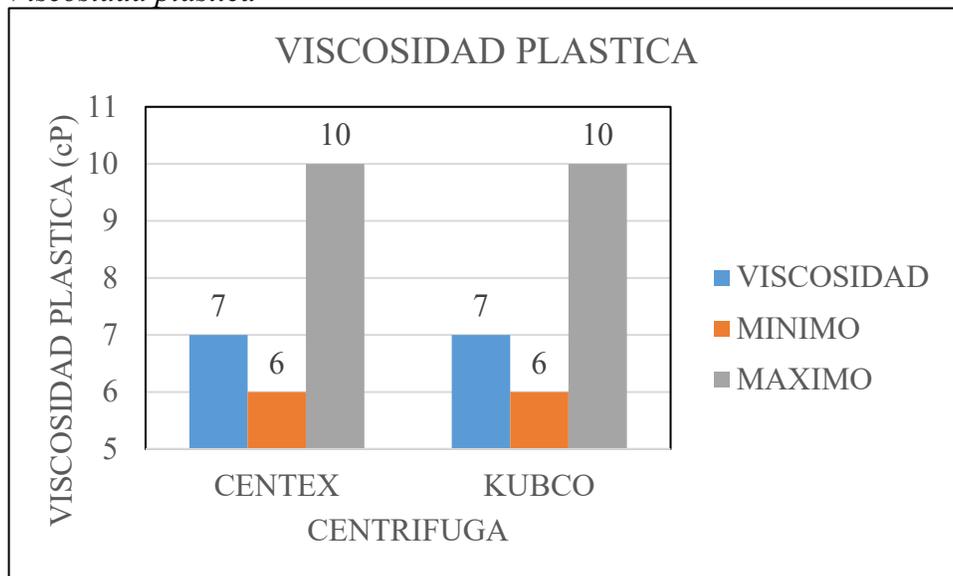


**Nota.** La figura representa gráficamente los rangos mínimo y máximo para la viscosidad de embudo en seg/qt, según el programa de control de sólidos, con el respectivo resultado de ejecutar la prueba en laboratorio.

Los resultados obtenidos revelan una reducción en la viscosidad del fluido de perforación en contraste con lo estipulado en el programa, lo cual simplemente indica que hubo un cambio relativo en las propiedades del lodo sin tener la información suficiente para determinar las propiedades reológicas del mismo.

**3.2.2.ii. Viscosidad plástica.** La viscosidad plástica se describe generalmente como la parte de la resistencia al flujo que es causada por la fricción mecánica. [7], lo que quiere decir que una variación en su valor está en mayor medida relacionada con la concentración de los sólidos presentes en el lodo de perforación; para determinarla es necesaria la implementación de un equipo especializado llamado viscosímetro Fann, de cuyo resultado se deriva la siguiente gráfica:

**Figura 21.**  
*Viscosidad plástica*

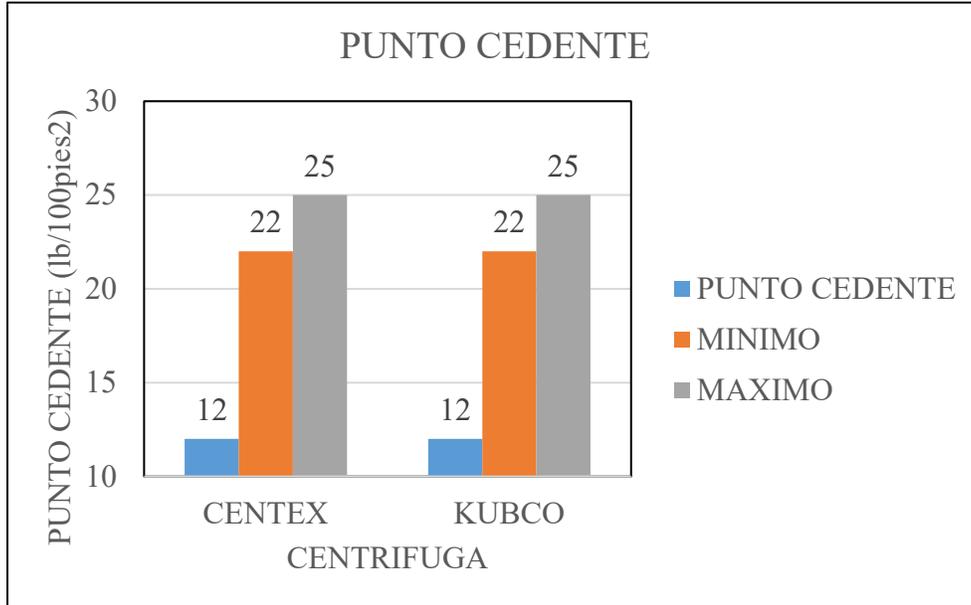


**Nota.** La figura representa gráficamente los rangos mínimo y máximo para la viscosidad plástica en cP según el programa de control de sólidos, con el respectivo resultado de ejecutar la prueba en laboratorio.

En la figura 21 se evidencia que la viscosidad plástica del lodo de perforación se mantiene dentro de los parámetros del programa, sin embargo, también es posible encontrar que los resultados para la centrifuga Cen-Tex 1865 y Kubco son cercanos al valor mínimo aceptado, lo que indica que el lodo no tiene una presencia de sólidos de formación significativa, garantizando una tasa de perforación óptima y una potencia adecuada de la broca de perforación.

**3.2.2.iii. Punto cedente.** Al igual que la viscosidad plástica su cálculo depende del viscosímetro Fann, y su valor se refleja en la figura 22, este representa una medida de la fuerza de atracción entre partículas bajo condiciones dinámicas o de flujo del fluido de perforación [7].

**Figura 22.**  
*Punto cedente*

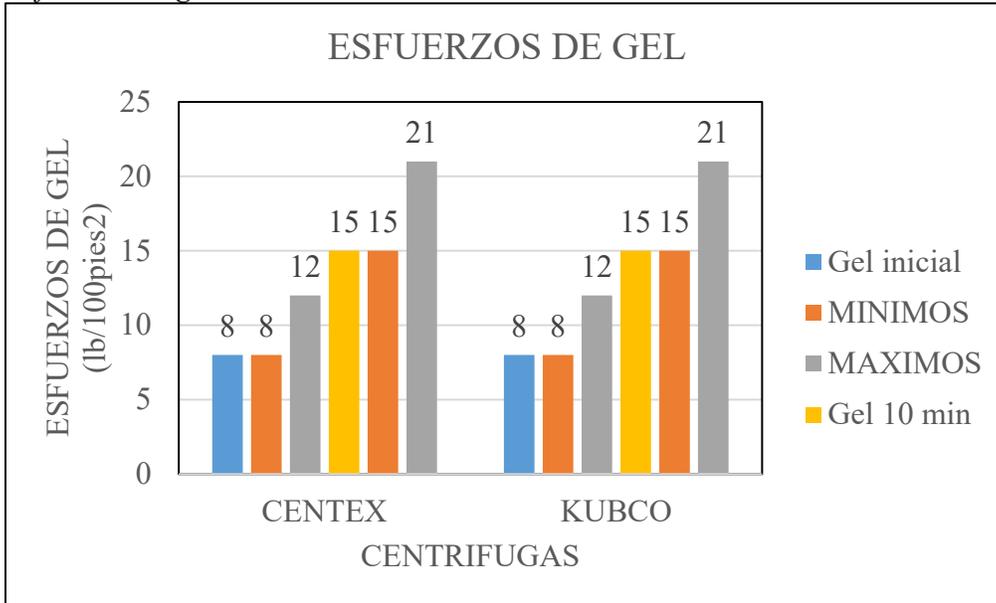


**Nota.** La figura representa gráficamente los rangos mínimo y máximo para el punto cedente en  $\text{lb}/100\text{pies}^2$  según el programa de control de sólidos, con el respectivo resultado de ejecutar la prueba en laboratorio.

Según lo mencionado anteriormente, al obtener los resultados del punto cedente para el lodo que circula a través de las centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco, se puede apreciar que el valor para ambos casos está muy por debajo de lo establecido en el programa, lo que es debido a que hay una reducción en los sólidos reactivos presentes en el lodo, por lo que el nivel de interacción entre las partículas sólidas se reduce considerablemente.

**3.2.2.iv. Esfuerzos de gel.** Es una “propiedad que mide las fuerzas de atracción entre partículas bajo condiciones estáticas. Se relaciona con la capacidad de suspensión que adquiere el fluido cuando se detiene la circulación” [7]. Se determina a partir del uso del viscosímetro Fann llevando una muestra de lodo a 600 RPM, dejándola reposar 10 segundos, para posteriormente poner en funcionamiento el viscosímetro a 3 RPM para registrar el valor más alto obtenido en  $\text{lb}/100\text{f}^2$ , y luego repitiendo el proceso dejando reposar la muestra 10 minutos o el tiempo de interés.

**Figura 23.**  
*Esfuerzos de gel*

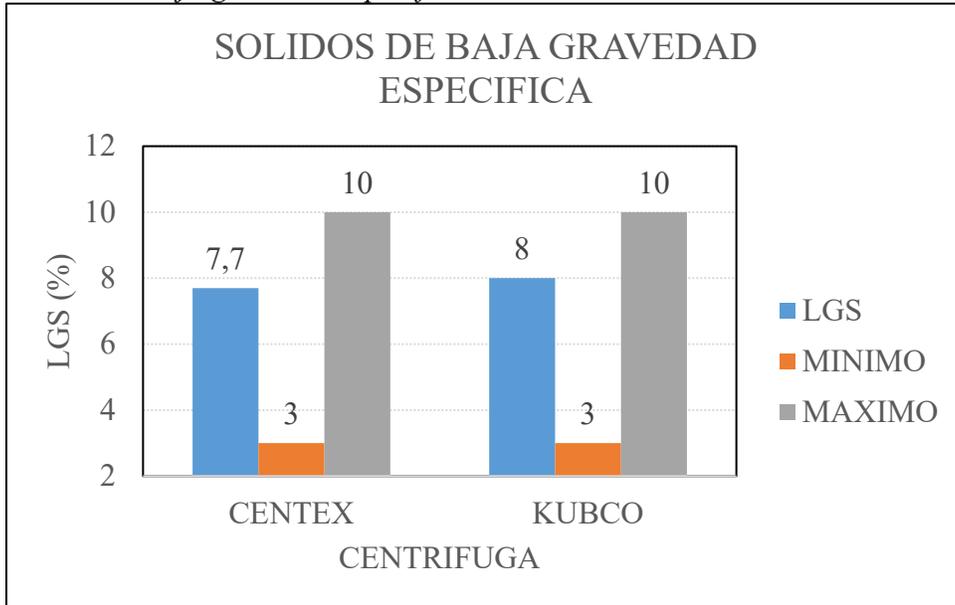


**Nota.** La figura representa gráficamente los rangos mínimo y máximo para los esfuerzos de gel inicial y de 10 min. en lb/100pies<sup>2</sup> según el programa de control de sólidos, con el respectivo resultado de ejecutar las pruebas en laboratorio.

Los esfuerzos de gel tanto para las centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco presentan los mismos valores y se mantienen dentro de los rangos establecidos en el programa, sus valores para la medición de 10 segundos y 10 minutos indican un gel tipo plano, debido a que como se puede observar según la definición para este tipo de geles [7], los valores obtenidos no se alejan significativamente entre sí; al concluir que es un gel de tipo plano se puede descartar que se presente una acumulación de sólidos en el fluido de perforación y se garantiza que el lodo podrá seguir siendo bombeado con el tiempo si se deja estático en el pozo, dado que para este tipo de geles cuando el fluido se pone en circulación se rompe con facilidad el estado de gelificación.

v. Sólidos de baja gravedad específica. Se determina a partir de la prueba de retorta, la cual permite obtener los resultados del porcentaje de agua, aceite y sólidos que contiene la muestra del lodo de perforación, observando que la muestra no contiene aceite y está conformada por un 92% de agua y un 8% de sólidos según la tabla 13, de lo que se deriva el cálculo de los sólidos de baja gravedad específica mediante el uso de software especializado.

**Figura 24.**  
*Sólidos de baja gravedad específica*



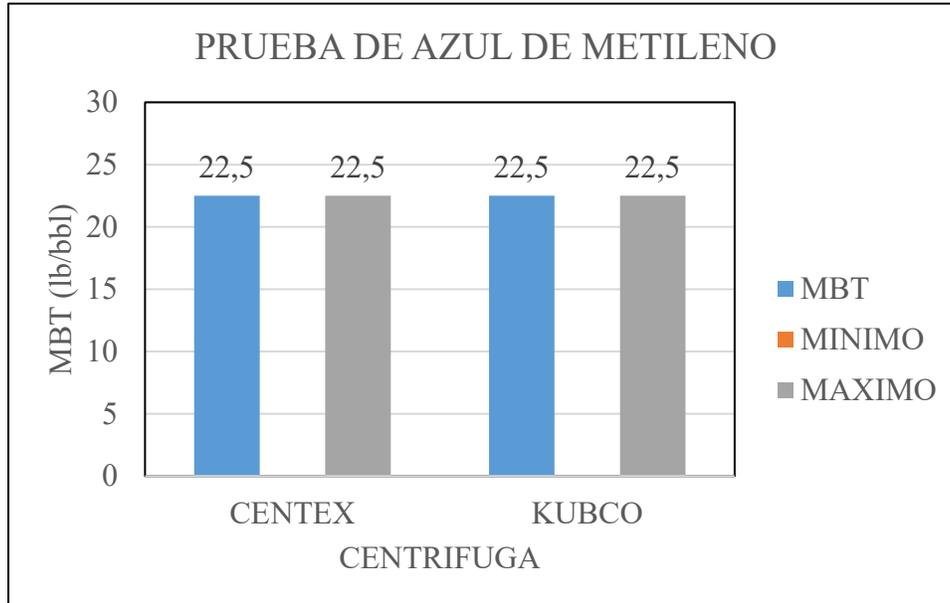
**Nota.** La figura representa gráficamente los rangos mínimo y máximo para los sólidos de baja gravedad específica en % según el programa de control de sólidos, con el respectivo resultado de calcular su valor tras realizar la prueba de porcentaje de sólidos y líquidos en laboratorio.

Se evidencia que los LGS están cerca del tope admitido según el programa, puede observarse que para las centrifugas Cen-Tex 1865 son de un valor inferior (7,7%-73,051 lb/bbl) con respecto a las centrifugas Kubco (8%-75,861 lb/bbl), lo que se debe a que como se observa en la figura 19, la densidad del lodo es más baja luego de circular en la centrifuga Cen-Tex 1865 (9,15 lb/gal) que en la Kubco (9,2 lb/gal); como se dice anteriormente, debido a que los LGS están cerca del tope admitido, es necesario iniciar un proceso de dilución con el fin de reducir los sólidos contaminantes del fluido de perforación para así evitar problemas como pega diferencial, pérdida de circulación del lodo, reducción de velocidad de penetración (ROP), etc.

### **3.2.3 Prueba de azul de metileno**

En la siguiente figura se muestra el resultado de realizar el procedimiento descrito en la sección 2.3.1 para llevar a cabo la prueba:

**Figura 25.**  
*Prueba de azul de metileno*



**Nota.** La figura representa gráficamente los rangos mínimo y máximo para la prueba de azul de metileno lb/bbl según el programa de control de sólidos, con el respectivo resultado de ejecutar la prueba en laboratorio, teniendo en cuenta que el valor mínimo admitido es de 0 lb/bbl.

La prueba de azul de metileno (MBT) arroja resultados tanto para la centrifuga Cen-Tex 1865 como para la Kubco de 22.5 lb/bbl, valor que según la tabla es el máximo admitido dentro del programa establecido, lo cual indica que el polímero utilizado no está cumpliendo su función como agente inhibidor, ya sea debido que se está adicionando en una cantidad insuficiente o porque no es el agente químico ideal para cumplir con el papel de reducir la reacción de las arcillas de la formación León, por lo cual debe añadirse una cantidad mayor de agente inhibidor al fluido de perforación, y de continuar con un aumento en el valor de MBT deberá implementarse un nuevo agente.

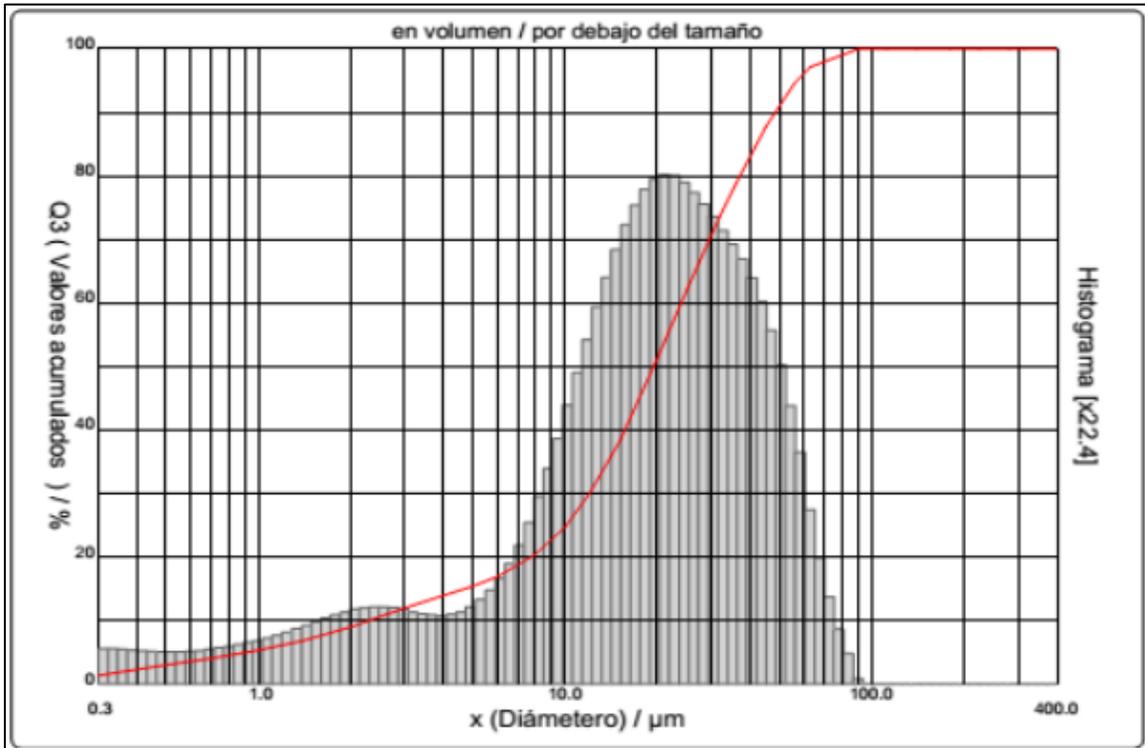
### **3.2.4 Análisis de distribución de tamaño de partícula**

Como se ha mencionado anteriormente, el objetivo de esta prueba radica en conocer el tamaño de las partículas sólidas presentes en una muestra de lodo de perforación, con la finalidad de determinar la eficiencia de equipos como las centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco en la remoción de estas partículas.

Para el desarrollo de esta prueba se tomaron muestras del lodo de perforación en las líneas de descarga tanto de sólidos como líquidos para las centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco, además de

una muestra del lodo en la línea de succión que alimentaba ambas unidades centrifugas; a continuación, se expone el gráfico estadístico de distribución de datos que representa el resultado de realizar la prueba a la muestra del lodo de perforación en la línea de ingreso del fluido para las centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco, en el que se puede observar el tamaño de partícula que predomina en la muestra.

**Figura 26.**  
*Línea de succión*



**Nota.** En la figura se muestra el gráfico estadístico de distribución de datos que representa el resultado de realizar la prueba de distribución de tamaño de partícula a la muestra del lodo de perforación en la línea de succión para las centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco.

Como puede observarse en la figura anterior, se tiene una gráfica que relaciona el tamaño de las partículas presentes en la muestra del lodo a través de su diámetro aproximado en micras, contra el porcentaje en volumen de la misma, además de una línea de color rojo que representa la tendencia de la distribución del tamaño de partículas presentes en el lodo, calculada a través del software especializado del equipo de análisis de distribución de tamaño de partícula, y de la cual se deriva la siguiente tabla de resultados.

**Tabla 14.**

*Reporte de resultados línea de succión*

<b>Reporte de resultados</b>		
<b>Análisis</b>	<b>Unidad</b>	<b>Succión</b>
Dv10	μm	2,26
Dv50	μm	19,41
Dv90	μm	48,53

**Nota.** En la tabla se muestra el resultado en tamaño de partícula para un 10%, 50% y 90% en volumen de la muestra de lodo analizada en la línea de succión de las centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco.

En la tabla 14 se exponen percentiles representativos para un 10%, 50% y 90% en volumen de la muestra de lodo utilizada como se muestra a continuación:

«Los percentiles se definen como  $X_{aB}$  donde:

X = parámetro, por lo general D para el diámetro.

a = distribución de ponderación, por ejemplo, n para el número, v para el volumen, i para intensidad.

B = porcentaje de la muestra por debajo de este tamaño de partícula, por ejemplo, 50%, a veces escrito como una fracción decimal es decir 0,5» [12]

Estos tres valores son los que generalmente se reportan en la mayoría de los análisis de distribución de tamaño de partícula en los que se usa la difracción laser, los cuales son elegidos según el interés de quien contrata el servicio de análisis; el más importante de estos valores es el diámetro de partículas para el 90% en volumen de la muestra de lodo, dado que además de ser el tamaño que predomina en la muestra, evidencia las partículas más grandes presentes, que son indispensables para determinar el funcionamiento de las centrifugas; cómo se puede observar para el caso de la línea de succión de las centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco, para un 10% en volumen de la muestra (Dv10) se tienen las partículas más pequeñas de 2.26 micras, el Dv50 representa la media del tamaño de las partículas que es de 19,41 micras, y el Dv90 está representado por un tamaño de partícula de 48,53 micras, lo que indica el tamaño de partícula de mayor presencia en la muestra.

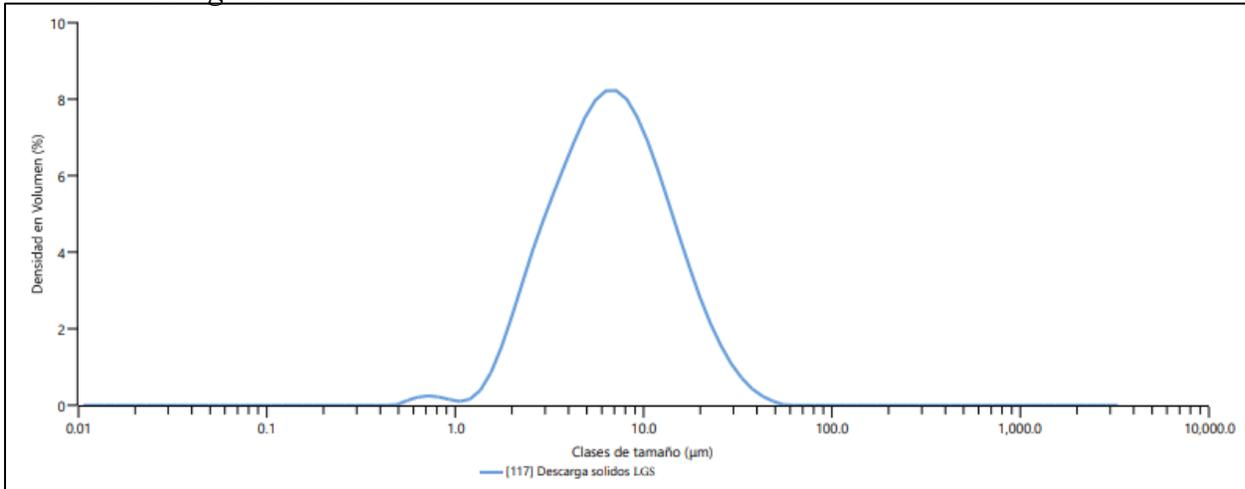
Los resultados que se expondrán a continuación para las líneas de descarga de sólidos y líquidos para las centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco, hacen énfasis en los sólidos de baja gravedad especifica (LGS), lo cual es debido a que estas centrifugas fueron operadas para la perforación del pozo A con configuraciones de RPM del bowl y fuerza g (tabla 2) en función de retirar este tipo de sólidos, que requieren de altas revoluciones y fuerza g para ser removidos del fluido de

perforación, por lo cual los valores para estos parámetros de operación fueron cercanos a los máximos que pueden lograr los equipos según sus especificaciones técnicas (tabla 1).

**3.2.4 i. Análisis cilas centrífuga Cen-TEX 1865.** A continuación, se muestran los gráficos estadísticos de distribución de datos, y las tablas de resultados para la muestra de lodo de perforación en las líneas de descarga sólida y líquida.

**Figura 27.**

*Línea de descarga sólida LGS*



**Nota.** En la figura se muestra el gráfico estadístico de distribución de datos que representa el resultado de realizar la prueba de distribución de tamaño de partícula a la muestra del lodo de perforación en la línea de descarga sólida para la centrífuga Cen-TEX 1865.

Como se puede observar, las gráficas estadísticas de distribución de datos para la centrífuga Cen-TEX 1865 no muestran una línea de tendencia, lo que se debe a que a diferencia de las que serán expuestas para la centrífuga Kubco, fueron desarrolladas por un laboratorio diferente, pero igualmente siguiendo lo estipulado en la norma técnica ISO 13320 “Particle size analysis - Laser diffraction methods”, lo que quiere decir que aunque no se muestre la línea de tendencia, los reportes de resultados se realizaron con base a la misma, la cual es calculada automáticamente por el software del equipo usado en el análisis de la muestra de lodo de perforación.

**Tabla 15.**

*Reporte de resultados línea de descarga solida LGS*

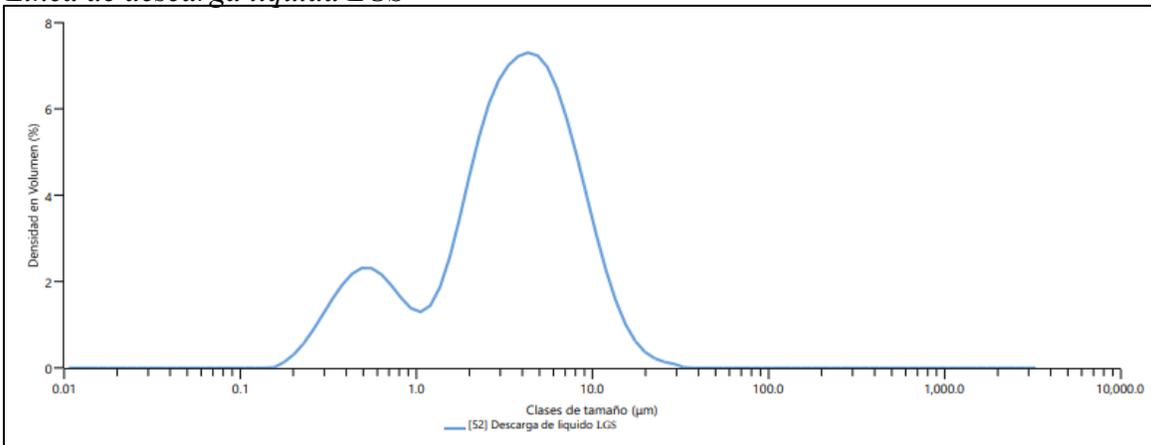
Reporte de resultados		
Análisis	Unidad	Descarga solida LGS
Dv10	μm	2,63
Dv50	μm	6,65
Dv90	μm	16,8

**Nota.** En la tabla se muestra el resultado en tamaño de partícula para un 10%, 50% y 90% en volumen de la muestra de lodo analizada en la línea de descarga solida de la centrifuga Cen-Tex 1865.

El reporte de resultados muestra un tamaño para las partículas más finas Dv10 de 2,63 micras, una media Dv50 de 6,65 micras y un Dv90 de 16,8 micras, presentándose una disminución en el tamaño de las partículas más grandes (Dv90) con respecto al valor obtenido para la línea de succión de 48,53 micras, lo que indica una reducción de 65,4%.

**Figura 28.**

*Línea de descarga liquida LGS*



**Nota.** En la figura se muestra el gráfico estadístico de distribución de datos que representa el resultado de realizar la prueba de distribución de tamaño de partícula a la muestra del lodo de perforación en la línea de descarga liquida para la centrifuga Cen-Tex 1865.

**Tabla 16.**

*Reporte de resultados línea de descarga liquida LGS*

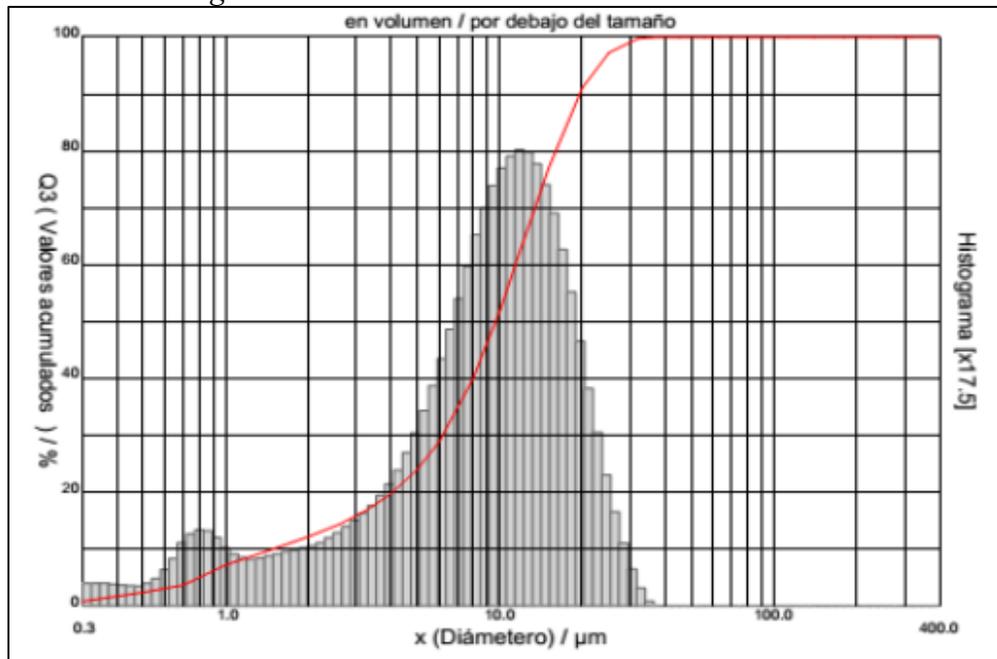
Reporte de resultados		
Análisis	Unidad	Descarga liquida LGS
Dv10	μm	0,548
Dv50	μm	3,50
Dv90	μm	9,03

**Nota.** En la tabla se muestra el resultado en tamaño de partícula para un 10%, 50% y 90% en volumen de la muestra de lodo analizada en la línea de descarga liquida de la centrifuga Cen-Tex 1865.

El reporte de resultados para la línea de descarga líquida de la centrifuga Cen-Tex 1865 muestra un tamaño para las partículas más finas Dv10 de 0,548 micras, una media Dv50 de 3,50 micras y un Dv90 de 9,03 micras, presentándose una disminución en el tamaño de las partículas más grandes (Dv90) con respecto al valor obtenido para la línea de succión de 48,53 micras, lo que indica una reducción de 81,4%.

**3.2.4.ii.** Análisis cilas centrifuga Kubco. A continuación, se muestran los gráficos estadísticos de distribución de datos, y las tablas de resultados para la muestra de lodo de perforación en las líneas de descarga sólida y líquida para la centrifuga Kubco.

**Figura 29.**  
*Línea de descarga sólida LGS*



**Nota.** En la figura se muestra el gráfico estadístico de distribución de datos que representa el resultado de realizar la prueba de distribución de tamaño de partícula a la muestra del lodo de perforación en la línea de descarga sólida para la centrifuga Kubco.

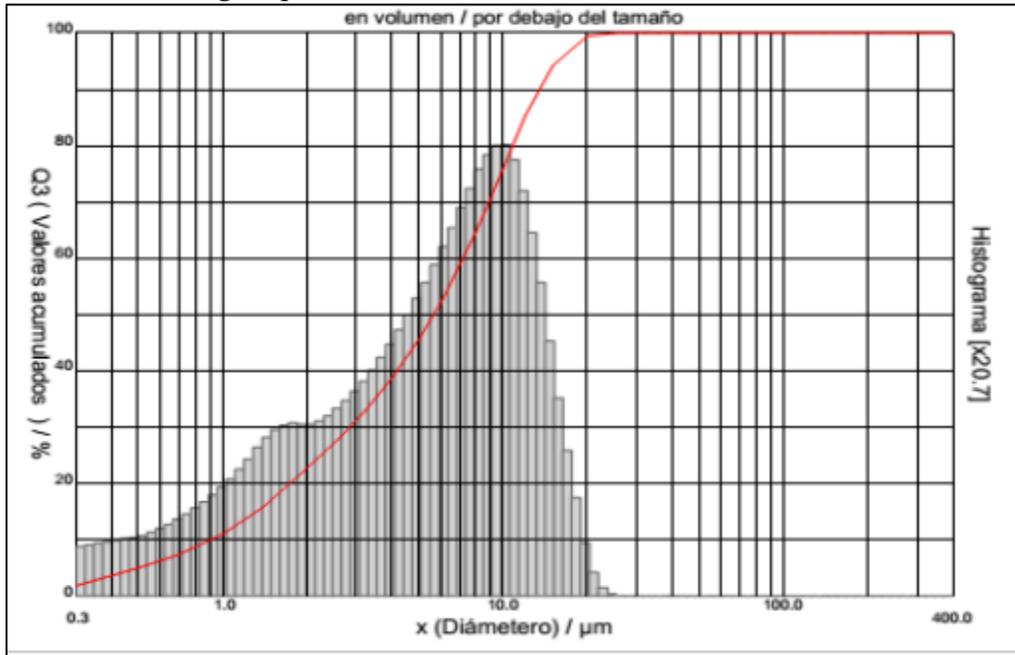
**Tabla 17.**  
*Reporte de resultados línea de descarga sólida LGS*

Reporte de resultados		
Análisis	Unidad	Descarga sólida LGS
Dv10	µm	1,47
Dv50	µm	9,63
Dv90	µm	19,56

**Nota.** En la tabla se muestra el resultado en tamaño de partícula para un 10%, 50% y 90% en volumen de la muestra de lodo analizada en la línea de descarga sólida de la centrifuga Kubco.

El reporte de resultados muestra un tamaño para las partículas más finas Dv10 de 1,47 micras, una media Dv50 de 9,63 micras y un Dv90 de 19,56 micras, presentándose una disminución en el tamaño de las partículas más grandes (Dv90) con respecto al valor obtenido para la línea de succión de 48,53 micras, lo que indica una reducción de 59.7%.

**Figura 30.**  
*Línea de descarga líquida LGS*



**Nota.** En la figura se muestra el gráfico estadístico de distribución de datos que representa el resultado de realizar la prueba de distribución de tamaño de partícula a la muestra del lodo de perforación en la línea de descarga líquida para la centrífuga Kubco.

**Tabla 18.**  
*Reporte de resultados línea de descarga líquida LGS*

Reporte de resultados		
Análisis	Unidad	Descarga líquida LGS
Dv10	μm	0,89
Dv50	μm	5,64
Dv90	μm	13,47

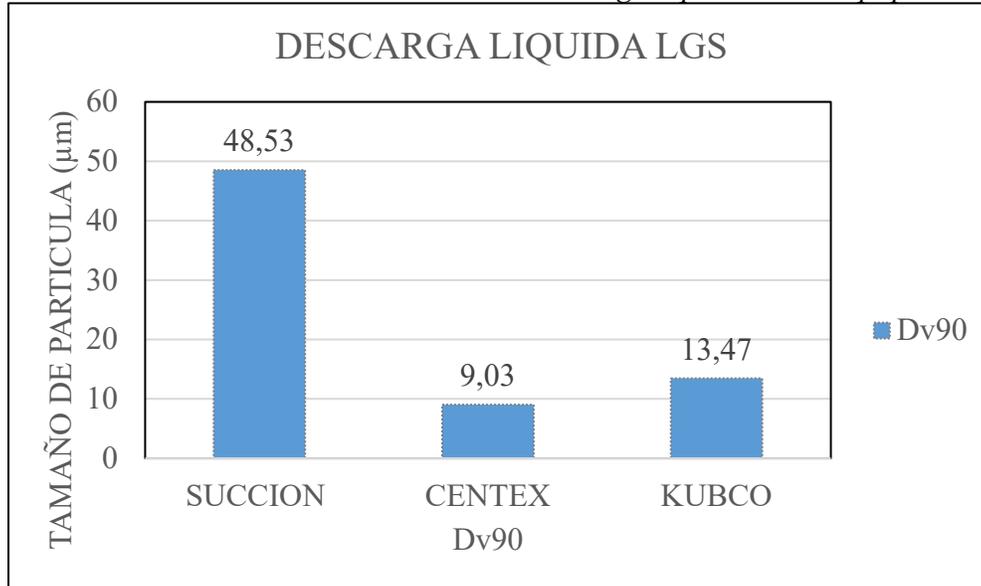
**Nota.** En la tabla se muestra el resultado en tamaño de partícula para un 10%, 50% y 90% en volumen de la muestra de lodo analizada en la línea de descarga líquida de la centrífuga Kubco.

El reporte de resultados para la línea de descarga líquida de la centrífuga Kubco muestra un tamaño para las partículas más finas Dv10 de 0,89 micras, una media Dv50 de 5,64 micras y un Dv90 de 13,47 micras, presentándose una disminución en el tamaño de las partículas más grandes (Dv90)

con respecto al valor obtenido para la línea de succión de 48,53 micras, lo que indica una reducción de 72,2%.

**Figura 31.**

*Contraste de resultados en las líneas de descarga líquida de los equipos*



**Nota.** La figura muestra gráficamente el contraste en el tamaño de partícula para el Dv90 de la línea de succión, con respecto a la línea de descarga líquida de las centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco.

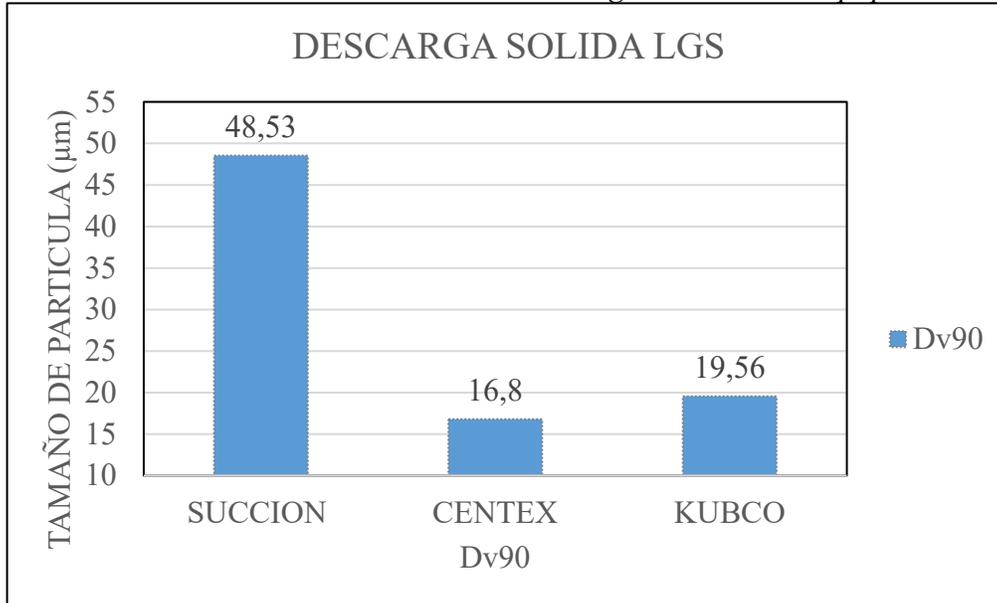
Según lo que se observa en la figura 31, es posible evidenciar que el tamaño de partícula que predomina en la muestra de lodo en la línea de succión de las centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco se reduce notablemente luego de que el fluido circula a través de los equipos, obteniendo una reducción del 81,4% en tamaño de partículas para la centrifuga Cen-Tex 1865, y una de 72,2% para la centrifuga Kubco, esto con relación al 90% en volumen de cada muestra de lodo tomada, y tomando como base el tamaño de partícula para el Dv90 de la línea de succión que fue de 48,53 micras; lo anterior indica que las centrifugas están cumpliendo con su trabajo de reducir la presencia de sólidos en la línea de descarga líquida lo que es fundamental para cuando el lodo de perforación sea utilizado nuevamente para continuar con la operación de perforación del pozo.

También es posible inferir que las partículas presentes en la muestra tomada para la línea de descarga líquida de la centrifuga Cen-Tex 1865 son un 9,2% más pequeñas que las presentes para la misma línea de la centrifuga Kubco, esto en contraste con el tamaño de las partículas de la muestra para la línea de succión de ambas centrifugas, por lo cual es más eficiente la centrifuga Cen-Tex 1865 puesto que el lodo que sale de esta tras su operación tiene partículas de menor

tamaño, lo que facilita el reacondicionamiento del mismo en los tanques de lodo, para ser posteriormente utilizado en otras etapas del proceso de perforación del pozo.

**Figura 32.**

*Contraste de resultados en las líneas de descarga solida de los equipos*



**Nota.** La figura muestra gráficamente el contraste en el tamaño de partícula para el Dv90 de la línea de succión, con respecto a la línea de descarga solida de las centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco.

En la figura 32, se muestra que el tamaño de partícula para la centrifuga Cen-Tex 1865 se reduce en un 65,4% para la línea de descarga sólida, mientras que para la centrifuga Kubco se reduce en 59.7%, ambos casos en comparación con el tamaño de partícula obtenido para la muestra de lodo en la línea de succión de las centrifugas, también es posible observar que al igual que en la descarga líquida, la centrifuga Cen-Tex 1865 genera un tamaño menor de partícula en la descarga sólida con respecto a la centrifuga Kubco, lo cual en términos de eficiencia no tiene gran relevancia debido a que los sólidos obtenidos para este caso no son de provecho para la operación de perforación, pues están compuestos en su mayoría por partículas de sólidos aportados por la formación.

### 3.3 Análisis financiero de la implementación de las unidades centrifugas

A continuación, se desarrollan los indicadores financieros que tienen como fin validar la implementación de las centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco.

### 3.3.1 Valor presente neto (VPN)

Generalmente las empresas utilizan diferentes indicadores financieros para medir el rendimiento, evaluar los riesgos, ventajas y desventajas que puede representar una inversión para una determinada entidad, el valor presente neto es usado para evaluar qué proyecto genera más utilidades a la empresa, por lo cual, considerando los siguientes ingresos de las centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco, se procederá a calcular el indicador financiero.

«Formula a utilizar:

$$VPN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+i)^t}$$

DONDE:

- VPN= Valor Presente
- I<sub>0</sub>= inversión inicial o costo inicial
- F<sub>t</sub>= flujo de efectivo o ingreso del periodo
- k = tasa
- t = inversiones durante el periodo
- n = número de periodos.» [13]

Entonces para calcular el valor presente neto de la centrifuga Cen-Tex 1865 se puede realizar la formula sustituyendo los siguientes valores, teniendo en cuenta las tablas 5 y 6 mostradas en el capítulo metodológico:

- I<sub>0</sub>= 1.345.662.500,00
- F<sub>t</sub>=650.000,00 diarios \* 120 días = 78.000.000,00 cuatrimestral
- k=5% = 5/100= 0,05
- t=1, 2, 3,4.....,60
- n= 20 años de vida útil
- 1 año ----- 3 cuatrimestres
- 20 años -----¿? cuatrimestres
- n = 20\*3/1= 60 cuatrimestres --- n =60

$$VP = -1.345.662.500,00 + \frac{78.000.000,00}{(1+0,05)} + \frac{78.000.000,00}{(1+0,05)^2} + \dots + \frac{78.000.000,00}{(1+0,05)^{60}} = 130.822.082,96$$

- Y para la maquina Kubco:
- $I_0 = 768.950.000,00$
- $F_t = 550.000,00 \text{ diarios} * 120 \text{ días} = 66.000.000,00 \text{ cuatrimestral}$
- $k = 5\% = 5/100 = 0,05 \text{ cuatrimestral}$
- $t = 1, 2, 3, 4, \dots, 60$
- $n = 20 \text{ años de vida útil}$
- 1 año ----- 3 cuatrimestres
- 20 años ----- ¿? cuatrimestres
- $n = 20 * 3 / 1 = 60 \text{ cuatrimestres} \text{ --- } n = 60$

$$VP = -768.950.000,00 + \frac{66.000.000,00}{(1+0,05)} + \frac{66.000.000,00}{(1+0,05)^2} + \dots + \frac{66.000.000,00}{(1+0,05)^{60}} = 480.383.108,65$$

Para ahorrar tiempo, el VPN se calcula en Excel con la formula “=VNA (tasa; valor1; valor2...)- costo inicial”, el cual arrojará el resultado más rápidamente; es importante resaltar que donde dice valor 1 se coloca la matriz donde se encuentran los ingresos de cada periodo.

Este procedimiento fue realizado para ambas maquinas quedando de la siguiente manera:

**Tabla 19.**

*Cálculo del VPN a través de Excel*

	<b>Cen-Tex 1865</b>	<b>Kubco</b>
INVERSION INICIAL	\$ 1.345.662.500,00	\$ 768.950.000,00
CUATRIMESTRES	<b>FLUJOS DE EFECTIVO</b>	
1	\$ 78.000.000,00	\$ 66.000.000,00
60	\$ 78.000.000,00	\$ 66.000.000,00
<b>VPN</b>	<b>\$ 130.822.082,96</b>	<b>\$ 480.383.108,65</b>

*Nota.* En esta tabla se muestran algunos de los datos para calcular el VPN a través de Excel, la tabla completa puede encontrarse como anexo A al final del presente documento.

La centrifuga Kubco representa un margen de ganancia más alto en referencia a la centrifuga Cen-Tex 1865, utilizando la teoría en la que se basa este indicador, sería Kubco la más adecuada, es de hacer notar que, si la entidad está planeando estrategias para generar mayor utilidad, la implementación de la maquinaria Kubco, según en el cálculo y la representación de los resultados, estaría siendo decisión más acertada.

### 3.3.2 Costo anual uniforme equivalente (CAUE)

Para elaborar el indicador financiero CAUE se realizó de dos maneras diferentes, la primera a través de la aplicación de la fórmula y la segunda, usando la herramienta Excel, con el fin de verificar la exactitud de los montos y evitar los errores de cálculos, a continuación, se presenta la información consolidada de las centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco, con una periodicidad cuatrimestral, realizando la sumatoria de los costos de alistamiento, mantenimiento y transporte como se muestra en la tabla 20.

**Tabla 20.**

*Consolidación de los costos cuatrimestrales*

Información	Cen-Tex 1865	Kubco 5800
COSTOS DE ALISTAMIENTO	\$ 5.546.590,00	\$ 1.498.686,00
COSTO DE MANTENIMIENTO	\$ 200.000,00	\$ 190.000,00
COSTO DE TRANSPORTE	\$ 3.500.000,00	\$ 2.500.000,00
COSTOS CUATRIMESTRALES	\$ 9.246.590,00	\$ 4.188.686,00

**Nota.** La tabla muestra la consolidación de los costos requeridos por cada centrifuga en periodos cuatrimestrales más la suma total de los mismos.

En la tabla 21 se adoptaron los siguientes datos: un valor de salvamento del 20% del costo inicial de cada centrifuga, y un periodo de 20 años que representan la vida útil de las centrifugas, que se traduce en 60 cuatrimestres realizando la transformación pertinente.

**Tabla 21.**

*Presentación de los datos agrupados para efectuar el cálculo*

Información	Cen-Tex 1865	Kubco 5800
COSTO INICIAL	\$ 1.345.662.500,00	\$ 768.950.000,00
COSTOS CUATRIMESTRALES	\$ 9.246.590,00	\$ 4.188.686,00
VALOR DE SALVAMENTO	\$ 269.132.500,00	\$ 153.790.000,00
CUATRIMESTRES	60	60

**Nota.** La tabla muestra los datos necesarios para desarrollar el cálculo del indicador financiero CAUE.

«Formulas a utilizar

$$VA = I_0 + Cf \left( \frac{1 - (1+i)^{-n}}{i} \right) - VF (1+i)^{-n}$$

Donde:

$$CAUE = VAN \frac{(1+i)^n * i}{(1+i)^n - 1}$$

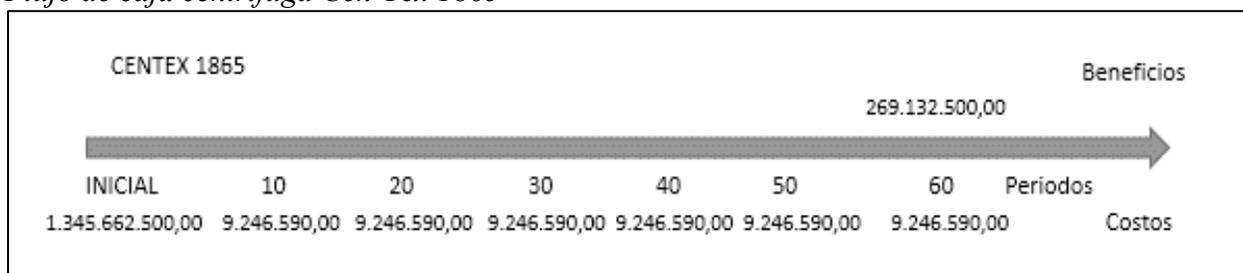
- $I_0$ = inversión inicial
- $C_f$ = costos del periodo
- $i$ = tasa
- $n$ = número de periodos
- $VF$ = valor de rescate
- $VAN$ =  $VA$  valor actualizado, valor presente.» [13]

i. Solución. A continuación, se desarrolla el método para el cálculo del indicador financiero CAUE:

- **CAUE Cen-Tex 1865:**

**Figura 33.**

*Flujo de caja centrifuga Cen-Tex 1865*



*Nota.* La figura muestra el flujo de caja proyectado para la centrifuga Cen-Tex 1865 en 60 periodos que representan los 20 años de la vida útil del equipo.

Sustituyendo los datos en la ecuación obtenemos:

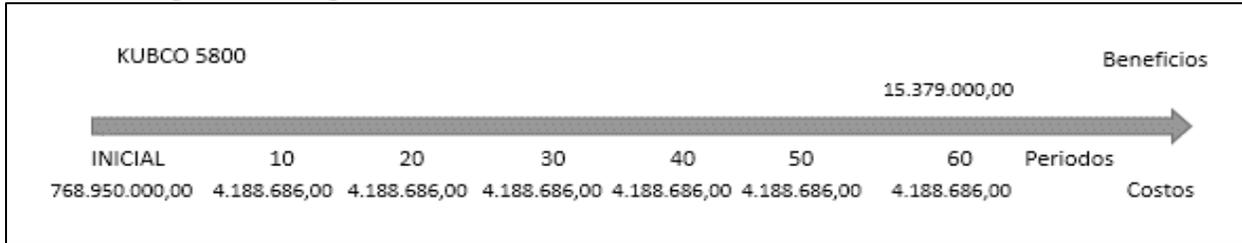
- $VA = 1.345.662.500,00 + 9.246.590,00 \left( \frac{1 - (1 + 0,05)^{-60}}{0,05} \right) - 269.132.500,00 (1 + 0,05)^{-60} =$
- $VA = 1.506.285.730,00$
- $CAUE = 1.506.285.730 \left( \frac{(1 + 0,05)^{60} * 0,05}{(1 + 0,05)^{60} - 1} \right) =$  -  $CAUE = 79.574.340,5$

Se evidencia que el valor actual de los costos de la centrifuga Cen-Tex 1865 es de 1.506.285.730,00 de pesos y un costo cuatrimestral equivalente de 79.574.340,5 pesos colombianos.

- CAUE Kubco:

**Figura 34.**

*Línea de tiempo de la maquina Kubco*



**Nota.** La figura muestra el flujo de caja proyectado para la centrifuga Kubco en 60 periodos que representan los 20 años de la vida útil del equipo.

Sustituyendo los datos en la ecuación obtenemos:

- $VA = 768.950.000,00 + 4.188.686,00 \left( \frac{1 - (1 + 0,05)^{-60}}{0,05} \right) - 153.790.000,00 (1 + 0,05)^{-60}$
- $VA = 840.005.621,83$
- $CAUE = 840.005.621,83 \left( \frac{(1 + 0,05)^{60} * 0,05}{(1 + 0,05)^{60} - 1} \right) = CAUE = 44.375.971,99$

Según los cálculos realizados se puede observar el valor actual de los costos de la centrifuga Kubco es de 840.005.621,83 de pesos y un costo anual equivalente de 44.375.971,99 pesos colombianos. Otra forma de realizar el cálculo de CAUE a través del uso de fórmulas en Excel donde las siete primeras filas es la organización de los datos proporcionados, en la columna número cuatro se hace referencia a las fórmulas usadas; en la fila nueve “VA EQUIPOS” se coloca igual, representa el monto inicial de la inversión, en la siguiente fila se utilizó la formula VA que proporciona Excel, la cual permite actualizar el costo y obtener su valor en el presente o su valor actualizado =VA(tasa; número de periodos; el costo) y así se realizó con los costos siguientes; el “VPE TOTAL EGRESOS” es la suma de los costos y la inversión inicial. [14]

En la fila de total ingresos se introdujo la formula VA pero en el renglón del costo se ingresó el valor de salvamento ya que este representa el beneficio que obtendrá la empresa en el momento de la venta y la culminación de la vida útil de la maquinaria; el VPN en esta ocasión se obtiene restando el total ingresos menos el total egresos, una vez obtenido todos estos datos se procede a calcular el CAUE para el cual se utilizó la fórmula de =PAGO(la tasa; el número de periodos; vpn). Cabe destacar que se calcula de la misma forma ambas maquinarias lo que varían son los datos.

Según la aplicación de la herramienta por diferentes métodos ambos coincidiendo con los montos finales, se puede deducir que la maquina Cen-Tex 1865 no es la más adecuada para ser seleccionada pues posee resultados más elevados en referencia con la maquina Kubco, lo que significa que va a generar más gasto a la entidad.

**Tabla 22.**

*Cálculo del CAUE con ayuda de Excel*

Información	Cen-Tex 1865	Kubco	Tipo
EQUIPOS	\$ 1.345.662.500,00	\$ 768.950.000,00	EGRESOS
COSTOS DE ALISTAMIENTO	\$ 5.546.590,00	\$ 1.498.686,00	EGRESOS
COSTO DE MANTENIMIENTO	\$ 200.000,00	\$ 190.000,00	EGRESOS
COSTO DE TRANSPORTE	\$ 3.500.000,00	\$ 2.500.000,00	EGRESOS
TIO	5%	5%	TASA
CUATRIMESTRES	60	60	NPER
VF: VALOR DE SALVAMENTO	\$ 269.132.500,00	\$ 153.790.000,00	INGRESO
CAUE	CENTEX 1865	KUBCO 5800	EXCEL
VA EQUIPOS	\$ 1.345.662.500,00	\$ 768.950.000,00	IGUAL
VA COSTOS DE ALISTAMIENTO	\$ 104.993.007,99	\$ 28.369.061,20	VA
VA COSTO DE MANTENIMIENTO	\$ 3.785.857,91	\$ 3.596.565,01	VA
VA COSTO DE TRANSPORTE	\$ 66.252.513,34	\$ 47.323.223,81	VA
VPE TOTAL EGRESOS	\$ 1.520.693.879,23	\$ 848.238.850,02	SUMA
VPI TOTAL INGRESOS	\$ 14.408.149,34	\$ 8.233.228,20	VA
VPN	-\$ 1.506.285.729,88	-\$ 840.005.621,83	RESTA
CAUE	\$ 79.574.340,49	\$ 44.375.971,99	PAGO

**Nota.** Esta tabla representa todos los datos necesarios para realizar el cálculo del indicador financiero CAUE a través de Excel.

Mantener el estatus financiero de las entidades no es tarea fácil se requiere de constantes estudios y evaluaciones de mercados, considerar muchos factores económicos y estudiar los proyectos de inversión, evaluar a través de una serie de prácticas, e indicadores financieros cual es el camino que más le conviene a la empresa recorrer buscando siempre alcanzar el logro de sus objetivos.

En esta ocasión se realizó un estudio de dos indicadores importantes (VPN y CAUE) que van a facilitar información oportuna para la toma de decisiones, anteriormente se proyectó a través del valor presente neto el estudio de dos centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco, donde resaltaba que la centrifuga Kubco garantizaría más ingresos a la entidad en comparación con la Cen-Tex 1865; así mismo se procedió a calcular el costo anual equivalente, el cual nos orienta a ver cuál centrifuga de las dos presentadas va a generar más gastos, saliendo favorecida nuevamente la centrifuga Kubco.

Considerando que la centrifuga Kubco según la práctica del VPN y el CAUE generara mayores beneficios económicos y menores gastos a la empresa, sería la más idónea para invertir ya que comprende y apunta hacia el objetivo del crecimiento financiero lo cual se basa en la disminución de costos y el aumento de las ganancias, por lo tanto, se recomienda aceptar la centrifuga Kubco.

### **3.3.3 *Análisis financiero escenario operativo***

Teniendo en cuenta que el propósito de implementar centrifugas en un sistema para control de solidos en la operación de perforación de un pozo es reducir la cantidad de fluido de perforación que se descarta en la operación, con el objeto de evitar la inversión en la formulación de un nuevo lodo aprovechando el ya formulado, además de ahorrar costos en el tratamiento y disposición final del fluido de perforación; se puede evidenciar según la tabla 11 que la centrifuga Cen-Tex 1865 puede manejar una tasa de flujo de 250 GPM, mientras que la centrifuga Kubco maneja una tasa de 150 GPM, lo cual representa una diferencia de 100 GPM que se están perdiendo en el caso de usar una centrifuga Kubco, o se están ahorrando si se usa una centrifuga Cen-Tex 1865, para explicar en qué medida afecta financieramente esta pérdida o ahorro en una operación de perforación de un pozo se obtiene la siguiente tabla.

**Tabla 23**

*Costos de formulación y disposición final del fluido de perforación*

Diferencia (GPM)	Gpd	Bbl/día	Costo formulación bbl (cops)	Costo disposición bbl (cops)	Total
100	144000	3429	\$ 475.396.560	\$ 63.779.400	\$ 539.175.960

**Nota.** La tabla muestra los costos de formulación y disposición final para 3429 barriles de fluido de perforación, que representan la diferencia de 100 GPM en capacidad de flujo de las centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco.

En la tabla anterior se muestra el efecto que tiene la diferencia de procesar 100 GPM de fluido de perforación para la operación de perforación de un pozo, en cuanto al costo que implica su

formulación como su disposición final; lo anterior asumiendo que si una centrifuga ya sea Cen-Tex 1865 o Kubco opera las 24 horas del día, 100 GPM representan 3429 barriles por día (bbl/día), y además, según datos suministrados por la empresa encargada del presente proyecto de grado, formular un barril de fluido de perforación base agua de carácter inhibidor cuesta en promedio 138.640 COPS, y su disposición cuesta en promedio 18.600 COPS; pudiendo concluir entonces que la centrifuga Cen-Tex 1865 genera un ahorro diario de 539.175.960 COPS al procesar la diferencia de 100 GPM con respecto a la centrifuga Kubco, lo que representa aparte de una reducción en los costos finales para la operación de perforación de un pozo, una disminución en el lodo descartado y por tanto en el impacto ambiental que implica la disposición final del mismo, haciendo de la centrifuga Cen-Tex 1865 la mejor elección en términos de optimización del proceso de control de sólidos.

#### 4. CONCLUSIONES

La operación para la perforación del pozo A del Campo E, ubicado en la cuenca de Llanos Orientales se llevó a cabo cumpliendo los rangos de exigencia máxima para las unidades Cen-Tex 1865 y Kubco, que trabajaron a un 58.2% y 77.6% de la capacidad de flujo (GPM), a 93.3% y 81.1% de las revoluciones por minuto del Bowl (RPM), y finalmente a un 87.1% y 74% de la Fuerza G que se genera en la centrifuga respectivamente, teniendo en cuenta que cada parámetro de operación fue establecido por el ingeniero a cargo del control de sólidos durante la perforación del pozo A, en pro de reducir y eliminar la mayor cantidad de recortes posibles del fluido de perforación.

Tras la implementación de la centrifuga Cen-Tex 1865 se puede observar según sus parámetros de operación, que para un mismo instante y con la necesidad de lograr un determinado punto de corte, esta centrifuga puede procesar una mayor cantidad de fluido de perforación que la centrifuga Kubco (29,1 GPM - 20% de más), además de requerir de menor exigencia en términos de RPM del bowl (120 RPM - 4,1% menos) y fuerza g (175,4 G – 8% menos), por lo cual la centrifuga Cen-Tex 1865 tiene un mejor desempeño en términos operativos que la centrifuga Kubco.

La prueba de densidad realizada al lodo de perforación que circuló a través de las centrifugas Cen-Tex 1865 y Kubco es evidencia del óptimo funcionamiento de ambas centrifugas, dado que se presenta una reducción en su valor de 9,3 ppg reportados en la línea de succión, a 9,15 ppg tras circular en la centrifuga Cen-Tex 1865, y a 9,2 ppg tras circular en la centrifuga Kubco, lo que indica que los equipos están retirando los sólidos presentes en el lodo, y además recuperan material densificante.

En términos de eficiencia de remoción de partículas finas, no es viable usar el valor obtenido para los sólidos de baja gravedad específica (LGS) calculados tras realizar la prueba de porcentaje de sólidos y líquidos, dado que la diferencia en porcentaje para el valor obtenido en la centrifuga Cen-Tex 1865 (7,7%-73,051 lb/bbl) con respecto a la centrifuga Kubco (8%-75,861 lb/bbl) es de 0,3%, lo que no es un margen significativo para determinar dicha eficiencia.

La prueba de análisis de distribución de tamaño de partícula a diferencia de la prueba de porcentaje de sólidos y líquidos arroja un resultado que permite observar una diferencia más clara en términos de eficiencia para el funcionamiento de las unidades centrifugas, pues en contraste con el tamaño de partícula predominante en la muestra de lodo de la línea de succión (48,53 micras), tras analizar las muestras de lodo de perforación en la descarga líquida de las centrifugas, se obtuvo una reducción en el tamaño de partícula para la centrifuga Cen-Tex 1865 de un 81,4% con un valor de 9,03 micras, mientras que para la centrifuga Kubco se obtuvo una reducción de 72,2% con un valor de 13,47 micras, lo que indica una diferencia de 9,2% que se traduce en un mayor porcentaje de eficiencia para las centrifugas Cen-Tex 1865 en términos de reducción de tamaño de partícula.

El análisis financiero permite a través de los indicadores valor presente neto (VPN) y costo anual uniforme equivalente (CAUE), determinar que la centrifuga Kubco es la centrifuga que más se ciñe al objetivo de crecimiento financiero de una empresa que desea adquirir el equipo, pues se obtiene un VPN de 480.383.108,65 COPS, y un CAUE de 44.375.971,99 COPS, en contraste con la centrifuga Cen-Tex 1865 cuyo VPN es de 130.822.082,96 COPS y su CAUE de 79.574.340,5 COPS, determinando que la centrifuga Kubco genera una mayor disminución de costos con un mayor aumento en ganancias.

A nivel operativo, dado que la centrifuga Cen-Tex 1865 admite una mayor capacidad de flujo en contraste con la centrifuga Kubco, presentando una diferencia de 100 GPM de lodo de perforación procesado, se obtiene que la centrifuga Cen-Tex 1865 permite ahorrar (suponiendo que el equipo esté en funcionamiento 24 horas) un promedio 539.175.960 COPS al día en formulación de nuevo lodo de perforación y en disposición final del mismo, lo que se traduce en una reducción de lodo descartado en la operación y del impacto ambiental que genera la disposición. Haciendo que lo anterior, sumado al análisis de la eficiencia operativa según el estudio de diferentes pruebas de laboratorio, favorezca la implementación de la centrifuga Cen-Tex 1865 con respecto a la centrifuga Kubco.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Control De Solidos - Esvenca (s.f.) [En línea] <http://www.esvenca.com/es/control-de-solidos.php> [Recuperado el 27 de octubre de 2019].
- [2] Schlumberger Oilfield Glossary (s.f.) [En línea] <https://www.glossary.oilfield.slb.com/maincredits.aspx> [Recuperado el 10 de febrero de 2020].
- [3] Javierportillo100 (s.f.). *Curso De Control De Sólidos*. [En línea] <https://www.slideshare.net/javierportillo100/curso-de-control-de-slidos> [Recuperado el 10 de febrero de 2020].
- [4] García, V. "Selección de un sistema adecuado de control de sólidos de descarga para el mejoramiento del procedo de perforación de pozos horizontales en el campo San Cristóbal, Distrito San Tomé", Pregrado, Universidad Central de Venezuela, 2003.
- [5] Manual de control de solidos (s.f.). [En línea] <http://perfob.blogspot.com/2015/04/manual-de-control-de-solidos.html> [Recuperado el 14 de abril de 2015].
- [6] MI SWACO (s.f.). *Curso Control Solidos Mi Swaco*. [En línea] <https://es.slideshare.net/magnusgabrielhuertafernandez/curso-control-solidos-mi-swaco> [Recuperado el 03 de julio de 2020].
- [7] API, 1962. *Manual Fluidos De Perforación API*. Dallas, Texas: [Pdf] [Recuperado el 19 de julio de 2020].
- [8] Romai, Y., 2008. *Manual De Fluidos De Perforación*. [En línea] Disponible en: <https://es.slideshare.net/rikardocazthaneda/manual-de-fluidos-de-perforacion> [Recuperado el 19 de julio de 2020].
- [9] Barreto, N., (s.f.). *Manual De Prácticas De Fluidos De Perforación CONTROL DE SOLIDOS, CONTENIDO DE ARENA Y MBT CONTROL DE SOLIDOS, CONTENIDO DE ARENA Y MBT PRACTICA #4*. [En línea] Academia.edu. Disponible en: [https://www.academia.edu/34557977/Manual\\_de\\_pr%C3%A1cticas\\_de\\_fluidos\\_de\\_perforaci%C3%B3n\\_CONTROL\\_DE\\_SOLIDOS\\_CONTENIDO\\_DE\\_ARENA\\_Y\\_MBT\\_CONTROL\\_DE\\_SOLIDOS\\_CONTENIDO\\_DE\\_ARENA\\_Y\\_MBT\\_PRACTICA\\_4](https://www.academia.edu/34557977/Manual_de_pr%C3%A1cticas_de_fluidos_de_perforaci%C3%B3n_CONTROL_DE_SOLIDOS_CONTENIDO_DE_ARENA_Y_MBT_CONTROL_DE_SOLIDOS_CONTENIDO_DE_ARENA_Y_MBT_PRACTICA_4) [Recuperado el 9 de agosto de 2020].
- [10] García, D. y Jiménez, C., 2016. *EVALUACIÓN A NIVEL LABORATORIO DEL COMPORTAMIENTO DE CUATRO PÍLDORAS DE MATERIAL DE CONTROL DE*

*PÉRDIDA DE CIRCULACIÓN PARA YACIMIENTOS NATURALMENTE FRACTURADOS.*

Pregrado. FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA.

- [11] Fúquen, J., Ceballos, L., Marin, E., Patiño, A. and Pedraza, A., 2011. *GEOLOGÍA DE LAS PLANCHAS 98 - DURANIA Y 99 - VILLA DEL ROSARIO, NORTE DE SANTANDER - COLOMBIA.* [Pdf] Bogotá. [En línea] Disponible en: <http://recordcenter.sgc.gov.co/B13/23008010024473/documento/pdf/2105244731101000.pdf> [Recuperado el 18 de julio de 2020].
- [12] Malvern, 2020. *Guía Básica De Caracterización De Partículas.* [En línea] Malvernpanalytical.com. Disponible en: <https://www.malvernpanalytical.com/es/learn/knowledge-center/whitepapers/WP120620BasicGuidePartChar> [Recuperado el 20 de agosto de 2020].
- [13] Cadavid, H., 2018. *Matemáticas Financieras Método Fácil De Aprender.* Saxo Perú. [Recuperado el 27 de octubre de 2020].
- [14] Ramírez Díaz, J., 2011. *Evaluación Financiera De Proyectos.* 1ra ed. Bogotá: Ediciones de la U. [Recuperado el 28 de octubre de 2020].

## **ANEXOS**

**ANEXO 1.**  
**CÁLCULO DEL VPN A TRAVÉS DE EXCEL**

CENTEX 1865		KUBCO 5800
INVERSION INICIAL	\$ 1.345.662.500,00	\$ 768.950.000,00
CUATRIMESTRES	FLUJOS DE EFECTIVO	
1	\$ 78.000.000,00	\$ 66.000.000,00
2	\$ 78.000.000,00	\$ 66.000.000,00
3	\$ 78.000.000,00	\$ 66.000.000,00
4	\$ 78.000.000,00	\$ 66.000.000,00
5	\$ 78.000.000,00	\$ 66.000.000,00
6	\$ 78.000.000,00	\$ 66.000.000,00
7	\$ 78.000.000,00	\$ 66.000.000,00
8	\$ 78.000.000,00	\$ 66.000.000,00
9	\$ 78.000.000,00	\$ 66.000.000,00
10	\$ 78.000.000,00	\$ 66.000.000,00
11	\$ 78.000.000,00	\$ 66.000.000,00
12	\$ 78.000.000,00	\$ 66.000.000,00
13	\$ 78.000.000,00	\$ 66.000.000,00
14	\$ 78.000.000,00	\$ 66.000.000,00
15	\$ 78.000.000,00	\$ 66.000.000,00
16	\$ 78.000.000,00	\$ 66.000.000,00
17	\$ 78.000.000,00	\$ 66.000.000,00
18	\$ 78.000.000,00	\$ 66.000.000,00
19	\$ 78.000.000,00	\$ 66.000.000,00
20	\$ 78.000.000,00	\$ 66.000.000,00
21	\$ 78.000.000,00	\$ 66.000.000,00
22	\$ 78.000.000,00	\$ 66.000.000,00
23	\$ 78.000.000,00	\$ 66.000.000,00

Continuación Tabla 19 (Calculo del VPN a través de Excel)

24	\$	78.000.000,00	\$	66.000.000,00
25	\$	78.000.000,00	\$	66.000.000,00
26	\$	78.000.000,00	\$	66.000.000,00
27	\$	78.000.000,00	\$	66.000.000,00
28	\$	78.000.000,00	\$	66.000.000,00
29	\$	78.000.000,00	\$	66.000.000,00
30	\$	78.000.000,00	\$	66.000.000,00
31	\$	78.000.000,00	\$	66.000.000,00
32	\$	78.000.000,00	\$	66.000.000,00
33	\$	78.000.000,00	\$	66.000.000,00
34	\$	78.000.000,00	\$	66.000.000,00
35	\$	78.000.000,00	\$	66.000.000,00
36	\$	78.000.000,00	\$	66.000.000,00
37	\$	78.000.000,00	\$	66.000.000,00
38	\$	78.000.000,00	\$	66.000.000,00
39	\$	78.000.000,00	\$	66.000.000,00
40	\$	78.000.000,00	\$	66.000.000,00
41	\$	78.000.000,00	\$	66.000.000,00
42	\$	78.000.000,00	\$	66.000.000,00
43	\$	78.000.000,00	\$	66.000.000,00
44	\$	78.000.000,00	\$	66.000.000,00
45	\$	78.000.000,00	\$	66.000.000,00
46	\$	78.000.000,00	\$	66.000.000,00
47	\$	78.000.000,00	\$	66.000.000,00
48	\$	78.000.000,00	\$	66.000.000,00
49	\$	78.000.000,00	\$	66.000.000,00
50	\$	78.000.000,00	\$	66.000.000,00
51	\$	78.000.000,00	\$	66.000.000,00
52	\$	78.000.000,00	\$	66.000.000,00

*Continuación Tabla 19 (Calculo del VPN a través de Excel)*

53	\$ 78.000.000,00	\$ 66.000.000,00
54	\$ 78.000.000,00	\$ 66.000.000,00
55	\$ 78.000.000,00	\$ 66.000.000,00
56	\$ 78.000.000,00	\$ 66.000.000,00
57	\$ 78.000.000,00	\$ 66.000.000,00
58	\$ 78.000.000,00	\$ 66.000.000,00
59	\$ 78.000.000,00	\$ 66.000.000,00
60	\$ 78.000.000,00	\$ 66.000.000,00
VPN	\$ 130.822.082,96	\$ 480.383.108,65

**ANEXO 2.**  
**CARTA DE CONFIDENCIALIDAD**

Bogotá, D. C., 08 de diciembre de 2020

SEÑORES  
COMITÉ DE TRABAJOS DE GRADO  
FACULTAD DE INGENIERIAS  
PROGRAMA DE INGENIERIA DE PETROLEOS  
FUNDACION UNIVERSIDAD DE AMERICA  
CIUDAD: BOGOTA

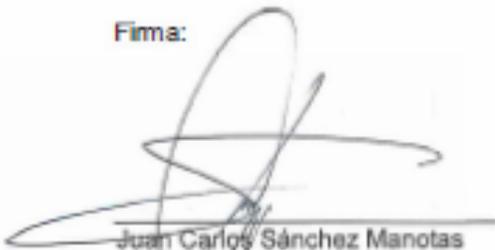
Referencia: Omisión de datos por términos de  
confidencialidad

Estimados Señores:

Por medio de la presente queremos hacer constar, que los datos que no fueron expresados en el trabajo de grado titulado "EVALUACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DE CENTRÍFUGAS DE VELOCIDAD VARIABLE DE ALTA CAPACIDAD CEN-TEX 1865 PARA EL CONTROL DE SÓLIDOS EN LA PERFORACIÓN DE UN POZO DEL CAMPO E EN LA CUENCA LLANOS ORIENTALES" en el capítulo de metodología, obedecen a las políticas de privacidad de las empresas Baker Hughes, encargada del desarrollo del fluido de perforación analizado en el proyecto, además de Chemilab S.A.S. y Malvern Instruments Ltd. encargados del desarrollo de la prueba de análisis de distribución de tamaño de partícula; motivo por el cual los estudiantes Juan David Ayala Pinzon y Camilo Andrés Gutiérrez García autores del trabajo de grado, en conjunto con Holsan S.A.S. encontramos estrategias para complementar la información requerida sin comprometer el correcto desarrollo del mencionado proyecto.

Atentamente,

Firma:



Juan Carlos Sánchez Manotas  
Gerente de Operaciones

Representante Legal, Holsan S.A.S.



[holsan@holsan.co](mailto:holsan@holsan.co) [www.holsan.co](http://www.holsan.co)  
Carrera 22A No. 151-81 PBX: (571) 6261622  
Bogotá, D.C. Colombia

### **ANEXO 3.**

#### **RECOMENDACIONES**

Para analizar correctamente cuanto fluido de perforación es descartado en una operación de perforación, se recomienda evaluar el funcionamiento de las centrifugas Cen-Tex 1865 en un pozo diferente al que se estén trabajando las centrifugas Kubco, buscando manejar tanto parámetros de operación como un fluido de perforación similares en ambos pozos, con la finalidad de hacer significativo el contraste entre los equipos.

Poner en funcionamiento en un mayor número de campañas de perforación las centrifugas Cen-Tex 1865, buscando realizar la evaluación de los parámetros de funcionamiento del equipo indicados en el presente trabajo de grado en diferentes formaciones geológicas, a fin de contrastar con datos históricos de campañas de perforación en las que se utilizaron las centrifugas Kubco el rendimiento de ambos equipos para lograr un determinado punto de corte, y de esta manera determinar si es constante un mayor rendimiento por parte de la centrifuga Cen-Tex 1865.

Para enriquecer el análisis financiero se sugiere tener en cuenta añadir el consumo energético que se genera al utilizar una centrifuga Cen-Tex 1865 o Kubco en una campaña de perforación, con la finalidad no solo de ver el impacto de este ítem dentro de la consolidación de costos cuatrimestrales para cada equipo, sino también determinar el impacto a nivel ambiental del mismo.