



UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO
VICERRECTORADO ACADÉMICO
ESTUDIOS DE POSTGRADO
ÁREAS DE CIENCIAS ECONÓMICAS Y SOCIALES
POSTGRADO EN GERENCIA DE PROYECTOS

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE SISTEMAS EXPERIMENTALES PARA LA
EVALUACIÓN DE MÉTODOS DE CONTROL DE ARENA USADOS EN FONDO
DE POZO**

Presentado por:

Pineda, José Antonio

Para optar al título de:
Especialista en Gerencia de Proyectos

Asesor:
González Rincón, Julio Alfonso

Caracas, julio de 2018

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO
VICERRECTORADO ACADÉMICO
ESTUDIOS DE POSTGRADO
ÁREAS DE CIENCIAS ECONÓMICAS Y SOCIALES
POSTGRADO EN GERENCIA DE PROYECTOS

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE SISTEMAS EXPERIMENTALES PARA LA
EVALUACIÓN DE MÉTODOS DE CONTROL DE ARENA USADOS EN FONDO
DE POZO**

Presentado por:

Pineda, José Antonio

Para optar al título de:
Especialista en Gerencia de Proyectos

Asesor:

González Rincón, Julio Alfonso

Caracas, julio de 2018

CARTA DE ACEPTACIÓN DEL ASESOR

Dirección del Programa Gerencia de Proyectos

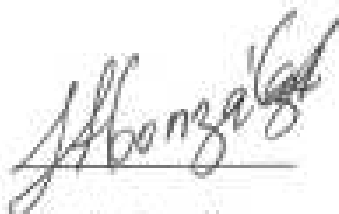
Estudios de Postgrado

Universidad Católica Andrés Bello

Presente.-

Por medio de la presente, hago constar que he leído el Trabajo Especial de Grado, presentado por José Antonio Pineda; como requisito para optar al grado de "Especialista en Gerencia de Proyectos", cuyo título es **"DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE SISTEMAS EXPERIMENTALES PARA LA EVALUACIÓN DE MÉTODOS DE CONTROL DE ARENA USADOS EN FONDO DE POZO"**; y manifiesto que cumple con los requisitos exigidos por la Dirección General de los Estudios de Postgrado de la Universidad Católica Andrés Bello; y que, por lo tanto, lo considero apto para ser evaluado por el jurado que se decida designar a tal fin.

En la ciudad de Caracas, a los 25 días del mes de julio de 2018.



Julio González

C.I.: 12.418.105

Los Teques, 25 de Julio de 2018

CONSTANCIA DE ACEPTACIÓN

Por medio de la presente hacemos constar que el estudiante, **PINEDA, JOSÉ ANTONIO**, portador (a) de la Cédula de Identidad N° **15.584.386**, ingresó como **TESISTA** en la **GERENCIA DE CONSTRUCCIÓN DE POZOS** de esta institución, en el lapso comprendido entre el **25/01/2018** al **25/07/2018**, bajo la tutoría empresarial de **JULIO GONZÁLEZ**.

Para cualquier información adicional, favor comunicarse con la Gerencia Funcional de Recursos Humanos, teléfono (0212) 330.72.99.

Constancia que se expide en la ciudad de Los Teques, a los 25 días del mes de julio de 2018.

Atentamente,


Pedro Sánchez
Gerente

Gerencia Funcional de Recursos Humanos



LISTA DE ACRONIMOS Y SIGLAS

CIED	Centro Internacional de Educación y Desarrollo
CIV	Colegio de Ingenieros de Venezuela
EDT	Estructura Desagregada de Trabajo
FPO	Faja Petrolífera del Orinoco
INTEVEP	Instituto Tecnológico Venezolano del Petróleo
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IVIC	Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas
LOCTI	Ley Orgánica de Ciencia, Tecnología e Información
PDVSA	Petróleos de Venezuela, Sociedad Anónima
PMBOK	<i>Project Management Body of Knowledge</i>
PMI	<i>Project Management Institute</i>



UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO
VICERRECTORADO ACADÉMICO
ESTUDIOS DE POSTGRADO
ÁREAS DE CIENCIAS ECONÓMICAS Y SOCIALES
POSTGRADO EN GERENCIA DE PROYECTOS

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE SISTEMAS EXPERIMENTALES PARA LA
EVALUACIÓN DE MÉTODOS DE CONTROL DE ARENA USADOS EN FONDO DE
POZO

Autor: Pineda, José Antonio
Asesor: González Rincón, Julio Alfonso
Año: 2018

RESUMEN

Actualmente, los pozos productores de crudo de las diferentes áreas operacionales de PDVSA presentan problemas de producción de arena masiva, trayendo como consecuencia que, tanto los pozos como las líneas de producción queden parcial o completamente obstruidos con relleno de arena, conllevando a altos costos de rehabilitación y mantenimiento. Esta problemática ha llevado a que las diferentes áreas operacionales procuren mitigar y controlar la producción de arena en fondo de pozo mediante la aplicación de diversas tecnologías existentes en el mercado. El empleo de diseños de rejillas sofisticados y empaques de grava han mejorado el proceso de exclusión de arena, sumando vida productiva a los pozos. Como respuesta a estos requerimientos en el área de control de arena, PDVSA Intevep ha propuesto el diseño de sistemas experimentales, orientados a la evaluación y determinación del comportamiento de las diferentes alternativas mecánicas de control de arena, durante la vida productiva de los pozos, para así poder realizar, de una forma más precisa y efectiva su selección y diseño, estableciéndose de esta manera los esquemas óptimos de completación de los yacimientos. En el presente Trabajo Especial de Grado donde se llevó a cabo una investigación aplicada, con un diseño mixto (investigación de campo y documental), se recopiló toda la información necesaria, a partir de la propia experiencia en el área operacional y las fuentes bibliográficas disponibles, que permitió realizar la formulación de un proyecto de diseño y construcción de sistemas experimentales para la evaluación de métodos de control de arena en los laboratorios de PDVSA Intevep. Con esta investigación se logró garantizar el éxito del proyecto, por medio de la aplicación de las mejores prácticas del *Project Management Institute* (PMI), que conllevó a la determinación de las estrategias a seguir y la elaboración de un plan de ejecución del proyecto, brindando de esta manera, como valor agregado, mejoras a la metodología de gestión de proyectos que emplea PDVSA Intevep hoy en día.

Palabras Clave: Control de arena, sistemas experimentales, proyectos, formulación de proyectos, diseño de estrategias, plan de ejecución

Línea de Trabajo: Formulación y evaluación de proyectos

INDICE GENERAL

CARTA DE ACEPTACIÓN DEL ASESOR	iii
CARTA DE AUTORIZACIÓN DE LA EMPRESA	iv
LISTA DE ACRONIMOS Y SIGLAS	v
RESUMEN	vi
INDICE GENERAL	vii
INDICE DE FIGURAS	xii
INDICE DE TABLAS	xiv
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I: EL PROBLEMA	5
1.1. Planteamiento del Problema	5
1.1.1. Formulación del Problema.....	10
1.1.2. Sistemización del Problema	10
1.2. Objetivos	10
1.2.1. Objetivo General.....	10
1.2.2. Objetivos Específicos	10
1.3. Justificación de la Investigación	11
1.4. Alcance y Delimitaciones de la Investigación.....	12
CAPÍTULO II: MARCO TEORICO	14
2.1. Antecedentes	14
2.2. Fundamentos Teóricos	18
2.2.1. Producción de arena en pozos de hidrocarburos	18
2.2.2. Factores que influyen la producción de arena	22

2.2.3. Mecanismos de producción de arena.....	33
2.2.4. Métodos de control de arena para pozos de hidrocarburo	35
2.2.5. Selección y dimensionamiento de los métodos de control	41
2.2.6. Evaluaciones de desempeño de los métodos de control de arena	43
2.2.7. Definición de proyecto	45
2.2.8. Formulación de proyectos	45
2.2.9. Gerencia de proyectos	46
2.2.10. Gerencia de proyectos como factor competitivo	46
2.2.11. Alineación estratégica de la gerencia de proyectos	48
2.2.12. Procesos de la gerencia de proyectos	49
2.2.13. Gestión del alcance del proyecto	50
2.2.14. Gestión del tiempo del proyecto.....	51
2.2.15. Gestión de costos del proyecto.....	52
2.2.16. Gestión de los riesgos del proyecto	52
2.3. Bases Legales	53
2.4. Definición de Términos	54
CAPITULO III: MARCO METODOLOGICO.....	56
3.1. Tipo de Investigación	56
3.2. Diseño de la Investigación	57
3.3. Unidad de Análisis	58
3.4. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	59
3.4.1. Análisis documental.....	59
3.4.2. Juicio de expertos.....	60
3.4.3. Observación estructurada	61
3.4.4. Entrevistas no estructuradas	62

3.5.	Fases de la Investigación.....	62
3.5.1.	Fase 1: Diagnóstico y diseño de estrategia.....	63
3.5.2.	Fase 2: Formulación de la propuesta	64
3.6.	Operacionalización de los Objetivos	65
3.7.	Estructura Desagregada de Trabajo	67
3.8.	Aspectos Éticos.....	67
3.9.	Cronograma	68
3.10.	Recursos	68
CAPITULO IV: MARCO ORGANIZACIONAL.....		70
4.1.	Reseña histórica	70
4.2.	Misión.....	72
4.3.	Visión	72
4.4.	Valores.....	72
4.4.1.	Respeto por la gente:	72
4.4.2.	Apego a principios éticos y morales:	73
4.4.3.	Justicia y equidad:	73
4.4.4.	Innovación:	73
4.4.5.	Conciencia del deber social y solidaridad:.....	74
4.5.	Objetivos	74
4.6.	Productos y servicios	75
4.7.	Estructura de la organización (Organigrama)	77
CAPITULO V: DESARROLLO DE LOS OBJETIVOS		78
5.1.	Objetivo 1: Determinar las bases y criterios a considerar en el diseño de los sistemas experimentales para la evaluación de métodos de control de arena.	78

5.2.	Establecer la estrategia a seguir para diseñar y construir los sistemas experimentales para la evaluación de métodos de control de arena en el Laboratorio de Mecánica de Perforación	90
5.3.	Diseñar los planes subsidiarios que conformen el plan de ejecución del proyecto en estudio.....	96
5.3.1.	Plan de Gestión del Alcance	96
5.3.2.	Plan de Gestión de Costos.....	100
5.3.3.	Plan de Gestión de Riesgos	108
5.3.4.	Plan de Gestión del Tiempo	113
5.3.5.	Plan de Gestión de Adquisiciones.....	114
5.4.	Estructurar el plan detallado de ejecución del diseño y construcción de los sistemas experimentales para la evaluación de métodos de control de arena.	121
5.4.1.	Inteligencia Tecnológica	121
5.4.2.	Diseño y construcción de sistema <i>Sand Pack Test</i>	121
5.4.3.	Diseño de sistema <i>Slurry Test</i>	123
5.4.4.	Procura de materiales para <i>Slurry Test</i>	123
5.4.5.	Construcción de sistema <i>Slurry Test</i>	124
5.4.6.	Implantación de sistemas experimentales en laboratorio	124
CAPITULO VI: LA PROPUESTA.....		126
6.1.	Descripción de la propuesta.....	126
6.2.	Patrocinador del Proyecto / Gerencia Contratante.....	126
6.3.	Objetivos y propósitos del proyecto	126
6.4.	Alineación estratégica	127
6.5.	Entregables del proyecto	128
6.6.	Estrategias consideradas.....	128
6.7.	Recomendaciones	129
6.8.	Lista de riesgos mayores	130

6.9.	Resumen del presupuesto	130
CAPITULO VII: EVALUACIÓN DEL PROYECTO		131
7.1.	Cumplimiento de los objetivos	131
7.2.	Lecciones aprendidas	133
CAPITULO VIII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		137
8.1.	Conclusiones	137
8.2.	Recomendaciones	139
9	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	142

INDICE DE FIGURAS

Figura N°	Pág.
Figura 1. Componentes de esfuerzos en la roca.....	24
Figura 2. Esfuerzos horizontales generados por la sobrecarga	25
Figura 3. Esfuerzos principales Vs. esfuerzos alrededor del hoyo	28
Figura 4. Tubería ranurada con patrón de ranuras en zigzag	36
Figura 5. Rejilla de alambre embobinado	36
Figura 6. Rejilla de malla metálica.....	37
Figura 7. Rejilla de fibra metálica comprimida.....	38
Figura 8. Rejilla expandible	38
Figura 9. Rejilla preempacada.....	39
Figura 10. Rejilla con grava a hoyo abierto y a hoyo entubado.....	40
Figura 11. Frac and Pack	40
Figura 12. Esquema de ensayo del tipo “ <i>Slurry Test</i> ”	44
Figura 13. Esquema de ensayo del tipo “ <i>Sand Pack Test</i> ”	45
Figura 14. Estructura desagregada de trabajo (EDT/WBS) de la investigación	67
Figura 15. Cronograma de actividades de la investigación	68
Figura 16. Organigrama general de PDVSA Intevep.....	77
Figura 17. Diagrama propuesto del sistema de evaluación de medios filtrantes mecánicos de completación de pozos para control de arena tipo <i>Sand Pack Test</i> 80	
Figura 18. Diagrama propuesto del sistema de evaluación de medios filtrantes mecánicos de completación de pozos para control de arena tipo <i>Slurry Test</i>	86
Figura 19. Estructura desagregada de trabajo (EDT) propuesta para el proyecto	99
Figura 20. Presupuesto del Proyecto, Parte 1.....	102

Figura 21. Presupuesto del Proyecto, Parte 2.....	103
Figura 22. Visualización de hoja de control presupuestario del proyecto.....	106
Figura 23. Matriz de análisis cuantitativo de riesgos del proyecto.....	108
Figura 24. Plan Detallado de Ejecución del Proyecto.....	125

INDICE DE TABLAS

Tabla N°	Pág.
Tabla 1. Criterio de Tiffin	42
Tabla 2. Matriz de operacionalización de objetivos	65
Tabla 3. Matriz de recursos de la investigación.....	69
Tabla 4. Efecto del tipo de fluido de trabajo en la producción de arena obtenida de las pruebas tipo <i>Sand Pack Test</i>	81
Tabla 5. Fluidos a utilizar en las pruebas del tipo <i>Sand Pack Test</i>	82
Tabla 6. Ventajas y desventajas de los fluidos usados para la formación de la lechada de arena.....	87
Tabla 7. Matriz multicriterio usada para definir estrategia a seguir en el diseño y construcción de los sistemas experimentales	94
Tabla 8. Matriz de riesgos del proyecto.....	110
Tabla 9. Matriz de adquisiciones del proyecto.....	115
Tabla 10. Tabla de evaluación del proyecto	136

INTRODUCCIÓN

La producción de arena de los pozos ha sido siempre un área de especial atención dentro de la industria petrolera a nivel mundial. Este fenómeno es capaz de generar daños en las tuberías en fondo, en los equipos de superficie, en las líneas de transporte de fluidos y en otras instalaciones, pudiendo causar fallas irreparables en el pozo además de perjuicio al personal y al medio ambiente. Entre las causas fundamentales del problema de producción de arena, se destaca el poco grado de consolidación de los yacimientos o formaciones productoras de hidrocarburos, siempre presentes en los campos petroleros de todo el país.

A través de los años, se ha procurado mitigar y controlar la producción de arena mediante la aplicación de diversas tecnologías adaptadas a las características tanto del pozo como del yacimiento, las cuales forman parte de la completación de fondo del activo. Dichas características condicionan la labor del personal de operaciones, quien tiene la responsabilidad de garantizar la integridad del pozo y la máxima productividad del yacimiento sin ocasionar un impacto significativo en los costos asociados al proceso. Diseños de rejillas sofisticados y empaques de grava han mejorado el proceso de exclusión de arena, sumando vida productiva a los pozos.

En la actualidad, el desarrollo de la Faja Petrolífera del Orinoco (FPO) representa uno de los principales retos para la industria petrolera nacional, al estar caracterizada por la presencia de yacimientos de crudo pesado y extrapesado de arenas no consolidadas, lo cual conlleva a problemas de producción de arena masiva en sus pozos. Esto trae como consecuencia que tanto los pozos como las líneas de producción queden parcial o completamente obstruidos con relleno de arena, incidiendo en forma negativa en la productividad del campo y además representa costos adicionales debido a la necesidad de reparar los daños mecánicos generados en la completación de los pozos, bombas, equipos y tuberías de superficie.

Para dar respuesta a las solicitudes realizadas por las áreas operacionales de PDVSA en materia de control de arena, y principalmente las necesidades del área estratégica de la FPO, PDVSA Intevep, a través de su Laboratorio de Mecánica de Perforación, ha iniciado el desarrollo de actividades de investigación, orientadas a la evaluación y determinación del comportamiento de las diferentes alternativas mecánicas de control de arena, para poder ejecutar de una forma más precisa y efectiva la selección y uso de estos métodos mecánicos usados en fondo de pozo. Esto se hace en el marco de una metodología para estudios de control de arena que ha sido desarrollada por PDVSA Intevep, la cual busca establecer los esquemas óptimos de completación de los yacimientos, lo cual se traduce en un mejor aprovechamiento de los recursos y disminución de costos asociados a reparaciones de pozos.

La evaluación de los métodos de control de arena usados en fondo de pozo, consisten de arreglos o sistemas experimentales a escala de laboratorio, donde se emplean muestras de arena de formación y diversos medios filtrantes con el objeto de determinar la cantidad de sólidos que son retenidos por estos últimos, a fin de determinar cual tendrá mejor desempeño en la completación del pozo. De esta manera, se establecen criterios específicos para la selección y dimensionamiento del método de control de arena mas adecuado para un yacimiento determinado, representando así una potencial solución a los problemas de producción de arena en los campos de la FPO, donde la metodología de PDVSA Intevep está limitada por el pobre grado de consolidación de sus yacimientos.

En el presente trabajo de investigación se ha logrado sentar las bases para el diseño y construcción de sistemas experimentales para la evaluación de métodos de control de arena en el Laboratorio de Mecánica de Perforación de PDVSA Intevep, que sirvan de soporte tecnológico para atender a los requerimientos de las diferentes áreas operacionales de PDVSA en materia de control de la producción de arena en sus pozos. Para garantizar el éxito del proyecto se realizó una formulación del mismo atendiendo a las mejores prácticas y metodologías del *Project Management Institute* (PMI), donde se destaca entre otros aspectos, la

importancia de establecer un plan de ejecución del proyecto que garantice el logro de los objetivos y metas trazados.

La estructura de este Trabajo Especial de Grado consta de ocho capítulos, los cuales se describen a continuación:

Capítulo I. El Problema de investigación. Describe los sucesos que llevaron a la necesidad de contar con sistemas experimentales para la evaluación de métodos de control de arena en los laboratorios de PDVSA Intevep. El capítulo incluye: planteamiento del problema, objetivos, justificación y alcance de la investigación.

Capítulo II. Marco teórico. Se establecen las referencias conceptuales y teóricas que permiten la entidad u objeto que se investiga. Se desarrollan los siguientes aspectos: antecedentes de la investigación, fundamentos teóricos y definición de los términos relacionados directamente con la formulación de la propuesta de diseño y construcción de los sistemas experimentales.

Capítulo III. Marco metodológico. Se exponen los aspectos relacionados con la metodología de trabajo seguida en el desarrollo de la investigación, especificándose elementos como: tipo y diseño de la investigación, unidad de análisis, técnicas e instrumentos de recolección de información, además de la Estructura Desagregada de Trabajo (EDT) y el cronograma propuesto, entre otros.

Capítulo IV. Marco organizacional. Se identifica el escenario del objeto de investigación, a fin de ubicarse en el ambiente del mismo, describiéndose los principales aspectos organizacionales que conforman la estructura actual de PDVSA Intevep.

Capítulo V. Desarrollo de los objetivos. Se presentan los resultados del trabajo de investigación sobre los objetivos específicos trazados como solución al problema planteado. Es así como este capítulo se compone de las siguientes partes que sustentan la propuesta: a) la determinación de las bases y criterios de diseño de los sistemas experimentales, b) diseño de la estrategia a seguir para su diseño y

construcción, c) los planes subsidiarios que integran el plan de ejecución del proyecto, d) plan detallado de ejecución del proyecto.

Capítulo VI. La propuesta. Con base en los resultados del capítulo V se presenta el diseño de la propuesta para la incorporación de sistemas experimentales de vanguardia en el Laboratorio de Mecánica de Perforación y se expone un marco preliminar orientado a la mejora de la metodología para estudios de control de arena existente actualmente en PDVSA Intevep.

Capítulo VII. Evaluación del proyecto. Se analiza el grado en el que se cumplieron cada uno de los objetivos trazados en el trabajo de investigación y se exponen las lecciones aprendidas durante el desarrollo del mismo.

Capítulo VIII. Conclusiones y recomendaciones. Se presentan las conclusiones a las que se llegaron, con base a los objetivos logrados, y el conjunto de recomendaciones para la implantación de la propuesta.

Para finalizar, se listan todas las referencias bibliográficas que soportan el desarrollo del Proyecto de Trabajo Especial de Grado que se presenta.

CAPITULO I: EL PROBLEMA

En este capítulo se presenta la información fundamental que da origen al proyecto propuesto, haciendo una descripción detallada de la problemática presentada, con la debida formulación mediante preguntas clave, así como plasmando una visión de lo que se considera hay que hacer para darle respuesta a esas preguntas. También se presentan la justificación del proyecto y su alcance, tomando en cuenta las limitaciones que puedan afectar su ejecución.

1.1. Planteamiento del Problema

Durante la vida productiva de un pozo es posible encontrarse con una gran cantidad de problemas que pueden afectar la producción de hidrocarburos, generar fallas mecánicas en el mismo o en las instalaciones que se encuentran en superficie. Dentro de estos problemas se encuentra la producción de arena, la cual puede tener gran impacto en la productividad de los pozos por fallas prematuras de los equipos de levantamiento artificial, taponamiento, entre otros. Este fenómeno depende de varios factores, tales como el grado de cementación de los granos de la arena productora así como la calidad de dicha cementación, la reducción de la presión de poro y la viscosidad de los fluidos del yacimiento. Asimismo, dicha producción se encuentra determinada por el tipo de completación utilizada, su orientación (vertical u horizontal) y la profundidad a la que esté el mismo.

La producción de arena es uno de los problemas más antiguos de los campos petroleros en Venezuela, ya que una gran parte de ellos pertenecen a yacimientos de arenas no consolidadas o medianamente consolidadas. El arenamiento de los pozos tiene consecuencias de gran magnitud para PDVSA, tales como restricciones severas en los niveles de producción, el aumento de los costos de mantenimiento tanto de superficie como de subsuelo y hasta la pérdida de los pozos. Esto ha llevado a que PDVSA tenga que asumir estrategias de explotación y producción de las reservas de hidrocarburos venezolanas que garanticen una productividad eficiente y óptima, para así satisfacer la demanda energética nacional y las exportaciones a nivel internacional.

En general, existen dos métodos de control de arena para pozos de hidrocarburos (Tovar, 2006): el primero, es un método de control activo, que implica la aplicación o instalación directa de una técnica de control de arena en el yacimiento garantizando el control de grandes cantidades de arenas producidas en forma operacionalmente segura, pero afectando en forma negativa la productividad del pozo. El segundo método es un control pasivo, que permite el manejo de una cantidad tolerable de producción de arena, lo cual es beneficioso para la productividad de los pozos pero que requiere un monitoreo continuo y minucioso del campo y una buena planificación desde el punto de vista de selección de reductores en cabezales de pozo, limpiezas periódicas en fondo de pozo, diseño efectivo de cañoneos, dimensionamiento apropiado de las facilidades de superficie y mantenimiento de la presión del yacimiento.

Muchos métodos han sido aplicados en Venezuela con la finalidad de minimizar la producción de arena. Entre ellos se encuentran:

- El empaque con grava, que consiste en colocar grava en el anular ó entre la pared del hoyo y la tubería.
- La tubería ranurada. Su uso es uno de los más antiguos y esta limitado por el área de flujo.
- Las rejillas. Representan una opción más efectiva en la completación de los pozos debido tanto a su diversidad en el mercado como al hecho de que los medios filtrantes varían de acuerdo con su capacidad de retención.

Frente al incremento de los requerimientos de control de arena en las áreas operacionales de la corporación, PDVSA Intevep ha desarrollado estudios orientados a la selección del esquema óptimo de completación para los yacimientos con problemas de arenamiento. Producto de este trabajo, PDVSA Intevep ha desarrollado e implementado una metodología integral para evaluar y diseñar pozos con problemas de arenamiento, la cual abarca diferentes disciplinas de conocimiento y las nuevas tecnologías disponibles en el mercado (Somogyi y colaboradores, 2010).

Como resultado de esta metodología se obtiene un abanico de opciones para la completación de los pozos, orientadas a optimizar la producción de arena y la productividad del pozo. Estas completaciones toman en cuenta aspectos tales como: el diseño optimizado del método de control de arena, la identificación de problemas de caída de producción y recomendaciones para la selección de fluidos y tamaño de sólidos, entre otros.

Una de las fases importantes de esta metodología integral desarrollada por PDVSA Intevep es el desarrollo de un modelo geomecánico del yacimiento, que permita determinar, principalmente, la resistencia mecánica de la roca. De esta manera, la metodología puede aplicarse en su totalidad en aquellos campos con yacimientos de arenas consolidadas o medianamente consolidadas, pero no así en los yacimientos de arenas no consolidadas, en los cuales, hasta ahora, no ha sido posible construir un modelo geomecánico confiable.

Actualmente, cerca de 300 pozos productores de crudo pesado y extrapesado de la Faja Petrolífera del Orinoco (FPO), caracterizados por contar con yacimientos de arenas no consolidadas, presentan problemas de producción de arena masiva. Diferentes empresas mixtas conformadas en la FPO habían conseguido realizar una efectiva gestión de la producción de arena, minimizando el impacto a la producción y dejando de ser un problema relevante, por medio de estrictos y arduos procedimientos de monitoreo y muestreo, además del uso de filtros mecánicos convencionales. Sin embargo, recientemente los requerimientos de producción diarios han aumentado y muchos de los procedimientos sugeridos para controlar la producción de arena se han descuidado; por otra parte se han perforado una gran cantidad de pozos nuevos en yacimientos, cuyos tamaños de grano de arena son mas finos, logrando pasar a través de los filtros mecánicos. Como consecuencia, tanto los pozos como las líneas de producción quedan parcial o completamente obstruidos con relleno de arena, traduciéndose esto en inconvenientes para alcanzar los objetivos diarios de producción e incidiendo en forma negativa en la productividad de los campos.

Dado que la metodología integral para estudios de control de arena no puede ser aplicada en su totalidad para los yacimientos de arenas no consolidadas como los encontrados en la FPO, y como respuesta a las solicitudes realizadas por diversas empresas mixtas de esas áreas operacionales estratégicas de PDVSA en materia de control de arena, PDVSA Intevep ha iniciado el desarrollo de actividades de investigación (Rivero y colaboradores, 2013), orientadas a la evaluación y determinación del comportamiento de las diferentes alternativas mecánicas de control de arena (tales como rejillas, tuberías ranuradas o empaques con grava), durante la vida productiva de los pozos. De esta manera, se pretende mejorar la metodología ya implementada y ejecutar de una forma más precisa y efectiva la selección y uso de estos métodos mecánicos para control de arena, sobre todo para los yacimientos de arenas no consolidadas de la FPO, estableciéndose de esta manera los esquemas óptimos de completación de los pozos, que permitan el cumplimiento de las metas de productividad de la corporación.

En la actualidad, existen dentro del sector de tecnología para el control de arena, una gran cantidad de rejillas disponibles para ser usadas en completación de pozos como medio de retención de los granos de arena, todas con diferentes características de desempeño y aplicación. Sin embargo, las constantes y grandes fallas que se han presentado en las mismas han llevado a algunas operadoras, compañías de servicio y laboratorios independientes a desarrollar ensayos adicionales y verificaciones de control de calidad, para optimizar el proceso de diseño, garantizar su integridad mecánica y lograr un ciclo de vida completo en el pozo.

En general, existen dos tipos de configuraciones para los sistemas experimentales para evaluación de medios filtrantes para control de arena en fondo de pozo (Ballard, 2006), uno es conocido como lechada de arena o *Slurry Test* y el otro es denominado prueba de empaque de arena o *Sand Pack Test*, los cuales han sido el resultado de investigaciones basadas en el desarrollo de mejores métodos de evaluación de medios filtrantes. Ambos sistemas de pruebas comprenden el manejo de cierta cantidad de partículas sólidas, las cuales serán suministradas por

la mezcla formada por arena y un fluido de trabajo, así como también debe poseer las características que satisfagan las condiciones requeridas para el manejo de altos caudales de fluidos y el bombeo continuo de los mismos.

Son variadas las metodologías propuestas para realizar estos ensayos y la industria aún no se ha puesto de acuerdo para la elaboración de una norma que estandarice un procedimiento, a través del cual se puedan evaluar efectivamente las rejillas y tuberías ranuradas, independientemente de la variedad y complejidad en su construcción. Por otra parte, es necesario destacar que PDVSA Intevep no dispone de equipos para evaluar y validar la eficiencia de las rejillas y de las tuberías ranuradas ofrecidas por las diferentes compañías de servicios en el país, lo cual complementaría y mejoraría la metodología integral para estudios de control de arena implementada.

Con base en intercambios técnicos sostenidos con compañías de servicios y la experiencia del área operacional, que permitió determinar los parámetros y variables que influyen en los ensayos, en el Laboratorio de Mecánica de Perforación de PDVSA Intevep se propone el diseño y construcción de sistemas experimentales para la evaluación de medios filtrantes usados en fondo de pozo, bajo las dos configuraciones planteadas anteriormente. Los diseños deben ser realizados de tal forma que se aproveche al máximo los recursos disponibles en los laboratorios de la empresa, se realice un fácil ensamblaje de las partes y se garantice la reproducibilidad de los ensayos.

Se requiere pues de la formulación de este proyecto en el Laboratorio de Mecánica de Perforación de PDVSA Intevep, usando todos los conocimientos y herramientas de gerencia de proyectos recomendados por el Project Management Institute (PMI) a través del PMBOK (2017), que garanticen una ejecución eficiente y un consecuente éxito del mismo.

1.1.1. Formulación del Problema

¿Cuáles serían los requisitos y planes necesarios para lograr diseños detallados de los sistemas experimentales para la evaluación de métodos de control de arena usados en fondo de pozo, a construir en el Laboratorio de Mecánica de Perforación de PDVSA Intevep?

1.1.2. Sistemización del Problema

- ¿Cuáles bases o premisas deberían ser consideradas para el diseño de los sistemas experimentales?
- ¿Qué estrategias deberían considerarse para llevar a cabo el diseño y construcción de estos sistemas experimentales en el Laboratorio?
- ¿Cuáles serían los planes subsidiarios que conformarían el plan de ejecución del proyecto en estudio?
- ¿Cuál sería el plan detallado de ejecución del diseño y construcción de los sistemas experimentales para la evaluación de métodos de control de arena?

1.2. Objetivos

Para responder a las preguntas arriba planteadas se deben alcanzar los objetivos que se presentan a continuación:

1.2.1. Objetivo General

Formular un proyecto para diseñar y construir sistemas experimentales que permitan evaluar la eficiencia de retención de las diferentes alternativas mecánicas de completación de pozos para control de arena (tales como: tuberías ranuradas, rejillas o empaques con grava) en el Laboratorio de Mecánica de Perforación de PDVSA Intevep.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Determinar las bases y criterios a considerar en el diseño de los sistemas experimentales para la evaluación de métodos de control de arena.

- Establecer la estrategia a seguir para diseñar y construir los sistemas experimentales para la evaluación de métodos de control de arena en el Laboratorio de Mecánica de Perforación.
- Diseñar los planes subsidiarios que conformen el plan de ejecución del proyecto en estudio.
- Estructurar el plan detallado de ejecución del diseño y construcción de los sistemas experimentales para la evaluación de métodos de control de arena.

1.3. Justificación de la Investigación

El incremento de las actividades de explotación de yacimientos no consolidados en la FPO ha generado el incremento de producción diferida asociada a problemas de arenamiento de pozos. Junto con la validación y optimización del diseño de control de arena para la completación de pozos, el desarrollo de pruebas experimentales de medios filtrantes, así como la definición de estrategias operacionales para el manejo de arena en superficie, buscan integrar las variables más importantes del fenómeno para reducir costos y tiempos no productivos asociados a la rehabilitación de pozos, disminución de producción diferida y mayor productividad de pozos.

En base a información de mesas de trabajo, año 2013, se contaba con 281 pozos arenados en diferentes campos de la FPO, lo cual representa una producción diferida de 54218 BNPD. Este proyecto busca establecer diseños de completación óptimos que permitan mejorar la productividad y evitar el arenamiento de los pozos, en los nuevos desarrollos de la FPO, donde se estima perforar 10500 pozos en el lapso 2013-2019, de acuerdo con el Plan Siembra Petrolera.

De esta manera, con esta investigación se espera dar respuesta a las solicitudes hechas por el personal de las áreas operacionales de PDVSA, con lo relacionado a la selección de la más adecuada alternativa mecánica de control de arena, específicamente con las rejillas, tuberías ranuradas o empaques con grava. Adicionalmente, la formulación de este proyecto les permitirá a los profesionales

de investigación de PDVSA Intevep, el desarrollo de sistemas experimentales que conllevarán a la generación de criterios propios de selección y dimensionamiento de medios filtrantes, ajustados a las condiciones particulares de nuestros yacimientos, así como a la generación de datos estadísticos que junto a pruebas de campo, permitirá profundizar en los estudios de desempeño de los medios filtrantes en fondo de pozo y su impacto en la productividad.

1.4. Alcance y Delimitaciones de la Investigación

El presente trabajo contempla la formulación de un proyecto orientado al diseño y construcción de sistemas experimentales que permitan evaluar la eficiencia de retención de las diferentes alternativas mecánicas de completación de pozos para control de arena, en el Laboratorio de Mecánica de Perforación de PDVSA Intevep. Basándose en intercambios técnicos con las diferentes compañías de servicio proveedoras de rejillas y tuberías ranuradas, además de la experiencia en el área operacional, se visualizarán los requerimientos y planes necesarios para materializar estos sistemas experimentales en el Laboratorio.

Es de suma importancia que el proyecto a formular considere los siguientes aspectos relacionados con la ingeniería de diseño de las pruebas de laboratorio:

- Se diseñarán dos sistemas experimentales para evaluar el desempeño de las alternativas mecánicas para completación de pozos. El primero será del tipo *Sand Pack Test*, para simular las condiciones de yacimientos o formaciones consolidadas y medianamente consolidadas. El segundo será del tipo *Slurry Test*, para simular las condiciones de yacimientos o formaciones no consolidadas.
- Los sistemas experimentales diseñados deben satisfacer las condiciones de limitaciones de espacio y facilidades de servicios, así como los requisitos de seguridad, higiene y ambiente para su instalación en el Laboratorio de Mecánica de Perforación de PDVSA Intevep.

- El plan de ejecución del proyecto debe contemplar el diseño de dos celdas para los ensayos de control de arena, una para cada uno de los sistemas experimentales propuestos y los procesos de diseño constarán de diferentes etapas para definir: geometría, espesores de pared, sellos hidráulicos, conexiones, roscas e instrumentación requerida en los sistemas, entre otros aspectos determinantes, para la configuración y ejecución satisfactoria de los ensayos.

CAPÍTULO II: MARCO TEORICO

En este capítulo se presenta el resultado de la selección de los aspectos teóricos más relacionados con el tema específico elegido para estudio. El desarrollo de este capítulo permitirá el análisis de los hechos conocidos, así como orientar la búsqueda de cualquier dato relevante para orientar el sentido de la investigación. El marco teórico que se presenta a continuación describe los antecedentes, fundamentos teóricos, bases legales y definición de términos relacionados con la investigación.

2.1. Antecedentes

Monzón (2006) en su Trabajo Especial de Grado titulado: Formulación de un ambiente de pruebas de aplicaciones informáticas para una entidad financiera, para optar al Título de Especialista en Gerencia de Proyectos, realiza una propuesta para el diseño de un ambiente de pruebas de aplicaciones informáticas en el Banco Mercantil. Siguiendo los fundamentos del *Project Management Institute* en esta formulación de proyecto se establecieron los requerimientos de *software* y *hardware* necesarios para el nuevo ambiente de pruebas, requerimientos de calidad, costos y riesgos, así como el plan de implantación propuesto para ser llevado a cabo como una fase futura. Este trabajo de investigación servirá de referencia en lo relacionado a la metodología empleada para formular un proyecto orientado a brindar herramientas y sistemas que mejoren un proceso ya establecido en una determinada organización, siendo de particular interés la secuencia de tareas que permiten el desarrollo de la idea y la creación del perfil del proyecto.

Palabras clave: formulación, proyecto, requerimientos, costos, riesgos, plan.

Meza (2008) en su Tesis Doctoral titulada: *Sand on Demand: An approach to improving productivity in horizontal wells under heavy oil primary production*, para optar al título de Doctor en Ingeniería de Petróleo, presenta una propuesta de manejar una producción de arena controlada para pozos horizontales de crudo

pesado. Se investigaron los efectos del tamaño de ranura, esfuerzo de confinamiento, velocidad del fluido y ordenamiento de los granos de arena sobre la producción de arena en los pozos. Los resultados indicaron que la selección del tamaño de ranura es crítico para establecer esta propuesta de “arena a demanda” y que los gradientes de presión requeridos para mantener una producción de arena continua son mayores para arenas pobremente ordenadas.

La formulación de la propuesta realizada por Meza Díaz está basada en los resultados obtenidos a partir de un sistema experimental del tipo *Sand Pack Test*, lo cual coincide con la visión que se tiene en PDVSA Intevep de complementar la metodología integral ya implementada con estas pruebas de medios filtrantes, que permitan optimizar los diseños de completación de pozos, sobre todo para los yacimientos de arenas no consolidadas de la FPO. El enfoque sería buscar la máxima productividad de los pozos, permitiendo un manejo de una determinada cantidad de arena en superficie, estimada con el apoyo constante de las pruebas de laboratorio para evaluar el desempeño de los medios filtrantes usados. La formulación de esta propuesta representa el principal aporte a la presente investigación.

Palabras clave: *sand production, horizontal wells, heavy oil, slot size, sand pack, experimental procedure*

En el artículo: *Succesfull installation of Stand Alone Screen in more than 200 wells – The importance of screen selection process and fluid qualification*, de la revista *SPE Drilling and Completion*, Mathisen, Aasveit, Alteras (2007) describen la experiencia de la compañía *Hydro Oil and Energy*, aplicando una estrategia para garantizar un efectivo control de arena y alta productividad a través de la vida del pozo. En el artículo se muestra como se han utilizado en forma exitosa las completaciones del tipo *Stan Alone Screen* como técnica de control de arena para aproximadamente 230 completaciones de pozos, basándose en la metodología presentada. Para muchos de estos pozos, el criterio de selección establecido y publicado en la literatura, recomendaba una técnica de control de arena diferente a la finalmente usada, como por ejemplo un empaque de grava. De esta manera,

según la experiencia de campo de la compañía *Hydro Oil and Energy*, las practicas comunes para la selección de métodos de control de arena aplicadas por la industria en la actualidad, podrían ser muy conservadoras. Esto representa un aporte relevante para esta investigación, puesto que se resalta la importancia y el impacto de incorporar ensayos de evaluación de medios filtrantes en la metodología para diseñar las completaciones de pozos *Stand Alone Screen*, al permitir validar que los tamaños de apertura de ranura seleccionados en función de los criterios ya establecidos por la industria, son los que efectivamente aplican para el control de arena efectivo en un yacimiento específico con determinadas características.

Palabras clave: *sand control, well completions, methodology, screen, testing.*

En el artículo: *A review of screen selection for Stan Alone applications and a new methodology*, de la revista *SPE Drilling and Completion*, Champura, Hodge, Andrews, Toffanin, Moen, Parlar (2011) realizan una revisión a profundidad de los diferentes procedimientos de ensayos de laboratorio usados por la industria y la interpretación realizada para evaluar el desempeño de las rejillas y su selección para aplicaciones *Stand Alone Screen*. En el artículo se muestra que el taponamiento severo de una rejilla con arena limpia de formación casi nunca es un problema y que la probabilidad de taponamiento de la rejilla debido a otros factores puede ser minimizado cuando se toman las precauciones adecuadas. Sobre la base de aproximadamente 185 pruebas de laboratorio realizadas en varios tipos de rejillas de alambre embobinado (calibre de 6 a 16) y rejillas *Premium* (60 a 600 micrones) para arenas no consolidadas y usando un conjunto de criterios de retención de arena, se concluye que la mayoría de los criterios comúnmente usados en la industria para la selección entre empaque de grava y *Stand Alone Screen* son muy conservadoras, y limitan excesivamente la posible aplicación de esta ultima. Este artículo principalmente viene a representar el Estado del Arte de la presente investigación, al ofrecer un compendio de los avances que la industria ha tenido en cuanto al diseño de sistemas experimentales para la evaluación de medios filtrantes usados en fondo de pozo, y en definitiva

proponer un nuevo ensayo y metodología de interpretación para sistemas del tipo *Slurry Test*, que elimina ambigüedades asociadas a las prácticas actuales que han sido propuestas.

Palabras clave: *screen testing, methodology, slurry test, stand alone screen, sand control.*

En el artículo: *New sand retention test setup exhibits no plugging tendencies with various screen types using nonuniform test sand*, incluido en la revista del Congreso SPE Internacional de Control de Daño a la Formación, Larsen, Fjellstad, Mathisen, Andrews, Joranson, Aas (2012) proponen un nuevo sistema experimental para evaluaciones de rejillas usadas en fondo de pozo, que no presenta tendencias de taponeo o bloqueo para diferentes diseños de rejillas, cuando se usan arenas de ensayo no uniformes con un alto contenido de material fino. Este trabajo soporta la revisión histórica hecha por otros autores sobre los diferentes procedimientos de ensayos de laboratorio propuestos en la industria y confirma que la interpretación del desempeño de las rejillas realizadas a partir de estos sistemas experimentales, es con frecuencia incorrecta. El nuevo sistema experimental propuesto permite evaluar las rejillas bajo condiciones más realistas. La revisión de este artículo aporta detalles importantes de diseño y construcción para el sistema experimental del tipo *Slurry Test*, que se propone instalar en el Laboratorio de Mecánica de Perforación. Además se presentan datos y resultados de pruebas realizadas con una amplia variedad de muestras de arena y rejillas, que pueden servir para realizar la validación de la metodología experimental a desarrollar por PDVSA INTEVEP.

Palabras clave: *test setup, slurry test, screen performance, screen plugging, permeability.*

En el artículo: *Protocols for slotted liner design for optimum SAGD operation*, en la revista del Congreso Internacional Canadiense de Petróleo, Bennion, Gupta, Gittins, Hollies (2008), describen un protocolo de ensayo de laboratorio detallado, el cual desarrollado exitosamente a través de varios años, para el diseño y

evaluación de la geometría de ranura de las tuberías ranuradas usadas para pozos de producción de crudo pesado en Canadá. Se describe el procedimiento experimental usado y se cuantifican algunos de los principales mecanismos descubiertos que llevan al taponeo o bloqueo de las ranuras. Como resultado relevante, se encontró que en adición al tamaño de grano de la arena y geometría de ranura evaluada, el contenido de arcilla de la arena, velocidad de flujo, tipo de fase humectante y pH juegan un papel importante en el taponeo de las tuberías ranuradas. Esto representa un aporte relevante para esta investigación, puesto que las áreas operacionales que serán mas beneficiadas con los resultados de los sistemas experimentales a construir en el Laboratorio de Mecánica de Perforación, son aquellas pertenecientes a la FPO, donde predominan yacimientos de arenas no consolidadas y crudo pesado, como las evaluadas en el protocolo canadiense. Además, se ofrecen detalles importantes de diseño y construcción para el sistema experimental del tipo *Sand Pack Test*.

Palabras clave: *slotted liner, protocol, sand pack test, heavy oil, unconsolidated sand*.

2.2. Fundamentos Teóricos

2.2.1. Producción de arena en pozos de hidrocarburos

La producción de arena constituye un problema grave en muchos pozos de hidrocarburos de todo el mundo. En yacimiento de arenas no consolidadas la producción de arena, puede dañar los equipos de fondo de pozo; los equipos submarinos y las instalaciones de superficie, aumentando el riesgo de fallas irreversibles; e implica para los productores, un alto costo de decena de millones en dinero por año. Los operadores han adoptado un enfoque multidisciplinario para el control de la producción de arena debido a su complejidad.

De acuerdo con Veeken (1991), el fenómeno de producción de arena se caracteriza por la presencia de pequeñas partículas de roca (denominado arena), generalmente de dimensiones y angularidad definida y constante, disuelto en los fluidos producidos (gas, petróleo o agua) y que puede alejarse en las cercanías o

en el pozo mismo; es característico en pozos completados en formaciones no-consolidadas. Sin embargo, ha sido observado en pozos completados en formaciones consolidadas. Las causas que lo originan pueden ser múltiples. Tiene lugar cuando la resistencia y las condiciones locales de esfuerzo de la roca se ven directamente afectados por las operaciones de producción o por la diversas practicas de completación empleadas, lo cual origina condiciones de inestabilidad en la matriz de la formación y por ende el arenamiento.

Adicionalmente, Nicholson (1998) explica que el fenómeno de producción de arena tiene su origen cuando los esfuerzos desestabilizadores (esfuerzos de arrastre y gradiente de presión) son mayores que la resistencia mecánica de la formación. Cuando estos esfuerzos son mayores que la resistencia ocurre una inestabilidad causando desprendimiento del material de la formación. Este desprendimiento puede ser en forma de granos individuales de arena que se producen continuamente o pedazos enteros de la formación. Este desprendimiento de partículas no ocurre todo súbitamente, sino que va aumentando hasta llegar a cantidades catastróficas de arena, por lo que se deben identificar los pozos que estén produciendo poca cantidad de arena para tomar medidas especiales, ya que una vez que estos llegan a tasas críticas no hay manera de detener la producción de la misma.

Por otra parte, de acuerdo con Vásquez (2001), basándose en la cantidad de arena producida, se pueden identificar tres grados de severidad del problema de producción de arena entre los cuales destacan los siguientes casos:

- Cuando la producción de arena es baja; causando desgaste del equipo que tiene que ser reemplazado, a veces también es necesario disminuir la producción para que no ocurra dicho fenómeno y por lo tanto crea un potencial de producción diferido.
- Cuando la producción es moderada; adicionalmente al impacto técnico y económico también ocurre taponamiento en tuberías que causan el cierre del

pozo, lo cual implica un mayor impacto económico por los gastos adicionales de rehabilitación y la pérdida total de producción del mismo.

- Cuando la producción de arena es muy alta (mayor gravedad); ya que ocurren todos los problemas técnicos y económicos anteriormente descritos, y adicionalmente la gran cantidad de arena producida deja cavernas enormes alrededor del revestidor y que podrían colapsarlo perdiéndose por completo el pozo. Un pozo con problema de arenamiento que no se le preste la atención necesaria, irá progresando por estos tres casos y su condición ira empeorando con el tiempo; se debe evitar a todo costo llegar a este último.

La producción de arena puede ocurrir de una manera continua o intermitente, dependiendo de las condiciones particulares del pozo y la formación. Esta diferenciación solo puede lograrse con instrumentación muy especializada donde se haga un seguimiento continuo con sensores especializados que midan cuantitativamente la producción de arena. Este seguimiento resulta bastante costoso y complicado por lo que en la mayoría de los casos se trabaja con mediciones de sólidos producidos (expresado en libras por 1000 barriles) y manifestaciones externas tales como desgaste de equipo, limpieza de recipientes, etc.

A partir de las manifestaciones externas del fenómeno de producción de arena, Nicholson (1998) explica que se pueden distinguir 4 etapas en la vida de un pozo productor de arena:

- Durante la etapa 1. Producción de arena sin detección. El pozo produce arena sin existencia de manifestaciones externas. Para la detección del problema en los pozos durante esta primera etapa se requiere de mediciones de sólidos y en algunos casos mediciones continuas con sensores especializados. Esta etapa no tiene un costo asociado por corrección, pero constituye la etapa inicial de un pozo potencialmente problemático y desde un punto de vista preventivo representa la etapa donde se deben tomar las medidas iniciales.

- Durante la etapa 2. Desgaste de los equipos. Empieza a notarse desgaste de los equipos de producción, especialmente estranguladores, válvulas y codos en contacto con los fluidos producidos, a quienes la acción abrasiva de la arena en el crudo causa desgaste de las paredes. Esta etapa puede tener un costo asociado bastante alto debido a que generalmente es necesario reemplazar o reparar equipo dañado. Algunas veces es necesario cerrar el pozo para cambiar equipos desgastados lo que causa un potencial diferido. En algunos casos extremos las fallas de los equipos pueden causar problemas con las válvulas de seguridad, creándose situaciones potencialmente peligrosas.
- Durante la etapa 3. Taponamiento de las líneas de producción. La producción de arena es todavía mayor y se empieza a taponar la tubería de producción del pozo, y en muchos casos, los equipos y las líneas de producción en superficie. Este taponamiento puede ser gradual o a veces súbito, creándose un puente o un tapón de arena. En algunos casos este taponamiento viene asociado con contaminantes como parafinas, asfáltenos, escamas, etc., que actúan como agentes cementantes entre los granos de arena, facilitando entonces la formación de tapones de arena. Con el taponamiento de la tubería y/o líneas de producción siempre viene asociado un potencial diferido, por encontrarse el pozo cerrado. Adicionalmente a esta pérdida de ingresos está el costo de reparación del pozo, ya que se necesita limpiarlo por medio de trabajos de guaya, *snubbing* o tubería continua.
- Durante la Etapa 4. Colapso del revestidor. Con muy alta producción de arena, la cantidad de arena producida acumulada alcanza proporciones graves, y en formaciones de arenas consolidadas la arena producida deja cavidades en la formación. Esta arena proviene de los orificios cañoneados los cuales aumentan de tamaño. Este aumento de tamaño de las cavidades puede ser tan grande, que cavidades de los orificios cañoneados adyacentes empiezan a unirse creando una mayor cavidad detrás del revestidor. Si esta cavidad continua creciendo entonces el revestidor puede quedar sin soporte lateral lo

que pudiera causar falla por pandeo (*buckling*) y colapso del mismo. Esta etapa constituye la última y la más grave en la vida de un pozo con serios problemas de producción de arena.

2.2.2. Factores que influyen la producción de arena

Con el propósito de identificar y comprender los factores del yacimiento que se encuentran involucrados en la producción de arena de pozos de hidrocarburos, es necesario comprender que el fenómeno físico sucede en dos etapas: falla mecánica de la roca y transporte del material fallado hacia el pozo, con sus correspondientes consecuencias en el pozo y la infraestructura de superficie.

La roca falla mecánicamente en la cercanía de la cara del pozo a causa de los cambios en la redistribución de los esfuerzos a medida que se perfora el hoyo o se lleva a cabo la producción. Es necesario destacar que la fractura o falla mecánica no necesariamente significa la producción inmediata de arena, tal como lo señala Nouri (2003), el material fallado se producirá solo si las fuerzas que mantienen los granos unidos post falla, consistentes de fricción y cohesión capilar, son más pequeñas que las fuerzas de arrastre inducidas por la producción.

En la propuesta de Nouri (2003), para modelar la producción de arena, se puede observar la existencia de diferentes factores involucrados en el fenómeno de falla de la roca, siendo estos fundamentalmente de carácter geomecánico. En general, la forma como estos factores se relacionan determinará el tipo o mecanismo de falla resultante.

Relación de Poisson (ν)

Esta propiedad define la deformación relativa en una dirección no sometida al incremento del esfuerzo con la ortogonal a la dirección del incremento del esfuerzo. El valor de esta propiedad adimensional normalmente se encuentra entre 0 y 0,5. De acuerdo con Zoback (2006), un material con una relación de Poisson de 0,5 es un material incompresible.

Resultados experimentales muestran que la relación de Poisson en una roca depende de la litología, esfuerzo de confinamiento, presión de poro y porosidad. Por lo general, la relación de Poisson tiene un valor de alrededor de 0,2 para areniscas, 0,3 para carbonatos y mas grande que 0,3 para lutitas.

Módulo de Young (E)

Esta propiedad describe la capacidad de deformación de la roca, o la rigidez de un material cuando esta se encuentra bajo esfuerzos. Mientras mayor es el módulo de Young, mas difícil se hace deformar el material, es decir, se requiere de mayor esfuerzo.

Cohesión:

Se refiere a la resistencia tangencial total entre partículas cuando no existe un esfuerzo normal aplicado sobre la roca, es decir, aún si el esfuerzo normal se anula, todavía puede medirse una cierta resistencia al deslizamiento tangencial. Según explica Acock (2004), la cohesión depende del grado de cementación existente entre los granos de la roca, el cual es la fuente de de la fuerza que mantiene unidos los granos. De esta manera, las rocas sedimentarias consolidadas bien cementadas tienden a ser más resistentes, mientras que las rocas no consolidadas, pobremente cementadas, son más débiles.

Ángulo de Fricción Interna:

Esta propiedad define la fuerza de fricción intergranular de la roca, la cual siempre es tangencial a la superficie en los puntos de contacto entre los granos. El ángulo de fricción viene dado por la relación entre las resistencias al corte y compresivas del material y es determinado a través de ensayos triaxiales que se realizan con núcleos de una misma profundidad, a varias presiones de confinamiento. Hudson (1997) explica muy bien este concepto y establece que el ángulo de fricción es afectado por la fracción volumétrica de partículas duras presentes en la roca (habitualmente granos de cuarzo o feldespato).

Esfuerzos Efectivos:

Los esfuerzos efectivos ejercidos sobre la formación se refieren a la combinación de los esfuerzos terrestres principales que actúan sobre la roca, afectados por el amortiguamiento que ofrece la presión de poro. Los esfuerzos tectónicos existen en cualquier parte a una determinada profundidad en la tierra, y sus magnitudes dependen de la profundidad, presión de poro y procesos geológicos activos que actúan en una variedad de escalas temporales y espaciales.

Los esfuerzos son, por lo general, diferentes en cada dirección, dado que sus fuentes de origen pueden ser distintas, sin embargo, tal como se explica en la Guía de Aplicación de la Geomecánica de PEMEX (2006), haciendo las suposiciones adecuadas, en los estudios geomecánicos se deben definir solo cuatro parámetros para determinar el estado de esfuerzo principal a una profundidad: el esfuerzo vertical o sobrecarga (S_v), el esfuerzo horizontal máximo (S_{Hmax}), el esfuerzo horizontal mínimo (S_{Hmin}) y la orientación de estos esfuerzos. Ver Figura 1.

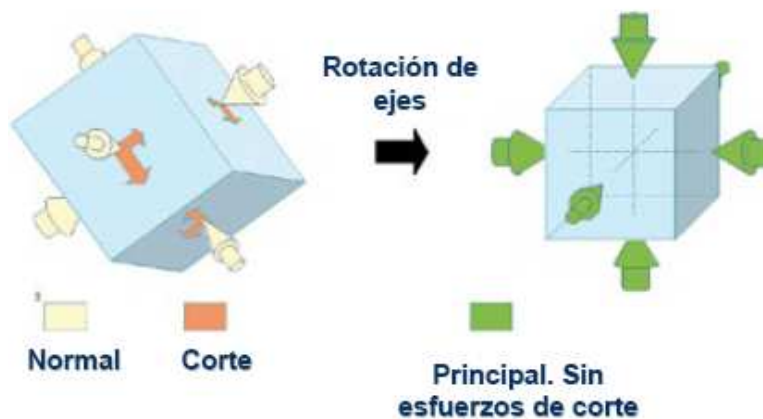


Figura 1. Componentes de esfuerzos en la roca

Esfuerzo vertical o sobrecarga

Se define como la presión ejercida por el peso total de las formaciones sobrepuestas por arriba de un punto de interés. La presión de sobrecarga se

calcula a partir de la integración de la densidad de la matriz rocosa y de los fluidos presentes en los espacios porosos.

La sobrecarga es una función de los siguientes parámetros: densidad total de las rocas o densidad volumétrica, porosidad, fluidos congénitos y columna de agua o tirante de agua. En condiciones donde no exista tirante de agua, la sobrecarga solo depende de la densidad volumétrica de la roca. En campos costa afuera debe incluirse la densidad de la capa de agua.

Esfuerzo horizontal máximo y mínimo

Los esfuerzos horizontales se generan principalmente por el efecto de la sobrecarga, la relación de Poisson y el movimiento de la roca vecina. Como se puede observar en la Figura 2, la sobrecarga empuja a la roca hacia fuera en ambos planos horizontales pero las fuerzas reactivas de la roca adyacente impiden el movimiento lateral e inducen esfuerzos horizontales.

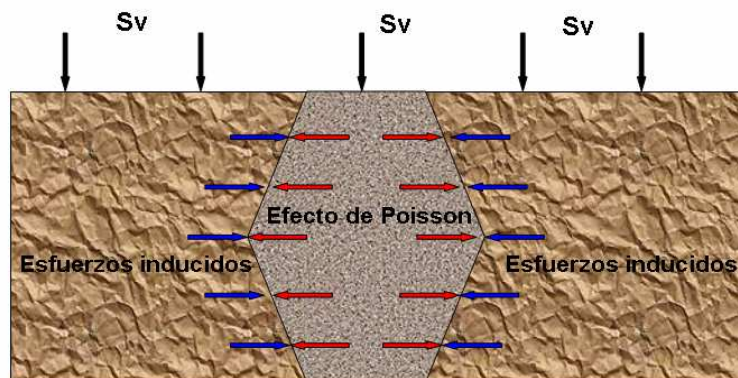


Figura 2. Esfuerzos horizontales generados por la sobrecarga

En las áreas tectónicas relajadas, las fuerzas horizontales son idénticas y el estado de los esfuerzos es isotrópico. Cuando la tectónica del área local origina las diferencias en los esfuerzos horizontales, el esfuerzo de mayor magnitud se define como el esfuerzo horizontal máximo (SH_{max}), y el de menor magnitud como el esfuerzo horizontal mínimo (SH_{min}). Tales estados de esfuerzos se denominan anisotrópicos (Risnes, 1992).

Es necesario destacar que, además del efecto de la sobrecarga, existen otros factores que influyen en la magnitud de los esfuerzos horizontales, tales como: erosión, tectónica, anisotropía de la roca y discontinuidades en los estratos terrestres.

A diferencia de la sobrecarga, la determinación de la magnitud de los esfuerzos horizontales es más difícil. La mayoría de los métodos de medición directa para obtener el esfuerzo horizontal mínimo están relacionados con la generación de fracturas en la zona cercana del hoyo, tales como minifrac (pruebas que se hacen antes de un trabajo de fracturamiento hidráulico) y pruebas de *leak off* (pruebas realizadas durante la etapa de perforación). En el caso del esfuerzo horizontal máximo, no existen mediciones directas para determinarlo y normalmente se estima haciendo uso de correlaciones que asumen un comportamiento elástico lineal de la roca.

Existen diferentes métodos para verificar la dirección de los esfuerzos horizontales, siendo uno de ellos el estudio de la geología estructural, la cual estudia ambientes tectónicos y conjunto de fallas. Igualmente, los mecanismos focales, utilizados en sismología para el estudio de movimientos tectónicos, son útiles para visualizar las tendencias y direcciones del tensor de esfuerzos a menor escala (Zoback, 2006).

En los estudios geomecánicos empleados para modelar la falla mecánica de la roca, es importante determinar la actividad tectónica del área o campo, la cual puede ser interpretada a través de los regímenes de esfuerzos que resultan de la relación existente entre los tres esfuerzos principales, ya sea normal, inverso o transcurrente.

Presión de poro

La presión de poro o presión de formación es la presión a la cual se encuentran confinados los fluidos dentro del espacio poroso de la formación. La presión de poro soporta parte de los esfuerzos totales aplicados al sistema, disminuyendo la carga efectiva sobre la roca.

La presión de poro se desarrollará en una formación saturada en la medida que los sedimentos o estratos son depositados sobre esta. Si el fluido de los poros puede salir y migrar a la superficie a la misma tasa que la compactación, entonces se logra mantener un gradiente de presión normal, dado por el peso de la columna de fluido. Sin embargo, en algunos casos se pueden presentar zonas con presiones de poro más altas que las dadas por el gradiente normal, producto de diferentes eventos geológicos sucedidos en el tiempo, como, por ejemplo, un desequilibrio en la compactación cuando el aporte de sedimentos es muy rápido.

En el caso específico de mecánica de rocas, las formaciones tienen porosidad y permeabilidad, por lo tanto la teoría de elasticidad para sólidos no es capaz de describir completamente el comportamiento de materiales porosos, introduciéndose entonces el concepto de poroelasticidad y de esfuerzos efectivos, donde se considera que la carga resultado de los esfuerzos horizontales y verticales en el subsuelo se comparte entre la matriz de la roca y los fluidos presentes en los poros de la misma. Esta distribución de cargas se define como el principio de Terzaghi y Peck.

Esfuerzos introducidos por la perforación

La perforación de un pozo crea una perturbación en el subsuelo ya que el soporte de la roca es removido, alterando los esfuerzos principales, los cuales se redistribuyen y se concentran alrededor del pozo en tres esfuerzos: radial actuando a lo largo del radio del pozo (S_r), tangencial actuando alrededor de la circunferencia del hoyo (S_t) y axial actuando paralelo a la trayectoria del pozo (S_a), como se puede ver en la Figura 3. La relación entre los esfuerzos principales a los cuales está sometida la roca y los esfuerzos alrededor del hoyo es fundamental para un análisis de geomecánica y, matemáticamente, puede llegar a ser bastante compleja en función de la trayectoria del pozo y el modelo constitutivo de la roca empleado.

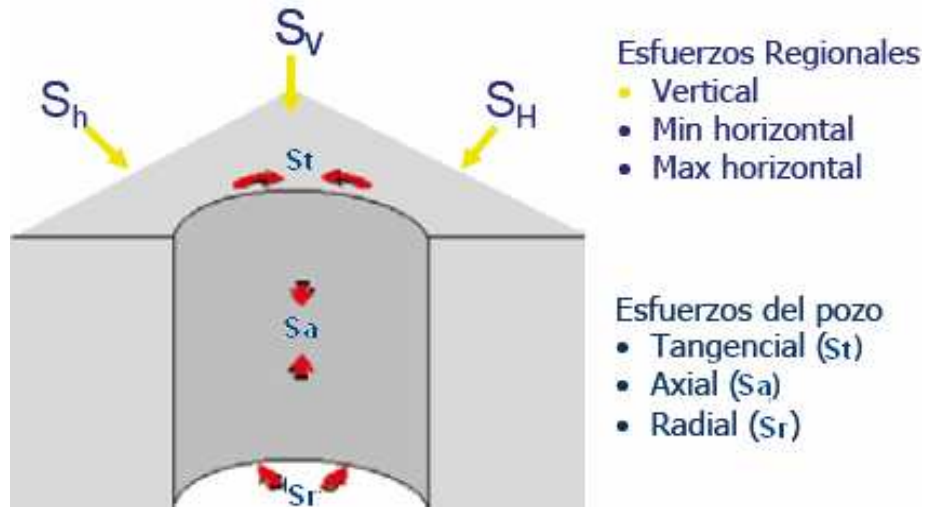


Figura 3. Esfuerzos principales Vs. esfuerzos alrededor del hoyo

La magnitud de los esfuerzos alrededor del pozo, están controladas por la densidad del fluido en su interior, los esfuerzos principales del campo y la trayectoria (azimut y desviación) del pozo, razón por la cual estos esfuerzos controlan la estabilidad del agujero y la efectividad de la perforación.

Las concentraciones de esfuerzo alrededor del pozo pueden llegar a ser grandes cuando la presión en el interior del pozo difiere de la presión de la formación, pudiendo llegar a exceder el criterio de falla de la roca. Las consecuencias de presentarse una falla mecánica de la roca alrededor del pozo son normalmente deformaciones del mismo, no siendo necesariamente dramáticas desde el punto de vista operacional, pero si conllevando a una posible producción de arena en el tiempo.

Tipo de roca

Basándose en los estudios realizados por Nicholson (1998), no todas las areniscas tienden a producir granos de arena bajo condiciones de esfuerzo. Las pruebas han demostrado que incluso las areniscas débiles, según lo determinado por las pruebas de compresión uniaxiales y las pruebas triaxiales confinadas, pueden tener comportamientos muy variables en lo que respecta a producción de arena, que están relacionados fundamentalmente con el tipo de roca.

Los experimentos desarrollados por Nicholson (1998) involucraron la simulación de una perforación u hoyo abierto en una muestra de roca cilíndrica, a través del cual se establecía el flujo de un fluido o gas, registrándose y observándose la deformación del hoyo y el inicio de la producción de arena.

Los diferentes tipos de rocas evaluadas poseían diferencias marcadas en cuanto a: mineralogía, tamaño de grano, planos de estratificación, densidad y porosidad. Las rocas débiles se caracterizaron por tener una muy pobre cementación entre los granos y alta porosidad.

De acuerdo con los resultados experimentales se observaron diferencias significativas para los diferentes tipos de roca: las rocas más débiles mostraron una tendencia a compactarse, mientras que las rocas más fuertes mostraron una respuesta más frágil y quebradiza con la formación de ovalización o *breakouts*.

Aún cuando las rocas evaluadas pueden ser consideradas como débiles en términos de la mecánica de rocas convencional, estas mostraron muy diferentes deformaciones y comportamiento de producción de arena. Este comportamiento, así como el tamaño y orientación de los *breakouts* resultantes pueden estar relacionados a la presencia de defectos, especialmente fracturas. Además, la orientación de los *breakouts* en las muestras tendió a seguir el buzamiento de los planos de estratificación.

Esfuerzos introducidos durante la producción del pozo

Muchos episodios en la historia de una roca yacimiento pueden modificar su resistencia, conduciendo finalmente al inicio de la producción de arena. Cuando se perfora, termina y estimula un yacimiento se aplican esfuerzos adicionales sobre la matriz de roca. Además, la resistencia de la roca puede reducirse por episodios de producción, tales como los tratamientos de estimulación con ácido, la compactación del yacimiento o los aumentos de la saturación de agua.

En formaciones no consolidadas, la producción de arena se puede presentar durante la primera etapa de producción del pozo debido al arrastre de los fluidos o

la turbulencia del gas, que desprenden los granos y los transportan hasta el pozo. El efecto se puede incrementar con más altas viscosidades del fluido y caudales del pozo, así como altas caídas de presión.

Cuando las rocas son mejores cementadas, la producción de arena se puede presentar debido a incidentes durante la vida productiva del pozo, por ejemplo, fluctuaciones en la tasa de producción, irrupción del agua de producción, cambios en la relación gas/líquido y el agotamiento de la presión de yacimiento.

Las fluctuaciones en la tasa de producción afectan la estabilidad de los túneles de cañoneo y en algunos casos impiden la creación y mantenimiento de los arcos de arena. Un arco es un arreglo hemisférico de granos de arena interconectados que es estable a un caudal y caída de presión constante. El cierre de los pozos o los cambios en la tasa de producción puede resultar en el colapso de los arcos, causando que la arena sea producida hasta que nuevos arcos se formen.

Tal como explica Risnes (1992), como un ejemplo de los problemas a ser considerados en estudios de producción de arena, un pozo puede ser cerrado un determinado número de veces durante su vida productiva, para labores de mantenimiento. Esto induce cargas cíclicas en la formación, las cuales tienden a reducir su resistencia. Normalmente, se observa un incremento en la producción de arena cuando un pozo es puesto en producción luego de ser cerrado. Esto hace pensar en la necesidad de diseñar procedimientos que induzcan cargas tan bajas como sea posible tanto en las operaciones de cierre como de arranque. El establecimiento de estos procedimientos resultan de bastante importancia en un enfoque de gerencia o manejo integrado de producción de arena, sobretodo para los pozos completados en la FPO, sin embargo, Risnes (1992) no ofrece mayor detalle o estudios de casos en este sentido.

A través de la vida productiva del pozo, se pueden presentar problemas operacionales que inducen daños a la formación, haciendo necesaria la ejecución de tratamientos de estimulación, siendo la acidificación y el fracturamiento los más conocidos. Ambos tratamientos requieren de un riguroso diseño que involucra un

conocimiento profundo de las características del yacimiento y la integridad mecánica del pozo.

Un diseño pobre de los tratamientos de acidificación puede conllevar al inicio de la producción de arena, bajo las siguientes situaciones: pérdida de la consolidación de la roca de formación causada por la excesiva disolución de los materiales cementantes por los ácidos, disolución de la grava o apuntalante hasta cierto límite en pozos empacados con grava o fracturados hidráulicamente y cambios en la mojabilidad del yacimiento que afectan las condiciones de flujo desde el yacimiento hacia el pozo.

Similarmente, un pobre diseño de una operación de fracturamiento hidráulico puede afectar la integridad mecánica del pozo permitiendo la comunicación con formaciones no consolidadas con alto potencial para producir arena o la irrupción de agua y gas no deseados que puedan desagregar más fácilmente los granos de arena. La determinación precisa de las direcciones de los esfuerzos es crucial para el correcto despliegue de los sistemas de cañoneo previo a la ejecución del fraturamiento. Para un régimen normal de esfuerzos, el cañoneo realizado en la dirección del esfuerzo máximo hace más eficaz el fracturamiento hidráulico porque reduce los efectos de tortuosidad durante el bombeo y por lo tanto la caída de presión necesaria para la producción del pozo. Por último, el diseño del fracturamiento debe evitar el contraflujo del apuntalante, así como contemplar el uso del tamaño óptimo del mismo para maximizar la permeabilidad de la fractura y reducir la producción de arena asociada con velocidades de fluido elevadas y puenteo inestable de los granos de la formación.

Otro factor de la vida productiva de los pozos que influye en la producción de arena, sobretodo en rocas débiles y no consolidadas, es el influjo de agua que reduce la presión capilar entre los granos. Tal como lo refleja Han (2002), la resistencia de la roca generalmente disminuye al aumentar la saturación de agua, registrándose la mayor reducción de la resistencia aún luego de producirse aumentos leves de la saturación de agua a partir de un estado seco.

Han (2002) logra hacer un compendio de muchos experimentos que se han llevado a cabo para obtener una mejor comprensión del efecto de la saturación de agua en la producción de arena, por medio del estudio de los consecuentes cambios en la resistencia y propiedades elásticas de areniscas y lutitas

Para finalizar, la producción de petróleo o gas de un yacimiento a una determinada profundidad, causará la declinación de la presión de los fluidos. La reducción en la presión de poro causará que la roca yacimiento se hunda en si misma y se compacte. La mayoría de los yacimientos experimentará solo un pequeño grado de compactación.

El grado de compactación, por supuesto dependerá en primer lugar de las propiedades mecánicas del yacimiento y la declinación de la presión. Los problemas asociados con la compactación del yacimiento son el colapso de revestidor y la producción de arena. Generalmente, ambos efectos se presentan en forma simultánea. De acuerdo con Risnes (1998), estadísticamente el colapso de revestidor en pozos inclinados se puede presentar muy cerca del tope del yacimiento, mientras que en el resto de los pozos el colapso es observado a través de los intervalos de alta productividad y es asociado frecuentemente con la alta producción de arena.

El colapso del revestidor en el tope del yacimiento es causado por el movimiento de los estratos por encima del yacimiento compactado. Como el revestidor esta cementado a la formación circundante, las fuerzas inducidas excederán la resistencia del material y el revestidor se deformará.

En la medida que el yacimiento es agotado, se incrementará la carga sobre la roca yacimiento detrás de los túneles perforados, causando inestabilidad, falla de la roca y el inicio de la producción de arena. Luego como el material de formación alrededor del revestidor es removido, se perderá soporte lateral y como la compactación induce grandes fuerzas axiales, el revestidor se deformará. Esto explicaría el colapso del revestidor a través de los intervalos productivos.

2.2.3. Mecanismos de producción de arena

Con el propósito de hacer estudios de producción de arena de una forma mas precisa, se necesita desarrollar modelos y criterios que tomen en cuenta una variedad de mecanismos de falla en diferentes puntos a través del tiempo. Es precisamente en estos modelos donde convergen y se correlacionan una gran parte de los factores descritos en la sección anterior, para llegar a estimar tanto la caída de presión para el inicio de la producción de arena como el volumen o tasa de arenamiento resultante. Alireza en sus estudios presenta un modelo numérico que toma en cuenta diferentes mecanismos de falla que pueden jugar un rol importante en la producción de arena, los cuales se explican a continuación (Alireza, 2003).

Fallas de corte

La perforación del pozo o la creación de cualquier cavidad como los túneles perforados cambia el patrón de esfuerzos alrededor de la cavidad. Los esfuerzos efectivos normales a la cara de la cavidad, llamados esfuerzos radiales, se reducen a cero tan pronto como la cavidad es creada. El esfuerzo efectivo radial tiende a ser el esfuerzo efectivo inicial en zonas alejadas de la cavidad, sin embargo, los esfuerzos tangenciales y verticales lo hacen de una forma más rápida, induciendo altos esfuerzos de corte alrededor de la cavidad.

El incremento en la caída de presión desde el yacimiento hacia el pozo afecta también la magnitud de los esfuerzos efectivos en un intervalo debido a que la presión de poro se recupera mucho más lentamente en comparación con los esfuerzos totales. Este efecto es despreciado algunas veces en los estudios de producción de arena debido a la creencia de que la caída de presión puede inducir la producción de arena solo por lo gradientes de presión que pueden hacer fallar el material en tensión y empujar los granos de arena hacia el pozo.

Por otra parte, en la medida que la presión del yacimiento es agotada, los esfuerzos efectivos en la roca se incrementan, y de la misma manera se incrementa la carga sobre los túneles cañoneados o el hoyo abierto. De esta

manera, se inducen esfuerzos de corte más altos alrededor de las cavidades, los cuales se suman a los esfuerzos de corte inducidos por la caída de presión por el flujo desde el yacimiento hacia el pozo. Luego la falla de corte se presenta una vez que los esfuerzos de corte exceden el límite de resistencia al corte de la roca intacta.

El mecanismo de falla por corte es activo principalmente alrededor de las cavidades donde las dos condiciones principales son satisfechas: esfuerzos de corte muy altos y presencia de deformaciones diferenciales. En la medida que la producción de arena continua, los esfuerzos efectivos son redistribuidos alrededor de la cavidad así como el material fallado es removido. Esta redistribución de esfuerzos puede hacer fallar material adicional, lo cual provee más granos para producción. Luego el ciclo progresivo de falla-producción hasta que se consigue una geometría estable de la cavidad.

Fallas de tensión

La producción de arena debido a fallas de tensión se observa principalmente en yacimientos no consolidados, cuando el gradiente de flujo es alto. Cualquier incremento en la caída de presión desde el yacimiento hacia el pozo se relaciona con el aumento del gradiente de presión alrededor de los túneles cañoneados, que en muchos casos puede llevar a la falla de tensión en formaciones no consolidadas. Este efecto es mucho mayor cuando la permeabilidad de la roca ha sido bastante reducida como consecuencia del daño por cañoneo. Sanfilippo (1997) logra modelar bien las fallas de corte y tensión con su teoría de plasticidad, reportando casos de aplicación en Mar del Norte.

La producción de arena inducida por falla de tensión es frecuentemente esporádica y produce volúmenes de arena relativamente pequeños. Este tipo de falla se agrava con cambios rápidos en los regímenes de producción del pozo y normalmente se estabiliza con el tiempo.

Fallas volumétricas o colapso de poros

Este mecanismo es activado principalmente cuando hay poco o ningún desplazamiento lateral. En este caso, no se producirá falla por corte y el mecanismo de desagregamiento de los granos sería solo por colapso de poro en el curso de la falla volumétrica. Altas porosidades y más baja resistencia mecánica aumentan la probabilidad de que se presente el colapso de poro.

En el pasado, el fenómeno de colapso de poro había sido estudiado para comprender el mecanismo de subsidencia en los campos petroleros y no había sido asociado a la producción de arena. En condiciones de un gran agotamiento del yacimiento, se puede presentar la desagregación de los granos debido a que las deformaciones compresivas rompen el cemento entre los granos. Esta falla volumétrica inducida por el agotamiento comienza cerca del pozo o zonas más débiles y se extiende hasta otras zonas del yacimiento, esto debido a que la presión de poro cambia en forma más moderada y los esfuerzos totales alrededor de cualquier apertura se recuperan mucho más rápido. Luego la producción de crudo continua, la presión de todo el yacimiento disminuye y el poro colapsa, lo cual inicialmente se había presentado cerca del pozo y ahora se extiende a todo el yacimiento.

2.2.4. Métodos de control de arena para pozos de hidrocarburo

Tubería ranurada

La tubería ranurada es básicamente una tubería a la cual se le mecanizan ranuras, cuyas dimensiones (es decir, el ancho y la longitud de las ranuras o la distancia entre las mismas) se controla rigurosamente, de manera tal que la arena de formación o del empaque con grava pueda ser retenida en las aberturas sobre la superficie exterior de la tubería.

Las tuberías ranuradas pueden ser fabricadas en diferentes geometrías. El patrón en zigzag de ranura sencilla suele ser el preferido, pues permite conservar más de la resistencia original de la tubería. El patrón en zigzag también da una distribución de ranuras más uniforme en el área superficial de la tubería.



Figura 4. Tubería ranurada con patrón de ranuras en zigzag

Fuente: CIED (1999)

Rejillas de alambre embobinado

Estas rejillas consisten de alambre de acero inoxidable enrollado alrededor de una base de tubería cañoneada. Es posible controlar que tan comprimida está la espiral para así regular el tamaño de las aberturas entre las vueltas. Se lograron mejoras en el diseño de este tipo de rejilla añadiendo alambres longitudinales, o nervaduras, entre el alambre exterior, o camisa, y la base de tubería. Las nervaduras permiten contar con una separación para que el fluido circule por la longitud de la tubería base después de entrar en la camisa de alambre. Esta modificación aumentó enormemente el área de flujo hacia la rejilla.



Figura 5. Rejilla de alambre embobinado

Fuente: CIED (1999)

Rejilla de malla metálica

Consisten en una tubería base, una chaqueta de filtración formada por diferentes capas de mallas y una chaqueta exterior para protección. La característica más importante que presentan estos tipos de rejillas es su baja susceptibilidad a sufrir daños durante la instalación de las mismas. Cabe destacar que además son muy demandadas en el mercado debido a su alta resistencia a la corrosión.



Figura 6. Rejilla de malla metálica

Fuente: Halliburton (2014)

Rejillas de fibra metálica comprimida

Este tipo de rejillas usan como medio filtrante una fibra de acero inoxidable comprimida alrededor de la tubería base y es protegida por una chaqueta perforada. Posee mayor área de flujo y alta porosidad y permeabilidad. Además, minimiza el taponamiento y reduce la caída de presión en la completación. Tiene un área abierta al flujo que alcanza hasta el 92%.

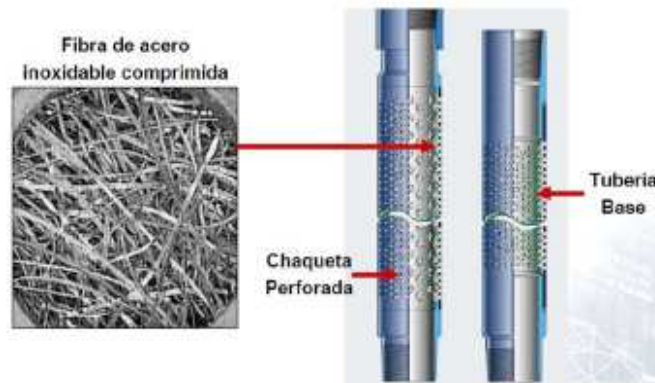


Figura 7. Rejilla de fibra metálica comprimida

Fuente: CIED (1999)

Rejillas expandibles

Constan de un diámetro reducido que se expande contra la pared del pozo después de bajarse al mismo. Este diseño ofrece un gran número de ventajas, brinda una gran área de influjo que minimiza el taponamiento de la rejilla y la erosión, es operacionalmente fácil de instalar, proporciona un mayor diámetro interno que cualquier otro tipo de rejilla de control de arena, optimiza el comportamiento del influjo y facilita la instalación de equipos para aislamiento zonal.

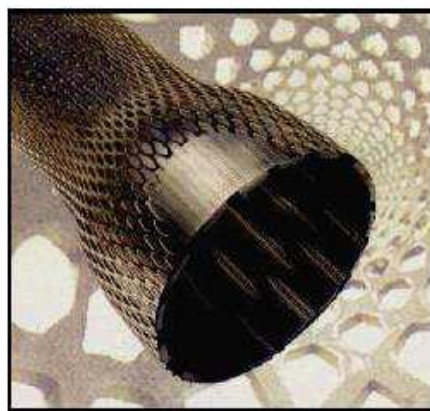


Figura 8. Rejilla expandible

Fuente: CIED (1999)

Rejillas preempacadas

Las rejillas pre-empacadas son filtros de dos etapas con envolturas externas e internas que entrapan el medio filtrante, el cual no deja pasar los granos de formación más pequeños. Esta arena actúa como agente puenteante cuando se produce arena de formación, mientras que la envoltura exterior de la rejilla filtra los granos de formación más grandes. La grava utilizada en el pre-empaque de estas rejillas es sintética, y es distribuida uniformemente en toda la rejilla a través de un proceso vibratorio.



Figura 9. Rejilla preempacada

Fuente: Halliburton (2014)

Empaque con grava

Es un método de control que se utiliza para prevenir la producción de arena de formación. En las operaciones de empaque con grava, se coloca una rejilla o tubería ranurada en el pozo y el espacio anular circundante se empaca con grava preparada de un tamaño específico, diseñada para prevenir el pasaje de arena de formación. El objetivo principal es estabilizar la formación, a la vez que se causa un deterioro mínimo de la productividad del pozo. Se puede realizar a hoyo abierto o a hoyo entubado.

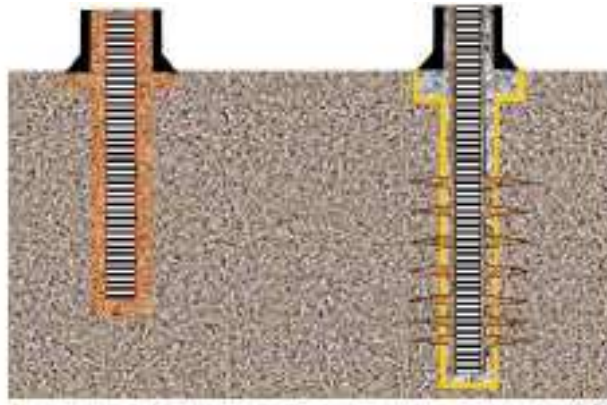


Figura 10. Rejilla con grava a hoyo abierto y a hoyo entubado

Fuente: CIED (1999)

Frac and Pack

Consiste en la combinación de una técnica de estimulación, como lo es el fracturamiento hidráulico con un empaque con grava en el anular rejilla-revestidor, obteniéndose las ventajas de ambas técnicas como lo son aumentar el índice de productividad y el control de la producción de arena.

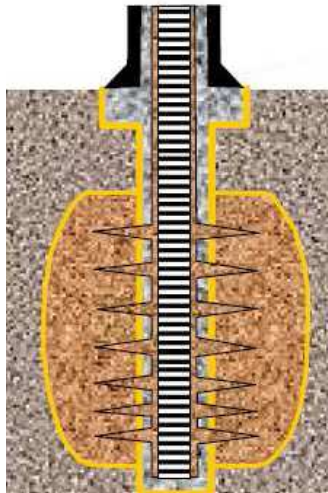


Figura 11. Frac and Pack

Fuente: CIED (1999)

2.2.5. Selección y dimensionamiento de los métodos de control

Identificada la necesidad del pozo, para la aplicabilidad de un sistema o un método de exclusión de arena, la misma debe hacerse considerando los siguientes criterios:

- Económico: Considerar el costo inicial del tratamiento y este efecto sobre la producción.
- Antecedentes históricos: Análisis de la vida productiva del yacimiento y del pozo.
- Aplicabilidad: Grado de dificultad en la aplicación del tratamiento.
- Duración del servicio: Estimación de producción libre de arena y de tasa de frecuencia para la repetición del tratamiento.

Tiffin (1998) ha proporcionado directrices adicionales para la selección de los métodos de control de arena mediante la introducción de tres parámetros de clasificación, basados en la distribución de granos de las arenas de formación de un yacimiento, los cuales son: coeficiente de uniformidad (CU), coeficiente de ordenamiento (CO) y porcentaje de finos (representan las partículas menores de 44 μm). Estos criterios son utilizados ampliamente en la industria para el diseño y selección de rejillas para control de arena.

De acuerdo con Tiffin (1998), el coeficiente de uniformidad se define como el cociente del percentil D40 de la distribución de tamaño de grano de la formación y el percentil D90 ($D40/D90$), mientras que el coeficiente de ordenamiento es el cociente del percentil D10 y D95 ($D10/D95$). A partir de estas características de la formación, Tiffin recomienda las completaciones de pozo según se indica en la Tabla 1.

Tabla 1. Criterio de Tiffin

CRITERIO DE SELECCIÓN	TIPO DE FORMACION	COMPLETACION RECOMENDADA
D10/D95 < 10 D40/D90 < 3 FINOS < 2%	Formaciones con poco contenido de finos y baja distribución de tamaños de granos.	Completacion con rejillas convencionales sin empaque con grava
D10/D95 < 10 D40/D90 < 5 FINOS < 5%	Formaciones con contenido de finos fuera de rango y baja a media distribución de tamaños de granos.	Completacion con rejillas Premium sin empaque con grava
D10/D95 < 20 D40/D90 < 5 FINOS < 5%	Formaciones con distribuciones media de tamaños de granos.	Empaques con grava de alta tasa (High Rate Water Pack)
D10/D95 < 20 D40/D90 < 5 FINOS < 10%	Formaciones con distribuciones media de tamaños de grano y alto contenidos de finos	Empaque con grava empleando rejillas Dimensionadas para producir finos
D10/D95 > 20 D40/D90 > 5 FINOS > 10%	La identificación de estas formaciones dependerá de la amplitud de algunos de los factores de criterio.	Requiere ampliamiento de la zona productora a traves de fracturas, pozos multilaterales, pozos horizontales, etc.

Fuente: Tiffin (1998)

Existen varios criterios para diseñar la apertura del medio filtrante de los métodos de control de arena. Sin embargo, en la metodología desarrollada por PDVSA Intevep se ha tomado en cuenta para el diseño de rejillas el criterio de Rogers (1971) y para los empaques de grava el criterio de Saucier (1974).

De acuerdo con el criterio de Rogers, la apertura de las rejillas debe ser igual al percentil D10 de la distribución de tamaños de grano de la formación. Para el caso de los empaques de grava, el criterio de Saucier recomienda que el tamaño de la grava deber ser de 5 a 6 veces el tamaño promedio de grano de la formación.

De igual forma, de acuerdo con el CIED (1999) existen otros criterios basados en la distribución de granos de las arenas de formación de un yacimiento, estos son:

2.2.6. Evaluaciones de desempeño de los métodos de control de arena

De acuerdo con Rivero (2013), existen dos procedimientos experimentales para evaluar el desempeño de los métodos de control de arena usados en fondo de pozo, los cuales emulan dos escenarios diferentes de falla de la formación: a) falla gradual de la formación, y b) colapso de hoyo. Para estos escenarios se han propuesto ensayos denominados “pruebas de retención de arena”, donde el colapso de hoyo está representado por la prueba de “empaquete de arena” o “*Sand Pack Test*” y la falla gradual de la formación está representada por la “prueba de lechada de arena” o “*Slurry Test*”.

La prueba de lechada se fundamenta en la creación de una mezcla entre la arena y un fluido que mantenga suspendidos los granos que pasarán a través de la rejilla. La lechada se mezcla con agua en una tubería pequeña inmediatamente antes de la entrada a la celda de prueba que contiene el cupón de rejilla. La presión a través del cupón de rejilla es registrada durante el progreso de la prueba y graficada contra el peso de la arena inyectada para interpretar los datos. La gran cantidad de dilución significa que la lechada ha perdido su viscosidad cuando la arena alcanza el cupón de rejilla. El efluente de la prueba es recolectado en alícuotas y filtrado para obtener el peso de la arena que pasa por la rejilla. En la Figura 12 se muestra el esquema de la prueba de lechada de arena.

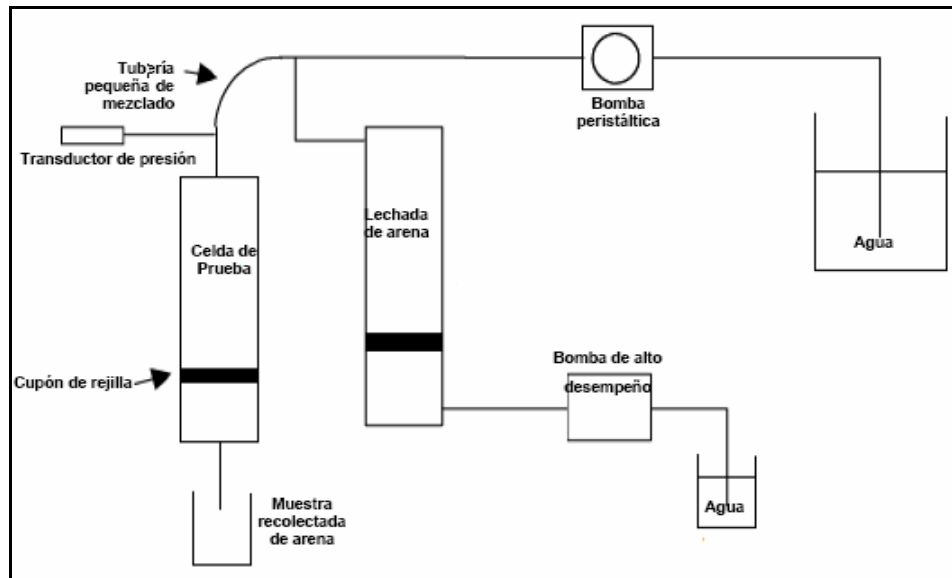


Figura 12. Esquema de ensayo del tipo "Slurry Test"

Fuente: Rivero (2013)

En la prueba de empaque de arena ésta es colocada directamente sobre la rejilla y un fluido humectante pasa a través de la arena y de la rejilla. La configuración del ensayo de empaque de arena mostrado de forma esquemática en la Figura 13 comprende una celda de prueba de plexiglás que contiene el cupón de rejilla sobre el cual el empaque se forma, un transductor de presión con su sistema de registro y una bomba de desplazamiento positivo para inyectar el líquido que pasará a través del empaque de arena. El efluente es recolectado en alícuotas, se filtra y la arena es secada y pesada.

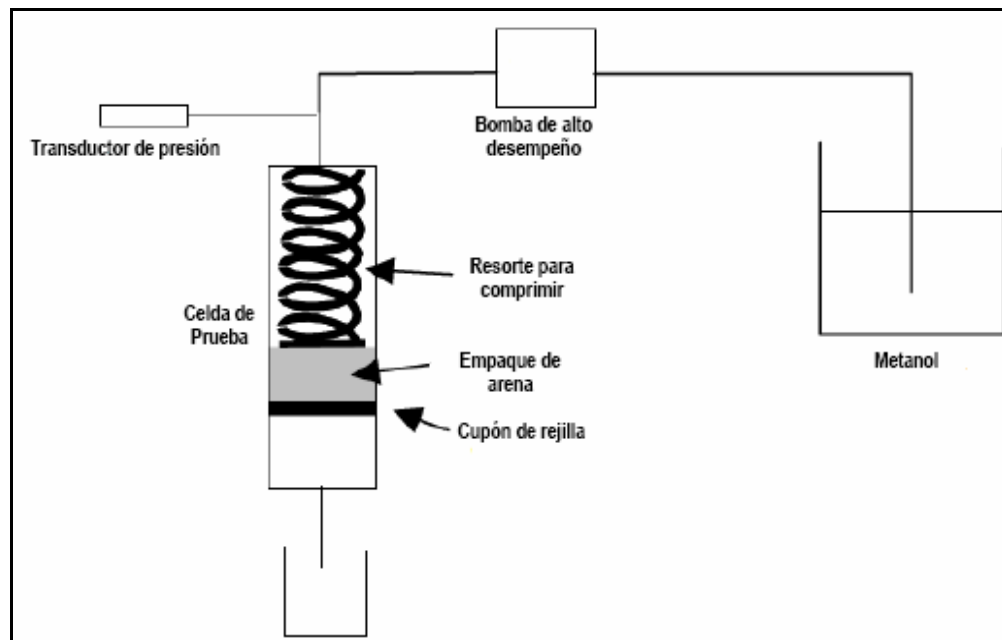


Figura 13. Esquema de ensayo del tipo “*Sand Pack Test*”

Fuente: Rivero (2013)

2.2.7. Definición de proyecto

De acuerdo con Palacios (2005) un proyecto es un trabajo que realiza una determinada organización con el objeto de dirigirse a una situación deseada. Se define como un conjunto de actividades orientadas a un fin común, que tienen un comienzo y una terminación. Las características fundamentales de un proyecto son la temporalidad del trabajo y el resultado final que es un producto o servicio único.

2.2.8. Formulación de proyectos

La formulación de proyectos es la etapa en donde se estudia una serie de alternativas de solución para el logro de los objetivos planteados. Baca (2001) explica que con la formulación de proyectos se determina la necesidad, requerimiento o problemática y se proponen las ideas o alternativas, que resultan del juicio u opinión de expertos, para pasar de la situación actual a la situación deseada, esto conlleva a un análisis inicial de datos internos y externos a la organización (contexto, mercado, expectativas, interesados, financiamiento) que

permitirá finalmente contar con una definición clara de los objetivos, alcance, requisitos, productos o entregables, además del desarrollo inicial de planes de ejecución, estimación global de costos y reconocimiento de los riesgos asociados al proyecto.

2.2.9. Gerencia de proyectos

Chamoun (2002) define a la Gerencia de Proyectos como la disciplina de organizar, administrar recursos, aplicar conocimientos, habilidades, herramientas y técnicas en las diferentes actividades y etapas requeridas de los proyectos, de forma tal que estos sean terminados completamente dentro de las restricciones de las variables claves, alcance, tiempo, costos, calidad y riesgos, los cuales están encaminados a satisfacer necesidades de los interesados.

2.2.10. Gerencia de proyectos como factor competitivo

Para gerenciar efectivamente los proyectos son primordiales dos procesos que dan arranque al proyecto: el desarrollo del documento aprobatorio del proyecto y el informe preliminar del alcance del proyecto. Estos dos procesos complementarios son claves para aprobar los proyectos adecuados y comenzar su proceso de planificación integral, de manera que lo hecho esté en línea con lo realmente deseado y con lo necesitado. De allí la necesidad de estudiar a profundidad cómo las organizaciones planifican estratégicamente su futuro y establecen las condiciones adecuadas para que se ideen, aprueben y ejecuten los proyectos que realmente son importantes para lograr un futuro mejor para la empresa.

La ejecución de proyectos en una organización será exitosa en la medida que esos proyectos y la forma como se ejecuten estén alineados con el proceso de planificación estratégica. Es de resaltar la importancia de que esta planificación estratégica, sea cual sea los objetivos que se quieran alcanzar, debe estar orientada a incorporar valor competitivo a la organización, es decir la marca, calidad, credibilidad, confiabilidad, entre otros aspectos intangibles que representan realmente a la organización. Villalba (1996), explica cómo se ha

determinado que el 60% del valor organizacional es lo intangible. Es decir, las organizaciones no son oficinas, edificios, plantas o grandes infraestructuras, las organizaciones son lo que hacen y cómo lo hacen, de manera que parte del éxito de una estrategia es garantizar que en su ejecución, esos valores competitivos fluyan desde la alta dirección hasta lo individual, contando con un liderazgo que gane credibilidad con el cumplimiento de los compromisos o hitos que se establecen en el marco de la estrategia.

Es precisamente aquí donde la Gerencia de Proyectos juega un rol importante, a través de la ejecución de actividades que respondan a los lineamientos estratégicos y el uso de metodologías que fomenten valores y ventajas competitivas en la organización.

Las ventajas competitivas están representadas por un conjunto de atributos que posee una empresa que la distinguen de sus competidores, los cuales son además reconocibles por sus clientes. Estas ventajas deben ser expresadas siempre en términos relativos: "mejor" en lugar de "bueno". Esto nos evita el peligro de la subjetividad.

Para ser sostenibles, las ventajas competitivas deben estar basadas en atributos difíciles de replicar por los competidores, por ejemplo, una marca o una tecnología. Las ventajas asociadas con infraestructura, localización o solidez financiera tienden a tener una vida corta, porque eventualmente son copiadas o logradas por la competencia.

Existen dos tipos de ventajas competitivas, las de costos y las de valor. Las del primer grupo se refieren a la posibilidad de ofrecer un producto o servicio a un costo para el usuario menor que la competencia. Los costos de producción pueden representar parte de esta ventaja, pero no son suficientes. Debemos tomar en cuenta todos los demás factores que "encarecen" nuestro producto o servicio, como tiempo de espera, costos de traslado, etc. De nada vale tener costos de fabricación muy bajos, si por errores de distribución el cliente termina pagando un precio muy alto por el producto.

Por su parte, las ventajas de valor están representadas por atributos adicionales al costo. Por ejemplo, diseño, sabor, confiabilidad, etc. En ocasiones, la tenencia de una ventaja de valor permite sostener precios superiores a los de la competencia, pero dentro de ciertos límites. Ninguna ventaja justifica una diferencia exagerada de precios.

2.2.11. Alineación estratégica de la gerencia de proyectos

El marco en el que se gestan las ventajas competitivas está conformado por unos factores determinantes que están interrelacionados entre sí. En este modelo, la base de la competitividad o la capacidad para competir, no deriva de los factores ni de sus atributos, sino de su interrelación. Esto significa que el efecto que cada uno de ellos pueda causar, depende del estado de los otros, que las ventajas de unos puedan crear o perfeccionarán ventajas en los otros. A este concepto dinámico se le denominó “Diamante de Competitividad”, y se le debe al profesor Michael Porter (1980). Los factores determinantes de la competitividad representados en el diamante son los siguientes: factores de producción, condiciones de la demanda, industrias relacionadas y de apoyo, estrategias, estructura y rivalidad de empresas.

Para establecer una diferencia sustentable competitiva, la organización debe seleccionar un conjunto de actividades debidamente engranadas en una estrategia clara hacia el logro de sus objetivos. Para ello Kaplan y Norton (2001) desarrollaron el Cuadro de Mando Integral, donde se introducen cuatro perspectivas en las cuales ubicar los objetivos que constituyen la estrategia, la cual puede ser visualizada a través de las relaciones causales que existen entre ellos.

- La perspectiva de los accionistas, que representa el punto de vista de quienes ejercen derechos de propiedad sobre la empresa.
- La perspectiva de los clientes, que representa el punto de vista de los destinatarios de los bienes y servicios.

- La perspectiva de los procesos internos, que representa el punto de vista de las actividades necesarias para producir los bienes y servicios.
- La perspectiva de aprendizaje y crecimiento, que representa el punto de vista de las capacidades requeridas para realizar las actividades productivas. Estas capacidades son de tres tipos: capacidades humanas, infraestructura tecnológica y organización. Esta perspectiva la denominaremos de capacidades, nombre que parece capturar mejor su naturaleza que el de aprendizaje y crecimiento.

Estas cuatro perspectivas requieren la fijación de unos objetivos, cada objetivo tendrá a su vez uno o mas indicadores tangibles y metas específicas para la propuesta de valor de la organización. Pero la organización debe definir un programa o plan de acción que permita alcanzar las metas de todos los indicadores, esto se consigue mediante la identificación de iniciativas estratégicas, formando para ello el cuadro de mando integral.

El uso del cuadro de mando integral le permite a la Gerencia de Proyectos gestionar eficazmente las variables claves de los proyectos como son el alcance, plazo, costo, riesgo y calidad.

Mediante la definición de un patrón de mapa estratégico, la Gerencia de Proyectos puede utilizarlo para los mapas estratégicos de cada uno de sus proyectos, entendiéndose que si todos los proyectos están basados en una misma metodología de gestión, entonces la gran mayoría de los objetivos del mapa estratégico patrón serán usados para alinear el proyecto a la estrategia de la organización. Adicionalmente, el proceso permite la posibilidad de comparar el desempeño de todos los proyectos, y entre los proyectos ya finalizados y los proyectos actuales en ejecución.

2.2.12. Procesos de la gerencia de proyectos

Según el PMI (2017) un proceso es un conjunto de acciones y actividades interrelacionadas realizadas para obtener un producto, resultado o servicio predefinido. Eso indica que todo proceso incluye una sucesión de actividades que,

necesariamente tienen cada una de ellas alguna actividad precedente y/o alguna actividad siguiente. Cada proceso se caracteriza por sus entradas, por las herramientas y técnicas que pueden aplicarse y por las salidas que se obtienen. Los procesos de la gerencia de proyectos se agrupan en cinco categorías:

- Grupo de Procesos de Inicio. Procesos realizados para definir un nuevo proyecto o nueva fase de un proyecto existente al obtener la autorización para iniciar el proyecto o fase.
- Grupo de Procesos de Planificación. Procesos requeridos para establecer el alcance del proyecto, refinar los objetivos y definir el curso de acción requerido para alcanzar los objetivos propuestos del proyecto.
- Grupo de Procesos de Ejecución. Procesos realizados para completar el trabajo definido en el plan para la dirección del proyecto a fin de satisfacer los requisitos del proyecto.
- Grupo de Procesos de Monitoreo y Control. Procesos requeridos para hacer seguimiento, analizar y regular el progreso y el desempeño del proyecto, para identificar áreas en las que el plan requiera cambios y para iniciar los cambios correspondientes.
- Grupo de Procesos de Cierre. Procesos llevados a cabo para completar o cerrar formalmente el proyecto, fase o contrato.

2.2.13. Gestión del alcance del proyecto

De acuerdo con el PMI (2017) la gestión del alcance del proyecto incluye los procesos requeridos para garantizar que el proyecto incluya todo el trabajo requerido, y únicamente el trabajo requerido, para completar el proyecto con éxito. Gestionar el alcance del proyecto se enfoca primordialmente en definir y controlar qué se incluye y qué no se incluye en el proyecto.

A nivel de planificación los procesos de gestión del alcance del proyecto son:

- Planificar la Gestión del Alcance: Es el proceso de crear un plan de gestión del alcance que documente cómo se va a definir, validar y controlar el alcance del proyecto y del producto.
- Recopilar Requisitos: Es el proceso de determinar, documentar y gestionar las necesidades y los requisitos de los interesados para cumplir con los objetivos del proyecto.
- Definir el Alcance: Es el proceso de desarrollar una descripción detallada del proyecto y del producto.
- Crear la EDT/WBS: Es el proceso de subdividir los entregables y el trabajo del proyecto en componentes más pequeños y más fáciles de manejar.

2.2.14. Gestión del tiempo del proyecto

Es el área de la gerencia de proyectos que incluye los procesos requeridos para asegurar la terminación oportuna del proyecto. A nivel de planificación los procesos de gestión del tiempo del proyecto son:

- Planificar la Gestión del Cronograma: Es el proceso de establecer las políticas, los procedimientos y la documentación para planificar, desarrollar, gestionar, ejecutar y controlar el cronograma del proyecto.
- Definir las Actividades: Es el proceso de identificar y documentar las acciones específicas que se deben realizar para elaborar los entregables del proyecto.
- Secuenciar las Actividades: Es el proceso de identificar y documentar las relaciones entre las actividades del proyecto.
- Estimar la Duración de las Actividades: Es el proceso de realizar una estimación de la cantidad de períodos de trabajo necesarios para finalizar las actividades individuales con los recursos estimados.
- Desarrollar el Cronograma: Es el proceso de analizar secuencias de actividades, duraciones, requisitos de recursos y restricciones del cronograma

para crear el modelo del cronograma del proyecto para la ejecución, el monitoreo y el control del proyecto.

2.2.15. Gestión de costos del proyecto

Según el PMI (2017), la gestión de los costos del proyecto incluye los procesos involucrados en planificar, estimar, presupuestar, financiar, obtener financiamiento, gestionar y controlar los costos de modo que se complete el proyecto dentro del presupuesto aprobado. A nivel de planificación los procesos de gestión de los costos del proyecto son:

- Planificar la Gestión de los Costos: Es el proceso de definir cómo se han de estimar, presupuestar, gestionar, monitorear y controlar los costos del proyecto.
- Estimar los Costos: Es el proceso de desarrollar una aproximación de los recursos monetarios necesarios para completar el trabajo del proyecto.
- Determinar el Presupuesto: Es el proceso que consiste en sumar los costos estimados de las actividades individuales o paquetes de trabajo para establecer una línea base de costos autorizada.

2.2.16. Gestión de los riesgos del proyecto

La gestión de los riesgos del proyecto incluye los procesos para llevar a cabo la planificación de la gestión, identificación, análisis, planificación de respuesta, implementación de respuesta y monitoreo de los riesgos de un proyecto. Los objetivos de la gestión de los riesgos del proyecto son aumentar la probabilidad y/o el impacto de los riesgos positivos y disminuir la probabilidad y/o el impacto de los riesgos negativos, a fin de optimizar las posibilidades de éxito del proyecto.

A nivel de planificación, los procesos de gestión de los riesgos del proyecto son:

- Planificar la Gestión de los Riesgos: El proceso de definir cómo realizar las actividades de gestión de riesgos de un proyecto.

- **Identificar los Riesgos:** El proceso de identificar los riesgos individuales del proyecto, así como las fuentes de riesgo general del proyecto y documentar sus características.
- **Realizar el Análisis Cualitativo de Riesgos:** El proceso de priorizar los riesgos individuales del proyecto para análisis o acción posterior, evaluando la probabilidad de ocurrencia e impacto de dichos riesgos, así como otras características.
- **Realizar el Análisis Cuantitativo de Riesgos:** El proceso de analizar numéricamente el efecto combinado de los riesgos individuales del proyecto identificados y otras fuentes de incertidumbre sobre los objetivos generales del proyecto.
- **Planificar la Respuesta a los Riesgos:** El proceso de desarrollar opciones, seleccionar estrategias y acordar acciones para abordar la exposición al riesgo del proyecto en general, así como para tratar los riesgos individuales del proyecto.

2.3. Bases Legales

Para el desarrollo de la propuesta, se consultaron las siguientes bases legales y normativas que guardan relación con la presente investigación:

- Norma internacional ISO/IEC–17025. Desarrollada por ISO (International Organization for Standardization) en la que se establecen los requisitos que deben cumplir los laboratorios de ensayo y calibración. Se trata de una norma de Calidad que tiene base en la serie de normas ISO 9000, introduciendo una serie de requisitos técnicos imprescindibles para lograr la acreditación de los laboratorios de ensayo y calibración. La norma ISO/IEC 17025 es aplicada por los laboratorios de ensayo y calibración con el objetivo de demostrar que son técnicamente competentes y que sus resultados son veraces.
- Ley Orgánica de Ciencia, Tecnología e Innovación (LOCTI). Promulgada según Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela No 6.151, de fecha 18

de noviembre de 2014. Los fundamentos de esta Ley y sus reglamentos se orientan hacia la promoción, estímulo y fomento de la investigación, apropiación social del conocimiento, la transferencia e innovación tecnológica, a través de los proyectos que formulan los beneficiarios. Son de particular interés los artículos 11, 13 y 14, donde se resaltan los aspectos estratégicos de la Ley y se impulsa el Plan Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación, que establece como una de sus líneas prioritarias, el fomento de la calidad e innovación productiva.

- Procedimiento General INT-PG-201 “Metodología para ejecutar y documentar proyectos de investigación y desarrollo en Intevep”. Normativa interna de PDVSA Intevep que establece las directrices y la metodología a seguir en los proyectos de Investigación y Desarrollo, con el propósito de documentar el conocimiento adquirido durante su ejecución, permitiéndole a Intevep llevar a cabo una Gestión del Conocimiento que respalde las tecnologías y/o procesos desarrollados.

2.4. Definición de Términos

Areniscas: Son rocas con granos cementados, con una composición granulométrica relativamente homogénea pero siempre unidos por un cemento (Tovar, 2006. p.14).

Completación: Operación por medio de la cual se instalan en el pozo los equipos necesarios para llevar la producción de hidrocarburos desde el fondo hasta superficie (CIED, 1999. p.6).

Distribución de tamaño de partículas: Frecuencia acumulada o absoluta de todos los tamaños de partículas presentes en una muestra de formación.

Esfuerzo: La fuerza actuante por unidad de área, se expresa en Pa (N/m²) o en psi (libras por pulgada cuadrada).

Geomecánica: Disciplina de conocimiento que estudia los esfuerzos que actúan sobre las formaciones en el subsuelo, así como sus propiedades mecánicas (Vázquez, 2001. p.8).

Permeabilidad: Mide la capacidad y la habilidad que tiene la formación para transmitir fluidos (Zoback, 2006. p. 241).

Porosidad: Es la fracción de volumen de espacio no ocupado por la matriz de la roca (Zoback, 2006. p. 241).

Rejilla: Dispositivo que a través de un medio filtrante permite maximizar la retención de arena y minimizar los impedimentos a la productividad de los pozos (Tovar, 2006. p. 43).

Revestidor: Tubería de acero de alta resistencia que se corre en los pozos de hidrocarburos para garantizar la integridad mecánica de los mismos (CIED, 1999. p.5).

CAPITULO III: MARCO METODOLOGICO

En este capítulo se presenta una descripción de los procedimientos y acciones para recabar la información necesaria y dar respuesta a las interrogantes planteadas en el presente trabajo, como base de la metodología aplicada en la investigación. A través del capítulo se desarrollan aspectos como: el tipo y diseño de la investigación, la unidad de análisis, la población y muestra, además de los instrumentos y técnicas requeridas para la recolección de datos, entre otros.

3.1. Tipo de Investigación

El tipo de investigación está relacionado con el alcance que puede tener la investigación científica y el propósito general que persigue el investigador, y su selección determinará el enfoque y el esquema de investigación, los pasos a seguir del estudio, así como las técnicas y métodos que puedan emplearse para cumplir con la finalidad del estudio.

De acuerdo al problema planteado y en función de los objetivos propuestos, el desarrollo de este trabajo está basado en el concepto de Investigación Aplicada, ya que se trata de un estudio orientado a tener una aplicación inmediata en la solución de un problema práctico, además de tener el potencial de producción de un nuevo conocimiento y el incremento de los postulados teóricos relacionados con el objeto de investigación. De acuerdo con Valarino, Yáber y Cemborain (2010) la Investigación Aplicada se define como: "...una actividad que tiene por finalidad la búsqueda y consolidación del saber, y la aplicación de los conocimientos para el enriquecimiento del acervo cultural y científico, así como la producción de tecnología al servicio del desarrollo integral del país" (Valarino, Yáber y Cemborain, 2010. p. 67).

De acuerdo con la finalidad o propósito, la investigación puede clasificarse en investigación básica o investigación aplicada. Se llama investigación básica a aquella que pretende conocer, explicar y comprender los fenómenos. La

investigación aplicada, en cambio, tiene sus fundamentos y se nutre de la investigación básica para resolver problemas concretos, apoya su fortaleza en ella, por ello se requiere un marco teórico o referencial y un compendio de antecedentes que se sustenta en los resultados de la investigación previamente encontrados. Se puede afirmar entonces que la ciencia básica apoya o sustenta a las ciencias aplicadas y contribuye a los avances tecnológicos.

3.2. Diseño de la Investigación

De acuerdo con Balestrini (2006) el diseño de la investigación se define como la estrategia o plan global de la investigación que integra de un modo coherente y adecuadamente correctas técnicas de recolección de datos a utilizar, así como el análisis e interpretación de los mismos, para dar de una manera clara y no ambigua respuesta a las preguntas planteadas en la investigación.

Tomando en cuenta los objetivos trazados, este estudio se orienta hacia la incorporación de un diseño de investigación de campo del tipo no experimental, según el cual se observan los hechos estudiados tal como se manifiestan en su ambiente natural, y en este sentido, no se manipulan de manera intencional las variables. Tal como lo señala Balestrini (2006), estos diseños permiten establecer una interacción entre los objetivos y la realidad de la situación de campo; observar y recolectar los datos directamente de la realidad, en su situación natural; profundizar en la comprensión de los hallazgos encontrados y proporcionarle al investigador una lectura de la realidad objeto de estudio mas rica en cuanto al conocimiento de la misma.

En el diseño no experimental propuesto para este trabajo, la investigación, en función de su dimensión temporal, está orientada de una forma transeccional, donde la recolección de los datos se efectúa una sola vez y en un tiempo único, tal como lo explican Hernández, Fernández y Baptista (2014). El propósito de los diseños transeccionales es el de indagar la incidencia y los valores como se manifiesta una o mas variables estudiadas en una determinada situación, en un momento dado.

Además, el diseño de investigación que se aplicó incluye un componente documental, ya que se pretende recopilar datos e información a partir de la aplicación de técnicas bibliográficas, en los informes de otras investigaciones y a través de las diferentes bases de datos y fuentes documentales. Arias (2012, p.27) define el diseño de investigación documental como: "...un proceso basado en la búsqueda, recuperación, análisis, crítica e interpretación de datos secundarios, es decir, los obtenidos y registrados por otros investigadores en fuentes documentales: impresas, audiovisuales o electrónicas. Como en toda investigación, el propósito de este diseño es el aporte de nuevos conocimientos".

3.3.Unidad de Análisis

La unidad de análisis dentro de la cual se enmarca el presente trabajo de investigación, la representa el Laboratorio de Mecánica de Perforación, adscrito a la Gerencia Departamental de Construcción de Pozos de PDVSA Intevep. A partir de esta unidad de análisis se generaron conclusiones y recomendaciones que impactan los laboratorios de estudios de control de arena con los cuales cuenta PDVSA actualmente, para atender la problemática de producción de arena en las diferentes áreas operacionales del país:

- Laboratorio de Mecánica de Perforación – PDVSA Intevep Los Teques
- Laboratorio de Producción y Soporte Tecnológico – PDVSA Intevep Tía Juana
- Laboratorio de Producción y Soporte Tecnológico – PDVSA Intevep Faja
- Laboratorio de Pruebas de Producción – PDVSA San Tomé

Asimismo, para la formulación de la propuesta objeto de investigación se consideró el juicio y opinión de los siguientes profesionales:

- Responsable (1) de Laboratorio de Mecánica de Perforación
- Auxiliar (1) de Laboratorio de Mecánica de Perforación

- Profesionales ID Soporte (3) de la Gerencia Departamental de Construcción de Pozos

3.4. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

En función de los objetivos definidos en este trabajo de investigación, ubicado en la modalidad de Investigación Aplicada, se emplearon una serie de instrumentos y técnicas de recolección de datos, orientadas de manera esencial a alcanzar los fines propuestos. Un proceso investigativo no tiene validez sin la aplicación sistemática de estas técnicas de recolección de datos.

Se entiende por técnica de recolección de datos, el procedimiento o forma particular de obtener datos o información (Balestrini, 2006). Las técnicas son particulares y específicas de una disciplina, por lo que sirven de complemento al método científico, el cual posee una aplicabilidad general. La información recolectada debe ser guardada en un medio material de manera que los datos puedan ser recuperados, procesados, analizados e interpretados posteriormente. A dicho soporte se le denomina instrumento.

En el desarrollo de la presente investigación se utilizaron las siguientes técnicas e instrumentos de recolección de los datos necesarios para el logro de los objetivos; cuyas definiciones se plantean según Arias (2012):

3.4.1. Análisis documental

Contiene principios sistemáticos y normas de carácter práctico, muy rigurosas e indispensables para ser aplicados a los materiales bibliográficos que se consultarán a través de todo el proceso de investigación. Mediante una lectura general de los textos y trabajos de investigación previos, se inició la búsqueda y observación de los hechos presentes en los materiales escritos consultados. Esta lectura inicial fue seguida de varias lecturas mas detenidas y rigurosas de los textos a fin de captar sus planteamientos esenciales y aspectos lógicos de sus contenidos y propuestas, a propósito de extraer los datos bibliográficos útiles para el estudio que se está realizando.

Algunos de los instrumentos más importantes utilizados durante la aplicación de esta técnica de recolección de datos son:

- **Fichaje:** Permite registrar datos o información proveniente de diversas fuentes, recordar y manejar el contenido de obras leídas. Además la ficha ahorra tiempo y esfuerzo y facilita la elaboración del índice de autores y de títulos consultados así como la memorización y la comprensión.
- **Bases de datos:** Es un conjunto de datos pertenecientes a un mismo contexto y almacenados sistemáticamente para su posterior uso. Actualmente, y debido al desarrollo tecnológico de campos como la informática y la electrónica, la mayoría de las bases de datos están en formato digital, por tanto se ha desarrollado y se ofrece un amplio rango de soluciones al problema del almacenamiento de datos.
- **Cuadros comparativos:** Son una herramienta que sirve para organizar la información, brindando la posibilidad de identificar similitudes y diferencias de dos o mas objetos. De esta manera, la información se fija mentalmente, al observar comparaciones a groso modo de la misma.

3.4.2. Juicio de expertos

El juicio de expertos se define como el juicio que se brinda sobre la base de la experiencia en un área de aplicación, área de conocimiento, disciplina, industria, etc., según resulte apropiado para la actividad de investigación que se está ejecutando. Dicha pericia puede ser proporcionada por cualquier grupo o persona con educación, conocimiento, habilidad, experiencia o capacitación especializada.

Para llevar a cabo un juicio de expertos efectivo en este trabajo de investigación, se consideró la pericia de individuos o grupos con capacitación o conocimientos especializados en los siguientes temas: yacimientos de hidrocarburos, completación de pozos, control de arena, diseño de sistemas experimentales, entre otros.

Este tipo de información puede ser obtenida a través de personal propio o foráneo, por medio de una contratación, en asociaciones profesionales, instituciones gubernamentales, universidades. En el caso de la presente investigación, fueron consultados distintos asesores internos o externos, con experiencia de al menos ocho años en las áreas de conocimiento necesarias.

Para la aplicación de esta técnica se utilizaron los siguientes instrumentos:

- **Registro de notas:** Se refiere al cuaderno o libreta que el observador lleva siempre encima con el objeto de anotar sobre el terreno todas las informaciones, datos, expresiones, opiniones, entre otros, que pueden ser de interés para la investigación.
- **Gráficos explicativos:** Se utilizan para ilustrar y presentar un conjunto de datos relacionados entre sí, de manera que facilite su comprensión, comparación y análisis. Este tipo de gráficos facilita la comprensión de los hechos y las relaciones que existen entre ellos.
- **Flujogramas:** Es una representación gráfica de los pasos de acciones en un determinado proceso. Esta herramienta es muy útil para determinar cómo funciona realmente el proceso para producir un resultado. Los flujogramas son empleados para identificar oportunidades de mejora, diseñar un nuevo proceso en el cual aparezcan incorporadas esas mejoras; facilitar la comunicación entre las personas intervinientes; y para difundir de manera clara y concreta informaciones sobre los procesos.

3.4.3. Observación estructurada

La observación es una técnica que consiste en visualizar o captar mediante la vista, en forma sistemática, cualquier hecho, fenómeno o situación que se produzca en la naturaleza o en la sociedad, en función de unos objetivos de investigación preestablecidos.

Para este trabajo de investigación se aplicó la técnica de observación estructurada, que además de realizarse en correspondencia con unos objetivos

definidos, utiliza una guía diseñada previamente, en la que se especifican los elementos que serán observados. Se utilizó como instrumento de recolección de información en esta observación estructurada, una lista de cotejo o lista de verificación, en la cual se indica la presencia o ausencia de un aspecto o conducta a ser observada.

3.4.4. Entrevistas no estructuradas

La entrevista, más que un simple interrogatorio, es una técnica basada en un diálogo o conversación “cara a cara”, entre el entrevistador y el entrevistado acerca de un tema previamente determinado, de tal manera que el entrevistador pueda obtener la información requerida.

Una entrevista se caracteriza por su profundidad, es decir, indaga de forma amplia en gran cantidad de aspectos y detalles, pudiendo ocupar un tiempo significativo, y además tiene un alcance corto en cuanto a la cantidad de personas que pueden ser entrevistadas en un período determinado, es decir, se abarcan menos personas.

En este trabajo de investigación se aplicó la técnica de entrevista no estructurada, modalidad donde no se dispone de una guía de preguntas elaboradas previamente. Sin embargo, se orienta por unos objetivos preestablecidos que permiten definir el tema de la entrevista, de allí que el entrevistador deba poseer una gran habilidad para formular las interrogantes sin perder la coherencia. El instrumento de recolección de información en las entrevistas realizadas fue el registro de notas.

3.5. Fases de la Investigación

En función del tipo de investigación elegida y los objetivos trazados en el presente trabajo de investigación, seguidamente se presentan las fases desarrolladas para llevar a cabo la formulación del proyecto de diseño y construcción de sistemas experimentales para la evaluación de métodos de control de arena usados en fondo de pozo.

3.5.1. Fase 1: Diagnóstico y diseño de estrategia

En esta fase se desarrolló un diagnóstico de la situación existente en la realidad objeto de estudio, a fin de determinar las necesidades de la empresa en el área de evaluación de métodos de control de arena usados en las completaciones de los pozos. Como resultado importante de esta fase se destaca el establecimiento de la mejor estrategia para llevar a cabo el diseño y construcción de los sistemas experimentales en el Laboratorio de Mecánica de Perforación. Esta fase consta de las siguientes etapas:

Descripción y definición del proyecto

Por medio del desarrollo del Trabajo Especial de Grado, esta etapa contempla la selección del área de estudio, la identificación y estructuración del problema, la definición de los fundamentos teóricos, la metodología planteada y la información de la organización o mercado donde se desarrollará la investigación.

Investigación teórica / documental

En esta etapa se determinaron las bases y criterios a considerar en el diseño de los sistemas experimentales para la evaluación de métodos de control de arena, a través de una profunda revisión bibliográfica usando las bases de datos especializadas del negocio y, además, la participación de expertos en mesas de trabajo. Por otra parte, con el desarrollo de esta etapa se construyó una base de conocimiento técnico que permitiera contar con argumentos sólidos para el diseño de la estrategia en la próxima etapa.

Definición de la estrategia para el diseño y construcción de los sistemas experimentales

Por medio de la observación directa en el Laboratorio de Mecánica de Perforación y la participación de expertos en mesas de trabajo, con esta fase se realizó un análisis de las fortalezas y debilidades con las que cuenta actualmente la organización para realizar estas evaluaciones de métodos de control de arena en sus instalaciones, de modo que se pudieran establecer las mejores estrategias a

seguir para diseñar y construir los sistemas experimentales para la evaluación de estos métodos en el Laboratorio de Mecánica de Perforación. La idea es garantizar la alineación de la propuesta con los objetivos estratégico de la Corporación, siempre buscando fortalecer su valor competitivo en el negocio.

3.5.2. Fase 2: Formulación de la propuesta

En esta segunda fase del proyecto, y atendiendo a los resultados del diagnóstico y diseño de estrategia, se formuló la propuesta de diseño y construcción de sistemas experimentales para la evaluación de esos métodos de control de arena en el Laboratorio de Mecánica de Perforación de PDVSA Intevep. Esta fase consta de las siguientes etapas:

Elaboración del plan de ejecución del proyecto

En esta etapa se consolidan los resultados de todos los procesos de planificación involucrados en la fase organizativa del proyecto, con el fin de obtener un plan integral coherente y consistente que se transforme en la ruta de tránsito durante la ejecución del proyecto. Esta integración implica que el alcance definido, los tiempos reales requeridos, los costos viables, las adquisiciones posibles y los riesgos tratados se conecten armónicamente en un plan que permita alcanzar los objetivos planteados para el proyecto. Para esta etapa se utilizaron como técnicas de recolección de información: el juicio de expertos, entrevistas no estructuradas y la observación directa.

Elaboración del plan detallado de ejecución

El plan detallado de ejecución es la herramienta por excelencia para asegurar que todas las actividades y tareas necesarias para la completación exitosa del proyecto se ejecuten dentro de las metas de tiempo, costo y calidad. Se espera que esta inversión de esfuerzo y tiempo en la planificación sea rentable, en la medida que el plan detallado sirva para aumentar la eficiencia y mejorar la ejecución del proyecto. La planificación detallada se realiza a partir del plan integral que se elabora en la fase anterior, para lo cual se usaron las siguientes

técnicas de recolección de información: el juicio de expertos, entrevistas no estructuradas y la observación directa.

Cierre del proyecto

En esta etapa se realizó la divulgación y documentación de la propuesta de diseño y construcción de los sistemas experimentales en el Laboratorio de Mecánica de Perforación de PDVSA Intevep, con el objeto de elevarla a los niveles de aprobación que le permitan dar curso a su ejecución. Además, se documentaron las lecciones aprendidas, conclusiones y recomendaciones que se consideraron pertinentes.

3.6. Operacionalización de los Objetivos

A continuación se presenta en la Tabla 2, el resultado de operacionalizar los objetivos que fundamentan el presente trabajo de investigación, donde se han seleccionado los indicadores que permitirán medir su grado de cumplimiento o aplicación.

Tabla 2. Matriz de operacionalización de objetivos

Objetivo General	Formular un proyecto para diseñar y construir sistemas experimentales que permitan evaluar la eficiencia de retención de las diferentes alternativas mecánicas de completación de pozos para control de arena en el Laboratorio de Mecánica de Perforación de PDVSA Intevep.			
Objetivos Específicos	Variables	Dimensiones	Indicadores	Técnicas / Instrumentos
Determinar las bases y criterios a considerar en el diseño de los sistemas experimentales para la evaluación de métodos de control de arena.	Premisas Bases y criterios de diseño Sistemas experimentales Control de arena	Materiales Esquemas Capacidad Espacio físico Aplicaciones Condiciones de operación	Resistencia Durabilidad Presiones Caudales Longitudes principales Temperatura Viscosidades	Juicio de expertos Análisis documental Bases de datos Cuadros comparativos Fichaje Gráficos explicativos Flujogramas

				Registro de notas
Establecer la estrategia a seguir para diseñar y construir los sistemas experimentales para la evaluación de métodos de control de arena en el Laboratorio de Mecánica de Perforación	Estrategia Procedimientos Diseño Construcción Sistemas experimentales Control de arena Laboratorio	Fortalezas y debilidades presentes en el laboratorio Condiciones para la construcción Características de los equipos	Infraestructura Recursos Personal Tipos de ensayos Compras Contrataciones Normas	Observación estructurada Juicio de expertos Lista de cotejo Gráficos explicativos Flujogramas Registro de notas
Diseñar los planes subsidiarios que conformen el plan de ejecución del proyecto en estudio.	Planes subsidiarios Plan de ejecución del proyecto	Alcance Costos Riesgos Tiempo Adquisiciones	Plan de Gestión de Alcance Plan de Gestión de Costos Plan de Gestión de Riesgos Plan de Gestión de Tiempo Plan de Gestión de Adquisiciones	Juicio de expertos Entrevistas no estructurada Observación estructurada Informes Lista de cotejo Gráficos explicativos Flujogramas Registro de notas
Estructurar el plan detallado de ejecución del diseño y construcción de los sistemas experimentales para la evaluación de métodos de control de arena.	Plan detallado de ejecución Diseño Construcción Sistemas experimentales	Actividades Recursos Tiempo	Definición de actividades Secuencia de actividades Estimación de recursos Estimación de duración Cronograma	Juicio de expertos Entrevistas no estructurada Observación estructurada Informes Lista de cotejo Gráficos explicativos Flujogramas Registro de notas

3.7. Estructura Desagregada de Trabajo

En la Figura 13 se presenta le estructura desagregada de trabajo (EDT) que fue propuesta para dar respuesta al problema planteado en la presente investigación.

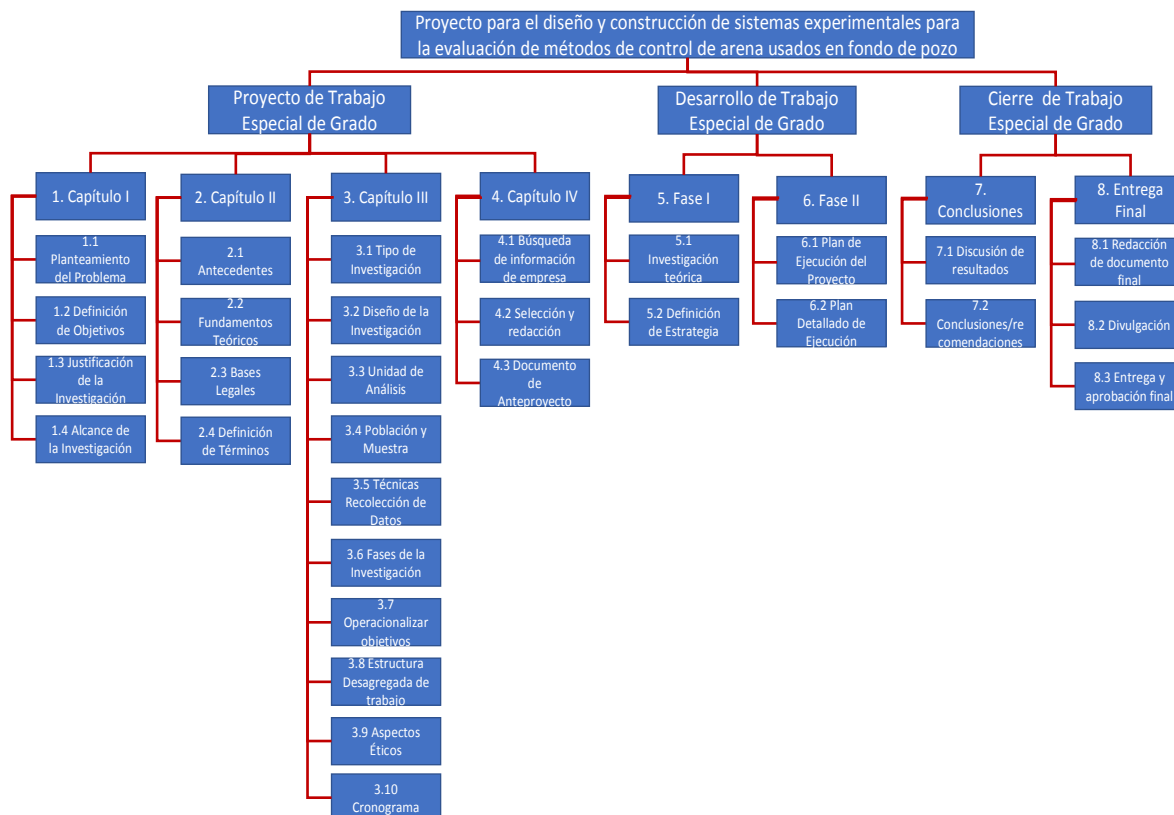


Figura 14. Estructura desagregada de trabajo (EDT/WBS) de la investigación

3.8. Aspectos Éticos

Los profesionales que se encuentran involucrados en el desarrollo de proyectos deben ser conscientes del impacto de su labor en la sociedad y en la calidad de vida, posición esta a la cual se llega por medio del dominio de determinadas técnicas y herramientas, pero sobre todo mediante un conjunto de valores que se requieren durante la prestación de ese servicio: honradez, honestidad, integridad, imparcialidad, entre otros. En este orden de ideas y con el propósito de infundir confianza en el presente trabajo de investigación, todas sus actividades que contempla y las diferentes decisiones estuvieron apegadas a los siguientes referentes institucionales: Código de Ética y Conducta Profesional del PMI (PMI,

2013), Código de Ética Profesional del Colegio de Ingenieros de Venezuela (CIV, 2012) y Política de Ética en el Negocio y Conflicto de Intereses de PDVSA Intevep (PDVSA Intevep, 2005).

3.9. Cronograma

En la Figura 14 se presenta el cronograma de actividades que sirvió de guía para la presente investigación, donde se ha fijado como fecha de inicio el 25 de enero de 2018, y como fecha de culminación el 20 de junio de 2018, para un total de 22 semanas de trabajo.

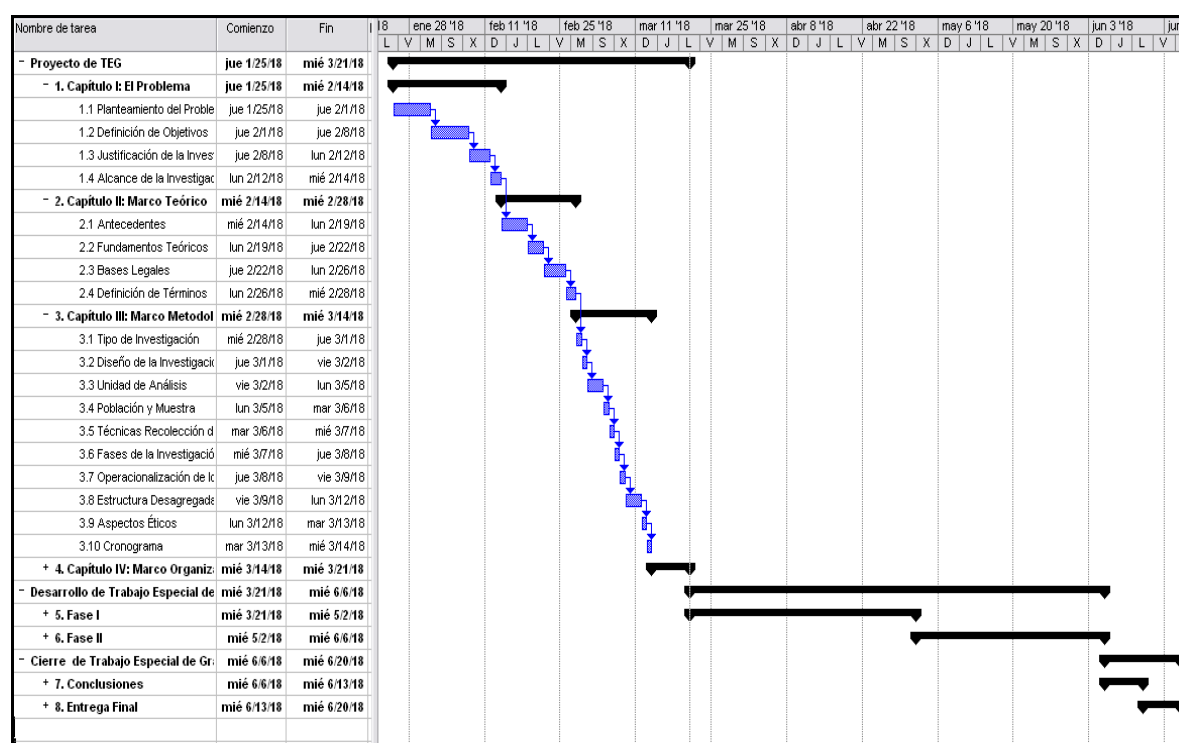


Figura 15. Cronograma de actividades de la investigación

3.10. Recursos

A continuación, en la Tabla 3 se presentan los recursos empleados para el desarrollo de cada una de las actividades que componen el proyecto, donde las unidades HH y UC representan Horas Hombre y Unidades de Crédito respectivamente:

Tabla 3. Matriz de recursos de la investigación

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario (Bs)	Total (Bs)
Asesor de Trabajo Especial de Grado	HH	30	15.000	450.000
Asesor Empresarial (1)	HH	40	17.500	700.000
Expertos empresariales (5)	HH	40	17.500	700.000
Estudiante de Postgrado (1)	HH	400	10.000	400.000
Inscripción de Seminario TEG	UC	3	112.000	336.000
Inscripción de TEG	UC	12	112.000	1.344.000
Viajes y traslados	N/A	N/A	N/A	19.000.000
Fotocopias e impresiones	N/A	N/A	N/A	420.000
Computadora con acceso a Internet	Estación	1	950.000	950.000
Papelería	N/A	N/A	N/A	600.000
Artículos de bases de datos y revistas	N/A	N/A	N/A	15.000.000
Total				39.900.000

CAPITULO IV: MARCO ORGANIZACIONAL

En este capítulo se presentan los principales aspectos organizacionales que conforman la estructura actual de PDVSA Intevep, empresa en la cual se está realizando la formulación del proyecto de diseño y construcción de sistemas experimentales para la evaluación de métodos de control de arena. La información y datos que se presenta a continuación, se obtuvo a partir del Manual de Organización de Intevep (PDVSA Intevep, 2010) y el Portal Corporativo de PDVSA (PDVSA, 2018).

4.1. Reseña histórica

Intevep es el brazo tecnológico de Petróleos de Venezuela, una filial de investigación cuya orientación estratégica es generar soluciones tecnológicas integrales, con especial énfasis en las actividades de Exploración, Producción, Refinación e Industrialización. De igual manera, es responsabilidad de Intevep, el resguardo del acervo tecnológico de PDVSA. Seguidamente se presenta una breve reseña histórica de la empresa:

1973: En agosto del año 1973, con la promulgación del Decreto Presidencial No. 1385, se crea la Fundación para la Investigación de Hidrocarburos y Petroquímica (Invepet), abriéndose así el camino a lo que constituye hoy el Centro de Investigación y Apoyo Tecnológico de la industria petrolera nacional.

1974: En febrero de 1974 se instala el Consejo de Administración de Invepet, que inicia los pasos para formular el programa de la organización y realizar el diagnóstico de transferencia tecnológica. En ese momento Invepet funcionaba en unas oficinas en Los Ruices, Caracas.

1976: Pasa a denominarse Instituto Tecnológico Venezolano del Petróleo (Intevep), manteniendo la figura jurídica de Fundación, y PDVSA se convierte en

su patrocinante, por lo cual se transforma en el Centro de Investigación y Desarrollo de la Industria Petrolera y Petroquímica Nacional.

1977: Se incorpora un grupo de 75 profesionales y técnicos del Centro de Petróleo y Química del IVIC, y se establece una estructura organizativa que comprende tres divisiones: Exploración y Producción, Refinación y Petroquímica, y Administración y Servicios.

1978: Entre julio y agosto de 1978, se efectúa la mudanza a la sede central, lo que permite dotar y poner en marcha un significativo número de laboratorios.

1979: En junio de 1979, Intevep se constituye en empresa mercantil, con carácter de filial de PDVSA. Se reorientan las políticas y actividades administrativas para cumplir con lo pautado en los estatutos de Intevep. Para esta época, Intevep dedicó, aproximadamente, su tiempo a: servicios de apoyo tecnológico (50 %), investigación aplicada y desarrollo (40 %), e investigación básica orientada (3 %).

Intevep jugó un papel significativo durante la contingencia de finales de 2002 y comienzos de 2003, cuando numerosos técnicos, especialistas y gerentes de la empresa asumieron voluntariamente la enorme responsabilidad de apoyar directamente las diferentes áreas afectadas por la acción del paro petrolero. Gracias a este apoyo, refinerías, plantas, campos e instalaciones en general, se mantuvieron operativas durante la crisis más dura que vivió la Corporación durante su historia. Juegan papel importante acciones como la certificación de combustibles, los equipos de respuesta rápida, los entrenamientos in situ a las personas que recién ingresaban, instrumentación de refinerías y atención a daños ambientales entre varias actividades.

Actualmente, Intevep continúa su importante labor como centro de soporte técnico y científico de la industria petrolera, bajo el lema de “Soberanía Tecnológica”, sin olvidar el papel de gran relevancia que le corresponde en el plano al respaldar y ejecutar cada uno de los programas que desarrolla el Gobierno Bolivariano: la Misión Ribas, cuya coordinación en el estado Miranda es responsabilidad de Intevep, las Misiones Barrio Adentro, Sucre, Robinson y Vuelvan Caras y, por

supuesto, el impulso al desarrollo endógeno, al cooperativismo y la economía social y a la integración latinoamericana.

4.2. Misión

“Valorar la base de hidrocarburos y los procesos productivos de PDVSA, mediante la investigación y el desarrollo de soluciones tecnológicas integrales, pertinentes y eficaces, dentro de las directrices de Plan Siembra Petrolera, con la participación y el protagonismo del talento humano articulado y comprometido en la construcción del Socialismo del Siglo XXI”. (PDVSA Intevep, 2010. p. 15)

4.3. Visión

“Ser el motor de la revolución técnico-científica de PDVSA para el desarrollo, la incorporación y transferencia de tecnologías, con visión sociopolítica, que impulse al país como potencia energética mundial sobre las bases del Plan Siembra Petrolera y los valores del Socialismo del Siglo XXI”. (PDVSA Intevep, 2010. p. 15)

4.4. Valores

PDVSA Intevep demanda de un personal técnicamente calificado con una formación integral en el orden científico, social y político impregnado en valores socialistas y humanistas para solucionar los múltiples problemas que se le presentan, con amplios conocimientos del negocio del cual forma parte, orientado a añadir valor a la Corporación. Para el cumplimiento de su Visión y Misión, PDVSA Intevep se apoya en los siguientes valores organizacionales:

4.4.1. Respeto por la gente:

- Preocupación genuina y sincera por los demás, considerar al otro como un ser legítimo en relación a uno mismo, respetando sus sentimientos y opiniones.
- Respeto y objetividad hacia las opiniones o prácticas de los demás, aunque sean contrarias a las propias.

4.4.2. Apego a principios éticos y morales:

- Actuar con estricto apego a los principios éticos y morales que reflejen honestidad, probidad, integridad, transparencia y humildad en cada una de nuestras acciones, dejando hacer todo lo que no dañe a otros ni afecte el cumplimiento de la visión y misión organizacional.
- Cumplir con el deber y administrar correctamente lo que tenemos a nuestro cargo.
- Ser coherentes y consistentes con nuestros pensamientos, emociones y acciones.
- Se fundamenta en la fuerza moral que guía la actuación de los trabajadores en todas sus áreas de acción y se expresa en el comportamiento íntegro observado por su personal en la vida familiar, profesional y social.

4.4.3. Justicia y equidad:

- Reconocer y valorar en cada individuo lo que le corresponde en términos de sus capacidades y aportes; así como ofrecer igualdad de oportunidades, en función de los intereses del equipo y la organización, buscando el beneficio del colectivo por encima del individualismo.
- Ser respetuoso de las diferencias socioculturales con imparcialidad.

4.4.4. Innovación:

- Compromiso permanente con todas las acciones que conduzcan a la generación de soluciones con criterios de creatividad e innovación, para lograr productos tecnológicos y servicios especializados soberanos, que representen beneficios tangibles para cualquier nivel de la organización, la comunidad y al país.
- Lograr la excelencia mediante una disposición permanente al mejoramiento continuo en la calidad de los procesos, productos y servicios.

4.4.5. Conciencia del deber social y solidaridad:

- Sentido del deber, conciencia de las responsabilidades, obligaciones y acciones asociadas al rol/puesto desempeñado, incluyendo la disposición para actuar desde la perspectiva de la seguridad, la higiene y el cuidado del ambiente.
- Pensar y estar consciente de las consecuencias de los actos realizados
- En la interacción laboral y gestión, demuestra compromiso con el país, sensibilidad con la comunidad, conciencia política, social y ambiental.
- Actuar y trabajar en equipo, combinando fuerzas para cumplir una meta, con sentido del bien común.
- Ejercer el liderazgo participativo con franco sentido de cooperación, confianza y apoyo con el equipo de trabajo.

4.5. Objetivos

Los principales objetivos de Intevep son desarrollar e implementar tecnologías para:

- Lograr un factor de recobro mínimo de 20% del Petróleo Original en Sitio en la Faja Petrolífera del Orinoco.
- Incrementar el factor de recobro de yacimientos maduros de crudos livianos y medianos.
- Transformar corrientes de los mejoradores y refinerías, para su uso como insumos químicos, petroquímicos y combustibles; en las operaciones de la industria.
- Maximizar el uso, en el país, de azufre y coque de Petróleo.
- Impulsar el desarrollo del Gas Costa Afuera.

- Minimizar el impacto ambiental de las actividades de la industria y proteger los ecosistemas de las zonas petroleras.
- Acelerar la captura, desarrollo, optimización y masificación de nuevas tecnologías a través de alianzas con otras empresas petroleras y de servicios, universidades y centros de investigación, nacionales e internacionales; con el fin de maximizar la valorización de nuestros hidrocarburos.
- Generar nuevas soluciones o captar tecnologías de estimulaciones químicas o mecánicas para restituir o mantener la productividad o la inyektividad de los pozos.
- Acelerar la investigación y desarrollo de esquemas de mejoramiento de crudo, que permitan obtener una alta calidad de producto con una baja producción de residuos sólidos, mediante procesos de transformación e industrialización, a bajos costos de inversión y operación.

4.6. Productos y servicios

Para dar respuesta a las necesidades de PDVSA y para afianzar el ejercicio de la soberanía nacional sobre los hidrocarburos, Intevep focaliza su esfuerzo en tres áreas medulares: Crudos Pesados y Extrapesados de la Faja Petrolífera del Orinoco, Gas Costa Afuera y Nuevos Desarrollos Cercanos a Campos Tradicionales en Áreas Tradicionales. De igual manera, concentra gran parte de sus recursos en mejorar el factor de recobro y en actividades de recuperación mejorada.

Intevep también desarrolla tecnologías propias en áreas con oportunidades diferenciales, impulsa la cooperación e integración con el sector técnico-científico e industrial de Venezuela y asegura, al mismo tiempo, la correcta gestión ambiental en las operaciones de PDVSA.

En cada una de estas áreas se realizan actividades de: investigación estratégica, investigación y desarrollo, ingeniería y asistencia técnica especializada, las cuales están integradas a los negocios de PDVSA en cuanto a transferencia y aplicación

de tecnologías que permitan cubrir integralmente, las diferentes fases de los negocios petrolero y gas: exploración, producción, manufactura, transporte y mercadeo.

La capacidad científica y tecnológica desarrollada por Intevep durante más de tres décadas, es la fuente generadora de la propiedad intelectual de PDVSA. Los productos tecnológicos en diferentes niveles de desarrollo, fortalecen la política de soberanía tecnológica impulsada por el Estado, a través del Ministerio de Energía y Petróleo, así como PDVSA.

A continuación se presenta un resumen del Portafolio Intelectual de PDVSA Intevep:

- Patentes.....799
- Marcas comerciales.....492
- Derechos de Autor/ copyrights.....112
- Depósito legal.....24
- Secretos comerciales/empresariales...13
- Nombres de dominio.....30

En Exploración y Producción se han impulsado 58 tecnologías comerciales, orientadas a productos y sistemas que se aplican en las actividades de perforación, rehabilitación y completación de pozos (fluidos de perforación, cementación de pozos y ambiente) y producción de petróleo.

En el área de Refinación e industrialización, se dispone de 44 tecnologías comerciales que responden a las necesidades de mejoramiento y optimización en calidad de productos, para conversión de crudos pesados y extra pesados, obtención de combustibles limpios y conversión de gas líquido y petroquímica.

4.7. Estructura de la organización (Organigrama)

En la Figura 15 se presenta el organigrama general de PDVSA Intevep, donde se resalta en color verde, la Gerencia Departamental de Construcción de Pozos, a la cual se encuentra adscrito el Laboratorio de Mecánica de Perforación.

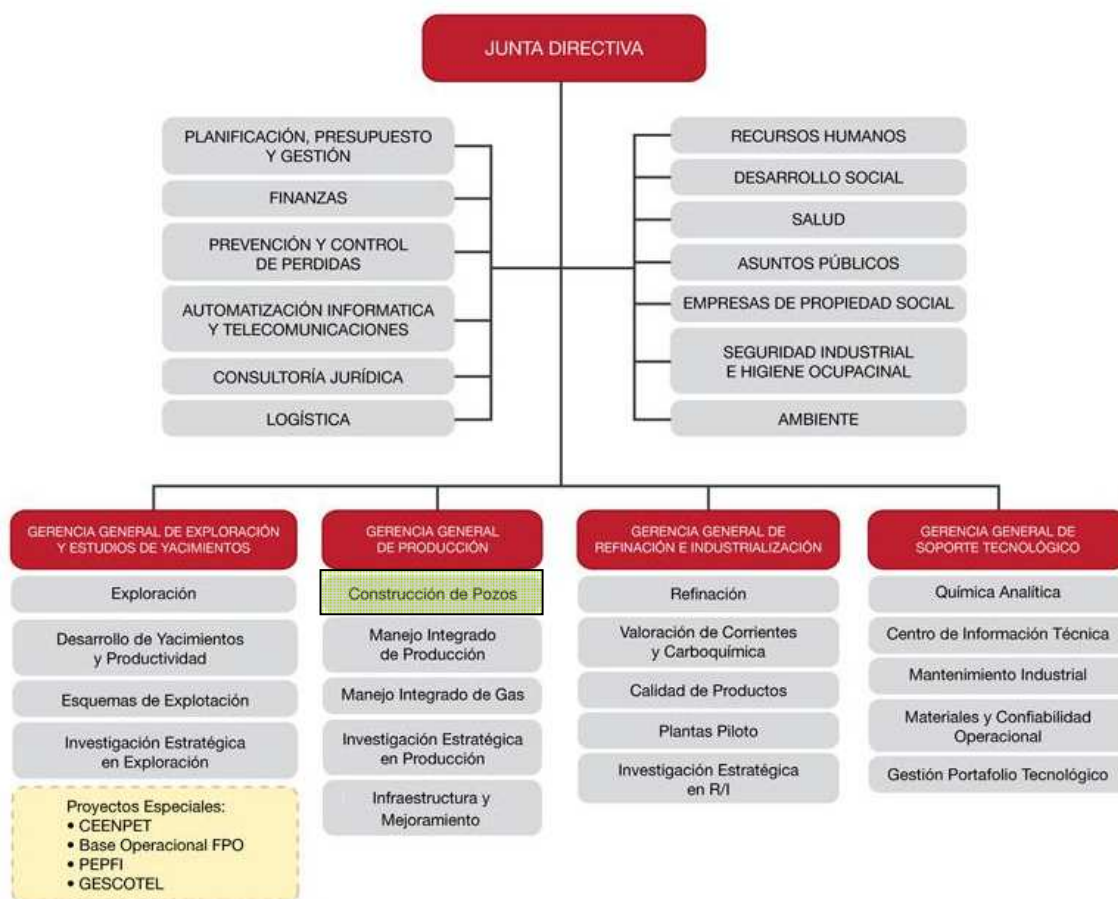


Figura 16. Organigrama general de PDVSA Intevep

Fuente: PDVSA (2018)

CAPITULO V: DESARROLLO DE LOS OBJETIVOS

En este capítulo se presentan los resultados del trabajo de investigación sobre los objetivos específicos trazados como solución al problema planteado. Mediante el análisis y los resultados de la investigación, se da a conocer y comprender cómo se estructuraron los soportes requeridos para desarrollar una propuesta con: a) la determinación de las bases y criterios de diseño de los sistemas experimentales, b) diseño de la estrategia a seguir para su diseño y construcción, c) los planes subsidiarios que integran el plan de ejecución del proyecto, d) plan detallado de ejecución del proyecto.

5.1. Objetivo 1: Determinar las bases y criterios a considerar en el diseño de los sistemas experimentales para la evaluación de métodos de control de arena

Existen dos tipos de configuraciones para los sistemas de pruebas para evaluación de medios filtrantes para control de arena en fondo de pozo (Ver Capítulo II, p. 42), uno es conocido como lechada de arena o *Slurry Test* y el otro es denominado prueba de empaque de arena o *Sand Pack Test*, los cuales han sido el resultado de investigaciones basadas en el desarrollo de mejores métodos de evaluación de medios filtrantes. Ambos sistemas de pruebas comprenden el manejo de cierta cantidad de partículas sólidas, las cuales serán suministradas por la mezcla formada por arena y un fluido de trabajo, así como también debe poseer las características que satisfagan las condiciones requeridas para el manejo de altos caudales de fluidos y el bombeo continuo de los mismos.

Producto de una exhaustiva investigación que permitió determinar los parámetros y variables que influyen en los ensayos, en el Laboratorio de Mecánica de Perforación se propone la instalación de sistemas experimentales para evaluación de medios filtrantes usados en fondo de pozo, bajo las dos configuraciones planteadas anteriormente. Los diseños deben ser realizados de tal forma que se aproveche al máximo los recursos disponibles en los laboratorios de la empresa, se realice un fácil ensamblaje de las partes y se garantice la reproducibilidad de

los ensayos. Con estas pruebas se busca optimizar la producción de hidrocarburos y disminuir el daño de equipos en superficie por la generación y el deficiente manejo de arena en superficie.

Las evaluaciones experimentales de medios filtrantes pueden ser utilizadas para comparar el desempeño de las diferentes alternativas mecánicas de completación de pozos para control de arena. Sin embargo, los resultados de estas pruebas son susceptibles a los arreglos y características de los equipos utilizados ya que pequeños cambios del conjunto experimental pueden representar grandes diferencias en los resultados. Adicionalmente, no se conocen los modos de falla de la mayoría de las formaciones y por lo tanto, estos no pueden ser replicados en el laboratorio. Por consiguiente, es difícil aplicar los resultados de estas pruebas de retención de arena con certeza en el campo.

Los métodos para simular las condiciones de deposición de la arena de formación durante la producción del pozo sobre el medio de retención de la misma (rejillas para completaciones a hoyo abierto o empaque con grava) deben emular dos escenarios diferentes de falla de la formación y deben ser considerados al realizar pruebas de laboratorio: a) falla gradual de la formación, y b) colapso de hoyo. A continuación se describen de forma breve ambos métodos:

a) Falla Gradual de la Formación: Este método simula la falla gradual de la formación con arena depositada sobre la rejilla en una lechada con baja concentración (5% v/v). En esta condición, pequeños o ningún puenteo de partículas ocurre a través de los orificios de la rejilla.

b) Colapso de hoyo: Este método simula una falla inminente del hoyo a causa de un flujo altamente concentrado de arena fluidizada sobre el medio filtrante a un diferencial controlado de presión.

Adaptando los sistemas experimentales a los dos escenarios posibles en el interior del pozo anteriormente señalados, es que se desarrollan dos tipos de ensayos denominados pruebas de retención de arena donde el colapso de hoyo está representado por la prueba de “empaque de arena” o *Sand Pack Test* y la falla

gradual de la formación está representada por la “prueba de lechada de arena” o *Slurry Test*.

Bases y criterios de diseño del sistema *Sand Pack Test*

El sistema de evaluación de medios filtrantes mecánicos de completación de pozos para control de arena tipo *Sand Pack Test*, o de empaque de arena, comprende una celda de prueba que contiene en la parte inferior el conjunto porta-cupón, con la muestra del medio filtrante a ensayar, y sobre este es colocado el empaque de arena de yacimiento o arena simulada preparada en el laboratorio. El empaque de arena es formado vertiendo la arena, previamente saturada con el fluido de trabajo, directamente dentro de la celda, y compactada sobre la muestra del medio filtrante a través de un sistema de pistón axial a una presión definida, no solo para evitar la formación de canales preferenciales de flujo a través de la arena sino también emular las condiciones de compactación en fondo de pozo (Ver Figura 17).

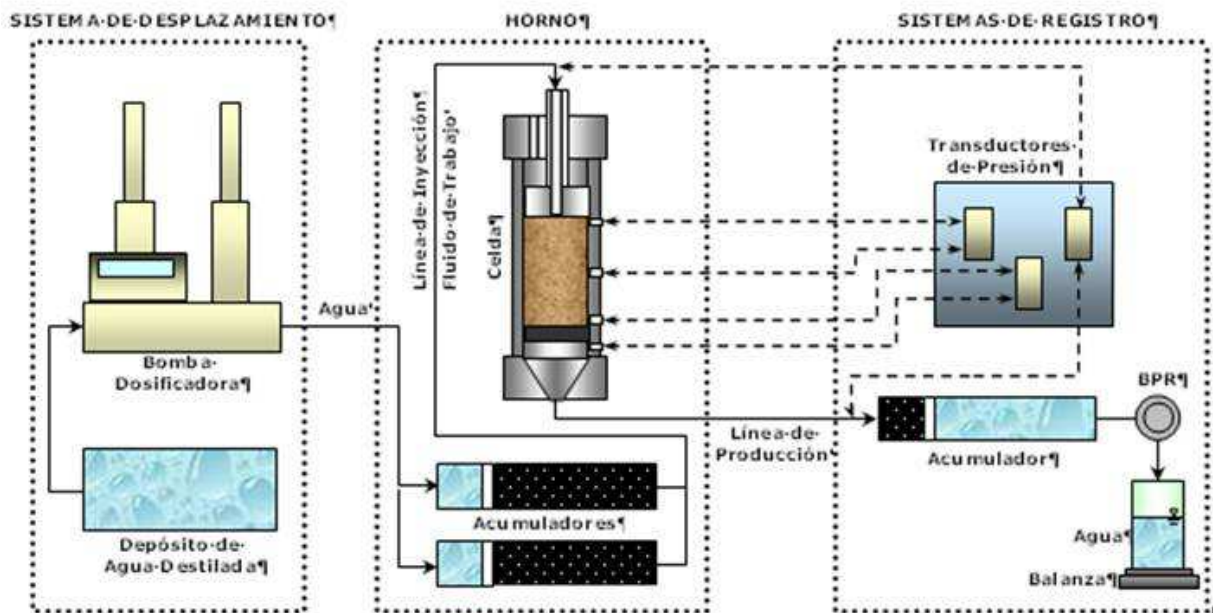


Figura 17. Diagrama propuesto del sistema de evaluación de medios filtrantes mecánicos de completación de pozos para control de arena tipo *Sand Pack Test*

Una vez que el empaque de arena está configurado, el fluido de trabajo se inyecta en el puerto superior de la celda utilizando una bomba dosificadora y acumuladores de pistón flotante. Este fluido atraviesa el empaque de arena y la muestra del medio filtrante para finalmente ser colectado en la salida inferior de la celda en proporciones con volumen definido. Estas muestras de fluido a la salida son luego separadas, secadas y pesadas para establecer la producción o el paso de arena hasta lograr la estabilización del sistema; que en el caso de pruebas a caudal constante, esta se logra al alcanzar la estabilización del diferencial de presión a través de la celda de prueba; y en el caso de pruebas a diferencial de presión constante, al estabilizarse el caudal de desplazamiento.

Independientemente de la configuración de la prueba, caudal de desplazamiento constante o diferencial de presión constante a través de la celda, son monitoreadas constantemente el caudal y presión de desplazamiento y los diferenciales de presiones generados (a través de toda la celda, a través del medio filtrante y a través del empaque de arena).

En base a la experiencia que han tenido diferentes laboratorios en el desarrollo de pruebas del tipo *Sand Pack Test*, se ha evidenciado que el tipo de fluido a desplazar y la mojabilidad del núcleo de arena con respecto a este fluido, son factores que pueden afectar el fenómeno de puenteo de los granos de arena sobre el medio filtrante. Es así como Ballard (2006), por ejemplo, en la Tabla 4, reporta los siguientes resultados de producción de sólidos para diferentes fluidos de desplazamiento, a través de una misma arena y medio filtrante.

Tabla 4. Efecto del tipo de fluido de trabajo en la producción de arena obtenida de las pruebas tipo *Sand Pack Test*

Rejilla Evaluada	Fluido	Arena producida [g]
150 DTW	Metanol	0,0272
150 DTW	Salmuera	0,0854 0,0912
150 DTW	Aceite	0,0027

Fuente: Ballard, 2006

Considerando que el principal parámetro reológico que afecta el movimiento de los sólidos en la prueba es la viscosidad, cuando se requiera emular de la mejor manera posible las condiciones de yacimiento en este tipo de pruebas, se propone el uso de fluidos alternativos tales como aceite mineral o fluidos siliconados, con una viscosidad similar a la del crudo en el yacimiento, bajo condiciones de producción en frío o por recuperación térmica (Ver Tabla 5). En todo caso, la celda propuesta permitirá el manejo tanto de crudo como de estos otros fluidos alternativos, con un mejor control de la expansión térmica durante el establecimiento de la presión de confinamiento.

Tabla 5. Fluidos a utilizar en las pruebas del tipo *Sand Pack Test*

Tipo de Fluido	Ventajas	Desventajas
Agua	Facilidad de manipulación y limpieza. Bajo costo	No ofrece buena dispersión de sólidos en núcleos de formación. Turbulencia genera flujo no Darcy.
Salmuera	Buena dispersión de sólidos en arenas con alta arcillosidad.	El fluido producido se debe diluir, para separar los sólidos. Turbulencia genera flujo no Darcy. No reproduce la viscosidad del crudo del yacimiento.
Metanol	Buena dispersión de sólidos en arenas de baja arcillosidad.	Alto costo. Riesgos de seguridad e higiene en el laboratorio.
Acete	Se puede reproducir la viscosidad del crudo del yacimiento.	Alto costo. No se puede reciclar. Dificultad en la medición de sólidos producidos.
Fluido siliconado	Se puede reproducir la viscosidad del crudo del yacimiento. Fácil manipulación.	Alto costo. No se puede reciclar.
Fluido polimérico	Se puede reproducir la viscosidad del crudo del yacimiento. Fácil manipulación.	Sólidos del fluido pueden alterar resultados de la prueba. Producto biodegradable.
Crudo	Mejor ajuste a las condiciones del yacimiento.	Riesgos de seguridad e higiene en el laboratorio. Necesidad de trabajar a altas temperaturas.

La celda a construir debe responder a la necesidad que tiene el Laboratorio de Mecánica de Perforación de adecuar los equipos y espacio disponible para la

ejecución de pruebas experimentales de medios filtrantes usados en fondo de pozo. En base a la experiencia adquirida en diferentes pruebas de desplazamiento realizadas con otros equipos, además del estado del arte desarrollado, se establecen las siguientes premisas de diseño que garanticen la construcción de una celda apropiada para los estudios de control de arena a realizar:

- El ensamble de la celda, debe ser rígido para evitar deformaciones por efecto de las presiones de desplazamiento y confinamiento.
- El diseño de la celda deberá ser ajustado para su uso en el permeámetro disponible en el Laboratorio de Mecánica de Perforación, utilizando los diferentes sistemas que posee el equipo.
- Debido a que los fluidos de trabajo son corrosivos, deberá considerarse para la fabricación de la celda un material resistente a la corrosión y que cumpla con las condiciones de carga de la prueba.
- La configuración de la celda será de flujo vertical descendente.
- La definición del diámetro interior de la celda deberá considerar que el diseño del porta cupón será compatible con la otra celda de evaluación de medios filtrantes mecánicos de completación de pozos para control de arena tipo *Slurry Test*.
- Para la compactación del empaque de arena, será utilizado un sistema de pistón axial, accionado por agua, por medio del sistema de confinamiento del permeámetro disponible en el Laboratorio de Mecánica de Perforación.
- A pesar de que el sistema de confinamiento del permeámetro disponible en el Laboratorio de Mecánica de Perforación alcanza una presión máxima de 8.000 psi (55,2 MPa), se considerará para el diseño de la celda una presión máxima de 5.000 psi (34,5 MPa).
- La tapa inferior de la celda tendrá un fondo cónico para evitar que las partículas sólidas producidas durante la prueba se acumulen sobre esta.

- Aún cuando las bombas del sistema de desplazamiento del permeámetro disponible en el Laboratorio de Mecánica de Perforación están ajustadas para manejar caudal constante, se considerará para el diseño de la celda la condición de desplazamiento del fluido de trabajo a diferencial de presión constante a través de la celda.
- La altura de empaque de arena dentro de la celda será de 15 centímetros. Para pruebas con grava, se considerará una altura de 3 centímetros del total disponible para el empaque de arena.
- Se colocarán puertos de presión que permitan la medición del diferencial de presión generados a través de toda la celda, medio filtrante, empaque de arena, y en caso de empaques de grava, a través del empaque de grava.
- Se debe garantizar el sello hidráulico entre las partes móviles de la celda, a la condición de máxima presión de confinamiento.
- No se considerarán cargas térmicas en los cálculos de resistencia mecánica, sin embargo, se deberán seleccionar materiales para la celda que no tenga una gran pérdida de propiedades mecánicas con el aumento de la temperatura.

La celda a construir debe tener la versatilidad para manejar diferentes tipos de fluidos, siendo el agua o salmueras algunos de ellos. De esta manera, para evitar riesgos de corrosión en el interior de la celda, factor que pudiera afectar el desempeño de los sellos hidráulicos, se propuso el uso de acero inoxidable, como material para las diferentes partes de la celda. Sin embargo, los aceros inoxidables normalmente usados en la industria tienen baja resistencia mecánica, es así como aceros austeníticos de especificación AISI 304 o AISI 316 tienen una resistencia a la fluencia aproximada de 210 MPa y 250 MPa, respectivamente.

Dadas las condiciones de alta presión que se busca manejar con la celda, es necesario el uso de aceros inoxidables con mejores propiedades mecánicas. Haciendo una revisión de la ingeniería de diferentes componentes y equipos de alta presión usados en el Laboratorio PVT de Intevep, se pudo observar que, en

general, estos se encuentran fabricados de acero inoxidable de especificación 17-4PH.

El acero 17-4PH, equivalente a los de especificación AISI 630, UNS S17400 tipo 630, ASTM A564 tipo 630 y al JIS SUS 630, es un acero inoxidable martensítico por precipitación, que combina resistencia y dureza, con una excelente resistencia a la corrosión. Ensayos de laboratorio y las aplicaciones prácticas han demostrado que en todas las condiciones de envejecido su comportamiento es superior al de los aceros endurecibles 420, 431 y 410, manteniendo la facilidad de maquinado.

Bases y criterios de diseño del sistema *Slurry Test*

Se considera que la prueba de lechada de arena o *Slurry Test* es la que mejor representa el escenario de falla gradual de la formación, en el cual se simula como su nombre lo indica, la falla progresiva de la formación con arena depositada sobre la rejilla en una lechada con baja concentración (4-5% v/v). En esta condición, pequeños o ningún puenteo de partículas ocurre a través de los orificios de la rejilla.

Las pruebas de retención de arena del tipo *Slurry Test*, corresponden a uno de los sistemas experimentales mas ampliamente empleados en la industria petrolera, para la evaluación del desempeño de los medios filtrantes mecánicos para el control de arena en el fondo de pozo.. Este tipo de prueba se fundamenta en un montaje experimental en el cual una mezcla entre la arena y un fluido (que tiene como función principal, mantener suspendidos los granos de arena) se hace pasar a través de un cupón de rejilla o tubería ranurada ubicada en el interior de una celda de prueba.

En la configuración propuesta para este ensayo (Figura 18), la lechada de arena se encuentra formada por granos de arena dispersos en agua viscosificada y contenidos en un recipiente que posee un pistón de transferencia (conocido también como “acumulador”). A la salida del acumulador, la lechada de arena se mezcla con agua que fluye a través de una tubería de pequeño diámetro.

En el sistema que se propone en esta investigación, ambos fluidos (lechada de arena y agua) se encuentran en el interior de un eductor en el cual se combinan y se produce una nueva dispersión de los granos de arena. La salida del eductor se ubica justo antes de la entrada a la celda de prueba que contiene en su interior un dispersor estático. La nueva lechada entra en la celda y pasa por el dispersor estático y finalmente llega al cupón de rejilla o tubería ranurada, según sea el caso. La lechada de arena se hará fluir a 5 cc/min y el agua de relleno fluirá a 500 cc/min, dando una velocidad de inyección de 0,5 g/min en el interior del eductor. Cuando la arena alcanza el cupón de rejilla, la lechada ha perdido su viscosidad debido a la gran cantidad de dilución. El efluente de la prueba es recolectado en alícuotas y filtrado para obtener el peso y cantidad de la arena que pasa por la rejilla.

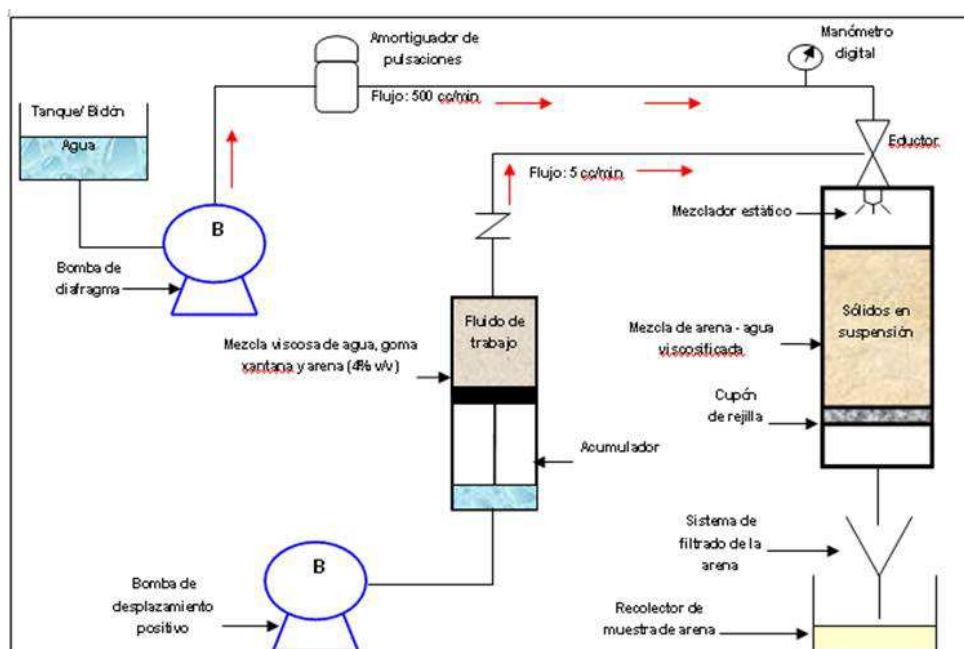


Figura 18. Diagrama propuesto del sistema de evaluación de medios filtrantes mecánicos de completación de pozos para control de arena tipo *Slurry Test*

La suspensión de las partículas de arena es el principio fundamental de la prueba *Slurry Test* para garantizar la reproducibilidad de los resultados durante todo el desarrollo del ensayo. Para cumplir con la condición de suspensión de las partículas sólidas y recreando el escenario presente en fondo de pozo, se

utilizarán fluidos viscosificados formados a partir de polímeros, tales como: la goma xantano, la goma guar y la glicerina. Estos polímeros fueron analizados por diversos autores quienes, mediante pruebas experimentales, comprobaron la estabilidad (suspensión) de las partículas de arena logrando a su vez, la reproducibilidad de los resultados e indicaron que en la selección del polímero que se emplea para crear el fluido viscosificado se debe asegurar el efecto de arrastre. Asimismo, los autores señalan que para la prueba Slurry Test, el polímero debe ser diluido y mezclado con un volumen significativo de agua antes de alcanzar el cupón de rejilla y establecen una comparación entre goma xantano, goma guar y glicerina. Estos autores determinaron que la goma xantano se absorben en silicatos, limos y arena formando tortas de filtración más restrictivas, mientras que la glicerina y la goma guar son miscibles con agua y no tienen efecto sobre los resultados por taponamiento, además de ser polímeros que pueden ser absorbidos por la arena (Ballard 1999; 2003).

Las ventajas y desventajas del empleo de fluidos a base de polímeros en la formación de la lechada de arena se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Ventajas y desventajas de los fluidos usados para la formación de la lechada de arena

Tipo de Fluido	Ventajas	Desventajas
Agua	Facilidad de manipulación y limpieza. Bajo costo	No ofrece buena dispersión de sólidos en núcleos de formación. Turbulencia genera flujo no Darcy.
Fluido polimérico	Se puede reproducir la viscosidad del crudo del yacimiento. Fácil manipulación.	Debe diluirse bien ya que los sólidos del fluido pueden alterar resultados de la prueba. Producto biodegradable.

Un factor importante y determinante en los resultados de las pruebas de retención (*Sand Pack Test* y *Slurry Test*) es el origen de la arena seleccionada para el ensayo. En años recientes, las arenas sintéticas han sido usadas en varios

estudios debido a que por lo general, no se cuenta con una muestra de arena del yacimiento suficiente para realizar las pruebas de retención de arena. Por esta razón, resulta necesario hacer una reproducción de la arena del yacimiento, a partir de ensayos granulométricos realizados a núcleos tomados en los pozos.

Se ha establecido que con arenas de yacimiento, la cantidad de sólidos producida durante la prueba *Slurry Test* es mayor que en la de *Sand Pack Test*. Sin embargo, con arenas sintéticas esta tendencia puede revertirse. Lo anterior, se fundamenta en las desventajas que presentan las arenas sintéticas frente a las arenas de yacimiento:

- Las arenas sintéticas tienden a estar compuestas de sílice puro y pueden ser muy fuertes si se humedecen con agua.
- En las arenas sintéticas, la forma del grano y su angularidad son probablemente diferentes a las de la arena de yacimiento análoga.
- En las arenas sintéticas, las distribuciones de tamaño de partícula tienden a ser bimodales o trimodales, lo que por lo general es muy difícil de igualar, especialmente con la información obtenida de la difracción por rayos láser.

Para desarrollar las pruebas en el sistema experimental *Slurry Test* diseñado, se utilizará una muestra de arena limpia que representa el yacimiento que se requiere estudiar. Sin embargo, cuando la muestra de arena del yacimiento no es suficiente, ésta puede ser reproducida a partir de estudios granulométricos efectuados en núcleos del yacimiento (arena sintética).

Para reproducir la arena de yacimiento con la granulometría deseada, se somete una cantidad determinada de arena a un proceso de tamizado en seco, el cual consiste en la colocación de la muestra de arena en la parte superior de un juego de tamices, uno debajo del otro con una secuencia de reducción sucesiva del tamaño de la apertura de la malla. Obtenida la muestra de arena representativa del yacimiento, se combina con el fluido polimérico y se genera la lechada de arena necesaria para el ensayo.

Para realizar el diseño de la celda de prueba fue necesario establecer un conjunto de premisas o condiciones que deben cumplirse para el correcto desempeño de la celda dentro del montaje experimental de la prueba de lechada de arena. Estas premisas se enuncian a continuación:

- El material del que se fabricará el cuerpo cilíndrico de la celda debe ser un material preferiblemente liviano (bajo peso), que pueda resistir las presiones a las cuales estará sometido que oscilaran entre 150 y 200 psi.
- La celda debe fabricarse de un material cristalino, transparente, que permita la observación directa de lo que sucede en su interior durante el desarrollo de la prueba. Asimismo, debe ser un material resistente a la corrosión, de acuerdo a las características de los fluidos de trabajo.
- La configuración de la celda será de flujo vertical descendente.
- Las dimensiones en el interior de la celda deben ser compatibles con las del portacupón, el cual será un elemento común para la prueba *Slurry Test* y para la *Sand Pack Test*.
- La altura máxima estimada de la cama de arena dentro de la celda será de aproximadamente 4 centímetros.
- El diseño debe tomar en consideración la colocación del dispersor estático en el extremo superior del cuerpo cilíndrico de la celda.
- La tapa superior de la celda debe poseer la conexión necesaria para la colocación del eductor.
- La tapa inferior de la celda tendrá un fondo cónico para evitar que las partículas sólidas producidas durante la prueba se sedimenten en su interior. La gravedad favorece la salida de las partículas sólidas de la celda, con lo que se quiere lograr una cuantificación más exacta.
- Se colocarán puertos de presión que permitan la medición del diferencial de presión generado en diferentes puntos: global de la celda (diferencial entre la

entrada y el efluente), a través de la cama de arena desarrollada sobre el medio filtrante y en el medio filtrante.

Uno de los aspectos más importantes considerado para el desarrollo las pruebas de retención de arena del tipo *Slurry Test*, es la observación directa de la proyección de los granos de arena sobre la rejilla al tiempo que se produce la evolución de la altura de la cama de arena formada. Es por ello, que se ha propuesto la construcción de la celda del sistema experimental del polímero polimetilmetacrilato o mejor conocido como plexiglás, el cual entre sus características destaca su transparencia (alrededor del 92%) y fácil mecanizado.

5.2. Establecer la estrategia a seguir para diseñar y construir los sistemas experimentales para la evaluación de métodos de control de arena en el Laboratorio de Mecánica de Perforación

Con el propósito de establecer la estrategia a seguir para diseñar y construir los sistemas experimentales en el Laboratorio de Mecánica de Perforación, se desarrolló un análisis de alternativas, a través del uso de la herramienta “Matriz Multicriterio”, la cual permite soportar una toma de decisiones en base a factores cualitativos o a múltiples factores no homogéneos que intervienen en un suceso. Para ello se siguieron los pasos que se explican a continuación:

1. En primer lugar se definió con mucha claridad el problema o situación a evaluar. En este caso se trata de determinar la mejor alternativa para instalar los sistemas experimentales para estudios de control de arena en el Laboratorio de Mecánica de Perforación de PDVSA Intevep. Estos constituyen una solución tecnológica a los problemas de producción de arena en los pozos de la Faja Petrolífera del Orinoco.

2. Luego se listaron un conjunto de alternativas sobre la cual se quiere seleccionar o priorizar. El equipo del proyecto determinó las siguientes alternativas:

a) Contratar la ingeniería, procura y construcción de ambos sistemas experimentales con un proveedor de servicios foráneo: Una vez realizada la inteligencia tecnológica con recursos propios, se identificaría los proveedores de

servicios foráneos capaces de diseñar y construir los sistemas experimentales y se daría inicio a un proceso de contratación. El personal técnico de PDVSA Intevep viajaría al exterior periódicamente para revisar los documentos de ingeniería, hacer el seguimiento a la construcción y probar los sistemas experimentales antes de su despacho a Venezuela. Por supuesto, los costos son relativamente altos, el proceso de contratación complejo, pero esta alternativa puede ser garantía de contar con los sistemas experimentales en el corto plazo.

b) Contratar la ingeniería, procura y construcción del sistema *Sand Pack Test* con un proveedor de servicios foráneo, y construir el sistema *Slurry Test* en PDVSA Intevep: Teniendo en cuenta que el sistema experimental *Sand Pack Test* es el mas adecuado para realizar estudios de control de arena en la Faja Petrolífera del Orinoco, se propone no escatimar costos con este sistema, contratando su diseño y construcción con un proveedor de servicios foráneo. El intercambio técnico y experiencia alcanzada con el proveedor seleccionado, durante el diseño y construcción del sistema *Sand Pack Test*, se utilizaría como base para hacer lo propio con el sistema *Slurry Test* en las instalaciones de PDVSA Intevep. Con esta alternativa se buscaría reducir costos, se daría valor agregado al trabajo en el laboratorio de mecánica de perforación, pero el tiempo de entrega del sistema *Slurry Test* puede verse comprometido, debido al alto volumen de trabajo y disponibilidad de materiales en los talleres de PDVSA Intevep.

c) Diseñar y construir ambos sistemas experimentales en PDVSA Intevep: Esta sería la alternativa “hecho en casa”, representando el objetivo estratégico que busca apalancar la soberanía tecnológica en la industria petrolera nacional. Una vez realizada la inteligencia tecnológica, el diseño y construcción de los sistemas experimentales dependerá de la propia experiencia del personal técnico de PDVSA Intevep. Indudablemente esta representa la opción de menor costo, la garantía de protección de la propiedad intelectual así como de diseño ajustado a las necesidades y limitaciones reales del Laboratorio de Mecánica de Perforación, sin embargo el tiempo de ejecución del proyecto puede verse altamente comprometido, debido a la curva de aprendizaje que se debe recorrer.

d) Realizar la ingeniería de diseño de ambos sistemas experimentales mediante convenio con universidades nacionales y hacer la construcción en PDVSA Intevep:

Con esta alternativa se busca reconocer la creatividad e innovación de las universidades nacionales y la posibilidad de que estas apoyen, junto con la industria, en la solución de problemas reales que se presentan en las áreas operacionales de PDVSA. Como aspecto negativo, se destacan experiencias anteriores de disputas con algunas universidades nacionales por la propiedad intelectual de desarrollos alcanzados en conjunto, asunto que para esta oportunidad deberá abordarse mediante el establecimiento de cláusulas de confidencialidad bien precisas y detalladas. El tiempo de entrega de los sistemas experimentales sería a mediano o largo plazo, y los costos relativamente bajos.

e) Realizar la ingeniería de diseño de ambos sistemas experimentales en PDVSA Intevep y hacer la construcción contratando los servicios de talleres mecánicos nacionales:

Siendo uno de los principales problemas en PDVSA Intevep la lentitud con la que se desarrollan los procesos de procura de equipos y materiales, se propone contratar la construcción de los sistemas experimentales con talleres mecánicos nacionales, una vez que se hayan culminado los procesos de ingeniería de diseño con personal técnico de PDVSA Intevep. De esta manera se estaría apalancando la producción nacional, mediante el establecimiento de relaciones con la empresa privada. Al igual que la alternativa anterior, se debe tener especial cuidado con el establecimiento de las cláusulas de confidencialidad.

3. Se identificaron los criterios de priorización o selección. Para este trabajo de investigación estudio se propusieron los siguientes:

a) Costos: se refiere a la inversión necesaria para realizar contrataciones, compra de materiales/equipos, y acondicionamiento del Laboratorio de Mecánica de Perforación.

b) Tiempo: relacionado con la fecha requerida para la puesta en servicio de los sistemas experimentales en el laboratorio.

c) Soberanía Tecnológica: grado en la cual la alternativa se alinea con las políticas de la empresa orientadas a garantizar la independencia en el desarrollo de tecnologías. También implica el grado de protección de la propiedad intelectual generada.

d) Valor agregado: se refiere al grado en el cual la alternativa aporta al desarrollo de conocimiento y acervo tecnológico de la empresa.

e) Producción Nacional: alineación de la alternativa con el incentivo y apoyo al aparato productivo nacional.

f) Adaptabilidad: grado en el cual la alternativa se adapta a los sistemas experimentales ajustados a las necesidades reales del cliente, espacio y facilidades disponibles en el Laboratorio de Mecánica de Perforación

g) Complejidad: relacionado con el esfuerzo que debe realizar el capital humano propio para materializar la alternativa.

h) Mantenimiento: grado de dificultad asociado al mantenimiento preventivo y correctivo de la alternativa, lo cual implica costos, transporte, almacenaje, manejo de materiales, entre otros.

i) Automatización: relacionado con las facilidades de operación de las pruebas a desarrollar con los sistemas experimentales y la forma como se capturan los datos de las mismas.

j) Contratación: relacionado con la facilidad que se ejecutarían los procesos de contratación asociados a la alternativa.

Para todos estos criterios se establece un rango de puntuación de 0 a 5, siendo 0 la condición menos favorable, y 5 la condición más favorable.

4. Se ponderaron los criterios de selección en base a su importancia relativa. Para este trabajo de investigación se le ha dado la misma ponderación a todos los criterios ($P = 1$).

5. Se construyó la matriz de puntuación, donde se anotaron la lista de alternativas, los criterios y las puntuaciones. Se usó el software Microsoft Excel para realizar la matriz de este caso de estudio.

6. Se valoraron las alternativas y se hizo el análisis y evaluación correspondiente, para seleccionar la más adecuada para el proyecto. A continuación en la Tabla 7 se presenta la “Matriz Multicriterio” con la valoración de las alternativas correspondientes.

Tabla 7. Matriz multicriterio usada para definir estrategia a seguir en el diseño y construcción de los sistemas experimentales

Alternativas	Costos P=1		Tiempo P=1		Soberanía Tecnológica P=1		Valor Agregado P=1		Producción Nacional P=1		Adaptabilidad P=1		Complejidad P=1		Mantenimiento P=1		Automatización P=1		Contratación P=1		Total
	V	VxP	V	VxP	V	VxP	V	VxP	V	VxP	V	VxP	V	VxP	V	VxP	V	VxP	V	VxP	
Contratar la ingeniería, procura y construcción de ambos sistemas experimentales con un proveedor de servicios foráneo	0	0	5	5	0	0	2	2	0	0	3	3	5	5	5	5	5	5	1	1	26
Contratar la ingeniería, procura y construcción del sistema "Sand Pack Test" con un proveedor de servicios foráneo, y construir el sistema "Slurry Test" en PDVSA Intevep	2	2	4	4	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	33
Diseñar y construir ambos sistemas experimentales en PDVSA Intevep	4	4	0	0	4	4	5	5	5	5	5	5	1	1	2	2	1	1	5	5	32
Realizar la ingeniería de diseño de ambos sistemas experimentales mediante convenio con universidades nacionales y hacer la construcción en PDVSA Intevep	3	3	1	1	2	2	2	2	5	5	4	4	2	2	2	2	2	2	3	3	26
Realizar la ingeniería de diseño de ambos sistemas experimentales en PDVSA Intevep y hacer la construcción contratando los servicios de talleres mecánicos nacionales	2	2	2	2	3	3	4	4	5	5	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	32

Luego en función del análisis realizado con la “Matriz Multicriterio”, se seleccionó la alternativa número 2 para llevar a cabo el proyecto; es decir, contratar la ingeniería, procura y construcción del sistema *Sand Pack Test* con un proveedor de servicios foráneo y construir el sistema *Slurry Test* en PDVSA Intevep.

Esto refleja una estrategia en la cual se pretende, en primer lugar, acelerar el proceso de construcción del sistema *Sand Pack Test*, de mayor aplicabilidad para

la Faja Petrolífera del Orinoco, donde se necesitan obtener resultados en el corto plazo, y en segundo lugar, llevar a cabo un proceso de transferencia de conocimientos, desde el proveedor foráneo con mayor experiencia en el diseño de equipos de retención de arena hacia el personal técnico del Laboratorio de Mecánica de Perforación, que sumada a la Inteligencia Tecnológica desarrollada sentarán las bases para el diseño y construcción del sistema *Slurry Test*. Así pues, se busca un balance entre el uso de los recursos propios, que implica la necesidad de asignar mas personal al proyecto, con mayor tiempo de ejecución, y la contratación de servicios foráneos, que implica mayores costos y un tiempo de ejecución mas rápido.

Con la finalidad de realizar la mejor selección del proveedor de servicios para el diseño y construcción del sistema *Sand Pack Test* se recomienda consultar con responsables de otros laboratorios de PDVSA Intevep, tales como: Interacción Roca Fluido, Daños a la Formación, Polímeros, Interacciones Físico Químicas, sobre su experiencia en la adquisición y mantenimiento de equipos de medición de permeabilidad, los cuales guardan un cierto grado de similaridad con el equipo para estudios de control de arena propuesto. Esto permitirá, además, adelantar los contactos con esos proveedores y determinar sus fortalezas y debilidades para efectos de construir el sistema *Sand Pack Test* según los requerimientos de diseño y alcances determinados por el equipo del proyecto.

Se debe garantizar que desde el proceso de contratación del proveedor de servicios foráneo, se incluyan las cláusulas necesarias para la transferencia de conocimiento en el diseño, operación y mantenimiento del sistema *Sand Pack Test* construido, así como las cláusulas de confidencialidad asociadas al diseño propio y propiedad intelectual de los equipos y sistemas generados por el equipo del proyecto. Para el caso de la transferencia de conocimiento, se deben establecer los hitos en la planificación, en los cuales el equipo del proyecto viajará a la sede del proveedor externo con el propósito de adelantar la logística correspondiente con suficiente tiempo de anticipación.

Finalmente, se recomienda involucrar al personal técnico del Taller Mecánico de PDVSA Intevep en el diseño del sistema *Slurry Test*, que garantice la generación de un diseño de celda y componentes factibles de construir con las máquinas herramientas y materiales disponibles en la empresa. Esto permitirá, además, que se desarrolle un compromiso e interés de ese personal, perteneciente a otra Gerencia Departamental, con la ejecución exitosa y logro de los objetivos del proyecto, garantizando la construcción del sistema *Slurry Test* en el menor tiempo posible.

5.3. Diseñar los planes subsidiarios que conformen el plan de ejecución del proyecto en estudio

Con este objetivo se busca documentar las acciones necesarias para definir, preparar, integrar y coordinar los planes subsidiarios mas importantes en un plan integral para la dirección del proyecto. Se consideraron para este objetivo los siguientes planes subsidiarios: plan de gestión del alcance, plan de gestión de costos, plan de gestión de riesgos, plan de gestión del tiempo y plan de gestión de adquisiciones.

5.3.1. Plan de Gestión del Alcance

La definición del alcance del proyecto la realiza el personal del Laboratorio de Mecánica de Perforación y Profesionales ID Soporte adscritos a la Gerencia Departamental de Construcción de Pozos de PDVSA Intevep, con la guía y coordinación del Tutor de la Pericia de Mecánica de Perforación , haciendo uso de las herramientas: juicio de expertos, análisis de datos y reuniones. Seguidamente se hace la descripción del alcance del proyecto:

- Se diseñarán dos sistemas experimentales para evaluar el desempeño de las alternativas mecánicas para completación de pozos. El primero será del tipo *Sand Pack Test*, para simular las condiciones de yacimientos o formaciones consolidadas y medianamente consolidadas. El segundo será del tipo *Slurry Test*, para simular las condiciones de yacimientos o formaciones no consolidadas.

- Los sistemas experimentales diseñados deben satisfacer las condiciones de limitaciones de espacio y facilidades de servicios, así como los requisitos de seguridad, higiene y ambiente para su instalación en el Laboratorio de Mecánica de Perforación de PDVSA INTEVEP.
- Se diseñarán dos celdas para los ensayos de control de arena, una para cada uno de los sistemas experimentales propuestos y los procesos de diseño constarán de diferentes etapas para definir: geometría, espesores de pared, sellos hidráulicos, conexiones, roscas e instrumentación requerida en los sistemas, entre otros aspectos determinantes, para la configuración y ejecución satisfactoria de los ensayos. Sin embargo, el conjunto porta cupón, donde se aloja la muestra de la alternativa mecánica de completación a evaluar, debe ser compatible con las dos celdas propuestas.
- Las celdas diseñadas utilizando los procedimientos y criterios de falla tradicionales de la ingeniería de materiales, deberán ser sometidas a una verificación por medio del uso de simulación numérica asistida por computadora, utilizando el método de elementos finitos.
- Las evaluaciones experimentales de medios filtrantes pueden ser utilizadas para comparar el desempeño de las diferentes alternativas mecánicas de completación de pozos para control de arena. Sin embargo, los resultados de estas pruebas no pueden ser escalados a una aplicación real en campo, ya que estos son susceptibles a los arreglos y características de los equipos utilizados pues pequeños cambios del conjunto experimental pueden representar grandes diferencias en los resultados.
- Los sistemas experimentales diseñados tendrán la capacidad de manejar diferentes tipos de fluidos, que permita profundizar en el estudio de las diferentes variables que afectan el desempeño de los medios filtrantes, con la condición de que sean limpios, para no afectar el funcionamiento de válvulas, transductores y tuberías.

- Considerando que el principal parámetro reológico que afecta el movimiento de los sólidos en la prueba es la viscosidad, cuando se requiera emular de la mejor manera posible las condiciones de yacimiento en el tipo de prueba *Sand Pack Test*, se propone el uso de fluidos alternativos tales como aceite mineral o fluidos siliconados, con una viscosidad similar a la del crudo en el yacimiento, bajo condiciones de producción en frío o por recuperación térmica. En todo caso, la celda propuesta permitirá el manejo tanto de crudo como de estos otros fluidos alternativos, con un mejor control de la expansión térmica durante el establecimiento de la presión de confinamiento.
- Para el caso del sistema *Sand Pack Test*, la celda a construir debe ser rígida para evitar deformaciones por efecto de las presiones de desplazamiento y confinamiento, con configuración de flujo vertical y adicionalmente debe tener la versatilidad para manejar diferentes tipos de fluidos, siendo el agua o salmueras algunos de ellos. Para evitar riesgos de corrosión en el interior de la celda, factor que pudiera afectar el desempeño de los sellos hidráulicos, se propuso el uso de acero inoxidable, como material para las diferentes partes de la celda.
- Para el caso del sistema *Slurry Test*, uno de los aspectos más importantes considerado para el desarrollo de este tipo de pruebas, es la observación directa de la proyección de los granos de arena sobre la rejilla al tiempo que se produce la evolución de la altura de la cama de arena formada. Es por ello, que se ha propuesto la construcción de la celda del sistema experimental del polímero polimetilmetacrilato o mejor conocido como plexiglás, el cual entre sus características destaca su transparencia (alrededor del 92%) y fácil mecanizado. Al igual que para el sistema *Sand Pack Test*, la configuración de la celda será de flujo vertical descendente.

A continuación, en la Figura 19, se presenta la Estructura Desagregada de Trabajo (EDT) propuesta para el proyecto.

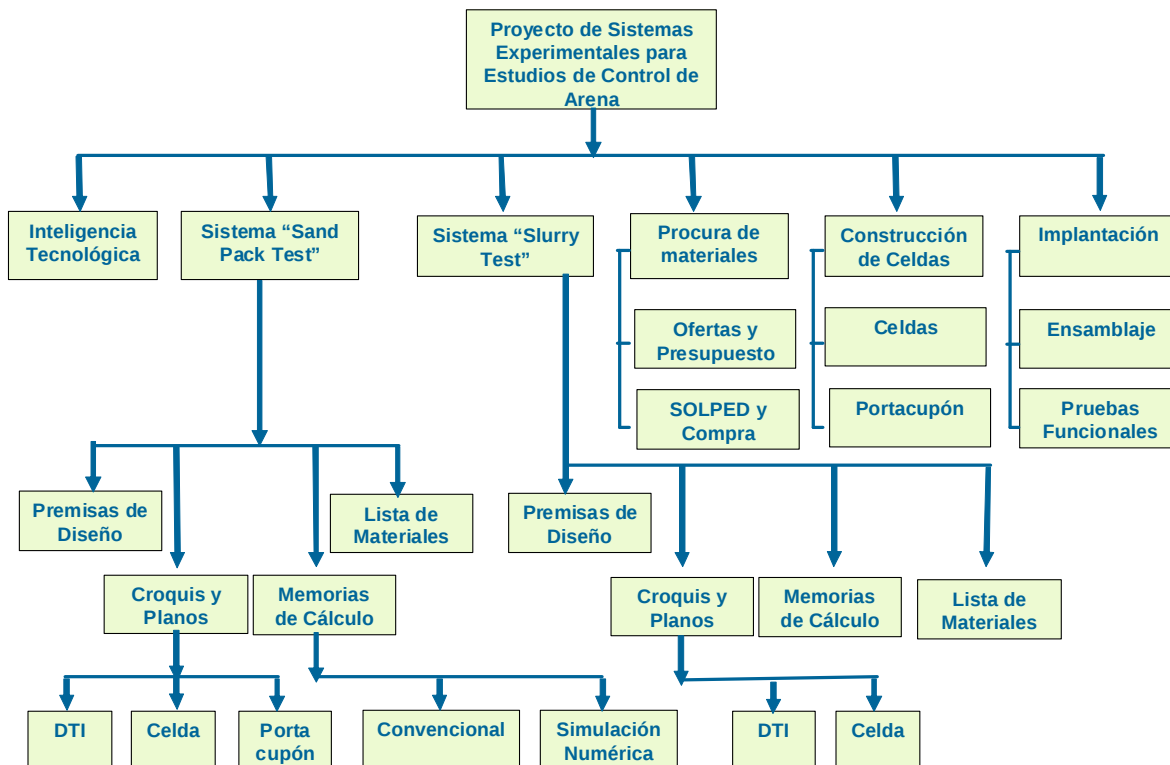


Figura 19. Estructura desagregada de trabajo (EDT) propuesta para el proyecto

Es necesario destacar que el alcance y estructura desagregada de trabajo propuestos para el proyecto, deben ser aprobados por el Jefe del Proyecto de Desarrollos en Construcción de Pozos y Gerente Departamental de Construcción de Pozos.

Como parte de la gestión del alcance del proyecto, se han identificado los siguientes entregables:

- Inteligencia tecnológica resultante de una investigación bibliográfica en bases de datos internacionales de ingeniería, ciencias y patentes
- Planos de celdas y sistemas experimentales
- Informe de memorias de cálculos de resistencia asociados a las celdas
- Informe de verificación de diseños vía simulación numérica
- Lista de materiales para cada sistema experimental

- Sistemas experimentales ensamblados en el Laboratorio de Mecánica de Perforación y probados con una matriz de ensayos amplia
- Protocolo de montaje y ejecución de ensayos en los sistemas experimentales *Sand Pack Test* y *Slurry Test*

La aceptación formal de cada uno de estos entregables del proyecto, pasará en primer lugar por la revisión de los profesionales del Laboratorio de Mecánica de Perforación, Profesionales ID Soporte y Tutor de Pericia de Mecánica de Perforación, para finalmente ser aprobados por el Jefe de Proyecto de Desarrollos en Construcción de Pozos y Gerente Departamental de Construcción de Pozos.

5.3.2. Plan de Gestión de Costos

Como parte del Plan de Gestión de Costos del proyecto, se realizó un presupuesto con la precisión y detalle que se necesita para la aprobación y ejecución definitiva del proyecto, siendo entonces el presupuesto más probable para solicitar la aprobación de fondos correspondiente. Se tomaron en cuenta las siguientes premisas:

1. Se toma el tabulador de salarios del Colegio de Ingenieros de Venezuela (Marzo, 2018), como valor de referencia de las Horas Labor del personal técnico asociado a las partidas de ingeniería de los diseños.
2. Los tiempos de ejecución estimados, necesarios para el cálculo de costos, se establecieron tomando como referencia el desempeño del personal técnico de PDVSA Intevep en proyectos similares ejecutados con anterioridad.
3. El costo en dólares americanos (USD) de los entregables, materiales y equipos asociados a la construcción del sistema *Sand Pack Test*, se establecieron tomando como referencia a proyectos de adquisición de equipos para medición de retorno de permeabilidad ejecutados en el pasado. Estos equipos tienen componentes similares a los que requerirá el sistema experimental *Sand Pack Test*.

A continuación en la Figura 20 y Figura 21 se presenta el presupuesto elaborado para el proyecto, dividido por partidas de: construcción, consultoría, equipos y outsourcing, donde los montos han sido especificados bolívares (Bs.) y en dólares americanos (USD).

Figura 20. Presupuesto del Proyecto, Parte 1: Diseño y construcción de sistema experimental Slurry Test

PRESUPUESTO PARTIDAS DE CONSTRUCCIÓN (APU) (COVENIN)

PARTIDAS DE CONSTRUCCION	MATERIALES (Bs)	EQUIPOS (Bs)	MANO DE OBRA (Bs)	PRESTACIONES(160%)	GANANCIAS (20%)	PRECIO (Bs)
1. Construcción de Sistema Slurry Test						
Celda	12000000	3000000	4500000	7200000	5340000	32040000
Acumuladores	9750000	2700000	3300000	5280000	4206000	25236000
Arreglo de tuberías	11250000	0	2100000	3360000	3342000	20052000
Separador líquido-sólido	6450000	0	1425000	2280000	2031000	12186000
2. Ensamblaje de Sistemas Experimentales						
Ensamblaje de Sistema Slurry Test	22500000	0	3750000	6000000	2400000	14400000
Facilidades de Sistema Slurry Test	52500000	0	4500000	7200000	3390000	20340000
Ensamblaje de Sistema Sandpack Test	60000000	9000000	4800000	7680000	5496000	32976000
Facilidades de Sistema Sandpack Test	52500000	2250000	6300000	10080000	4776000	28656000
3. Pruebas Funcionales						
Prueba funcional de Sistema Slurry Test	34500000	1800000	3150000	5040000	2688000	16128000
Prueba funcional de Sistema Sandpack Test	27000000	1800000	4200000	6720000	3084000	18504000

TOTAL CONSTRUCCION: 220518000

PRESUPUESTO PARTIDAS DE CONSULTORIA (CIV)

PARTIDAS DE CONSULTORIA	VSP (Bs/Hora)	ESTIPENDIO (Bs/Hora)	G. REEMBOLSABLES (Bs/Hora)	TARIFA HORARIA (Bs/Hora)	TOTAL H/H	PRECIO (Bs)
1. Inteligencia Tecnológica						
Horas de profesional P1 Mecánico	57180	8580	20000	28600	400	22872000
Horas de profesional P1 Procesos	97180	8580	60000	28600	640	62195200
Horas de Profesional P9 Procesos	100008	21348	7500	71160	120	12000960
2. Diseño de Sistema Slurry Test						
Horas de profesional P1 Procesos	37180	8580	0	28600	200	7436000
Horas de profesional P3 Procesos	61730	12330	8300	41100	600	37038000
Horas de profesional P3 Mecánico	61730	12330	8300	41100	500	30865000
Horas de profesional Técnico 3	48550	8250	12800	27500	960	46608000
Horas de Profesional P9 Procesos	95508	21348	3000	71160	250	23877000

TOTAL CONSULTORIA: 242892160

PRESUPUESTO PARTIDAS DE EQUIPO

PARTIDAS DE EQUIPO	UNIDADES	ALQUILER/COMPRA (Bs)	TOTAL (Bs)
1. Equipos para Sistema Slurry Test			
Bomba dosificadora	1	1440000000	1440000000
Bomba de desplazamiento positivo	1	3000000000	3000000000
Bomba de vacío	1	3750000000	3750000000
Acumulador para bomba de desplazamiento	1	1200000000	1200000000

TOTAL EQUIPO: 2235000000

Figura 21. Presupuesto del Proyecto, Parte 2: Diseño y construcción de sistema experimental *Sand Pack Test*

PRESUPUESTO OUTSORCING

PARTIDAS DE OUTSOURCING	UNIDADES	SUMA GLOBAL (USD)	TOTAL (USD)
1. Diseño de Sistema Sandpack Test			
Compañía OFITE	1	31000	31000
2. Adquisición de Sistema Sandpack Test			
Compañía OFITE	1	97000	97000
3. Pruebas del Sistema Sandpack Test			
Compañía OFITE	1	8500	8500

TOTAL OUTSORCING: 136500

TOTAL PRESUPUESTO (Bs): 2698410160

TOTAL PRESUPUESTO (USD): 136500

TOTAL ESTIMACION (Bs): 2155438322

TOTAL ESTIMACION (USD): 125000

DIFERENCIA (Bs): 542971838

DIFERENCIA (USD): 11500

Se realizaron dos presupuestos para el proyecto, uno en bolívares para todas las partidas que pueden ejecutarse con empresas, proveedores y consultoras venezolanas, a las cuales se les puede pagar con moneda venezolana; y otro en dólares americanos para esas partidas de *outsourcing* destinadas a materializar un sistema experimental *Sand Pack Test* en el laboratorio, lo cual amerita tecnología y conocimientos especializados, con los que no cuentan empresas del país. Es necesario destacar que para la elaboración del presupuesto de consultoría, se utilizó la metodología del cálculo del Valor de los Servicios Profesionales (VSP), que incluye los componentes de estipendios, reembolsables y tarifas horarias, tal como lo establece el “Manual de contratación de servicios de consultoría de ingeniería, arquitectura y profesiones afines” del Colegio de Ingenieros de Venezuela (CIV, 2005).

Las mayores diferencias entre la estimación de costos inicialmente realizada y el presupuesto sometido para el proyecto, se encuentran en las partidas calculadas en bolívares. Esto por dos razones fundamentalmente:

- Para el momento de la realización de la estimación inicial no se contaba con el conocimiento de las normas y documentos que rigen la elaboración de los presupuestos, por lo cual no se habían incluido los componentes de estipendios, gastos reembolsables y prestaciones, considerando que se está elaborando el presupuesto desde el punto de vista de la consultora y empresa.
- Se incluyó un mayor nivel de detalle en el presupuesto, al ser comparado con la estimación inicial, se desglosaron las partidas y se realizó un análisis de los sueldos y costos asociados a cada una de las partidas.
- Se sinceraron los precios asociados a cada una de las partidas, los cuales habían sido subestimados inicialmente y ahora resultan bastante afectados por el proceso inflacionario que vive el país y la paridad cambiaria con el dólar americano.

Por otra parte, las partidas de *outsourcing* presupuestadas para el sistema experimental *Sand Pack Test*, no presenta mucha variación con respecto a la estimación inicial de costos, debido a que se realizó con juicio de especialistas con alta experiencia en la adquisición de este tipo de equipos y, además, se realizaron los cálculos en divisas o dólares americanos, la cual es una moneda sólida frente a la situación económica del país.

Para facilitar el control presupuestario del proyecto, se realizó una herramienta de cálculo en Microsoft Excel, basado en la técnica del Manejo del Valor Ganado. A continuación se explican las características del diseño de esta herramienta de cálculo:

- La hoja permite introducir la Fecha de Estado, lo cual nos indica el punto en el tiempo en el cual se encuentra el proyecto.
- La hoja incluye un plan de desembolsos basado en el cronograma y presupuesto del proyecto. Este es importante, porque nos permite determinar los Costos Planeados, en función de la Fecha de Estado.
- Se marcan en color verde las columnas libres para carga de datos por parte del usuario, específicamente: Porcentaje de Ejecución y Costos Reales.
- La hoja permite el cálculo de los indicadores del desempeño, tanto para el proyecto total como para el trabajo en progreso. Esto es una tendencia actual en el Manejo del Valor Ganado, ya que evita el enmascaramiento de la situación actual del proyecto, con indicadores de actividades que para la Fecha de Estado no se está ejecutando.
- Se marcan en color amarillo los indicadores mas importantes del proyecto, tanto para el proyecto total como para el trabajo en progreso.

En la Figura 22 se presenta una visualización de la herramienta de cálculo diseñada para el control presupuestario del proyecto.

Fecha de Estado	25-Jan-19
-----------------	-----------

Código	WBS	Fecha Inicio	Fecha Fin	% Ejecución	Costo Base	PROYECTO TOTAL		
						Costo Planeado (PV)	Valor Ganado (EV)	Costo Real (AC)
	1.1. Inteligencia Tecnológica							
A	Horas de profesional P1 Mecánico	1-Apr-17	1-Jun-17	100	5092060	5092060	5092060	6150000
B	Horas de profesional P1 Procesos	1-Apr-17	1-Jun-17	100	13267296	13267296	13267296	14000000
C	Horas de Profesional P9 Procesos	1-Apr-17	1-Jun-17	100	2110500	2110500	2110500	3500000
	1.2. Diseño de Sistema Slurry Test							
D	Horas de profesional P1 Procesos	1-Dec-17	1-May-18	100	1746030	1746030	1746030	2200000
E	Horas de profesional P3 Procesos	1-Dec-17	1-May-18	100	12183300	12183300	12183300	15000000
F	Horas de profesional P3 Mecánico	1-Dec-17	1-May-18	100	10152750	10152750	10152750	10000000
G	Horas de profesional Técnico 3	1-Dec-17	1-May-18	100	21835200	21835200	21835200	22000000
H	Horas de Profesional P9 Procesos	1-Dec-17	1-May-18	100	4771875	4771875	4771875	5200000
	2.1. Equipos para Sistema Slurry Test							
I	Bomba dosificadora	1-Jun-18	1-Aug-18	100	96000000	96000000	96000000	98000000
J	Bomba de desplazamiento positivo	1-Jun-18	1-Aug-18	100	20000000	20000000	20000000	21000000
K	Bomba de vacío	1-Jun-18	1-Aug-18	100	25000000	25000000	25000000	24000000
L	Acumulador para bomba de desplazamiento	1-Jun-18	1-Aug-18	100	8000000	8000000	8000000	7500000
	3.1. Diseño de Sistema Sandpack Test							
M	Compañía OFITE	1-Jun-17	1-Feb-18	100	106795000	106795000	106795000	112000000
	3.2. Adquisición de Sistema Sandpack Test							
N	Compañía OFITE	1-Mar-18	1-May-18	100	334165000	334165000	334165000	332000000
	3.3. Pruebas del Sistema Sandpack Test							
O	Compañía OFITE	1-Jun-18	30-Jun-18	100	29282500	29282500	29282500	35000000
	4.1. Construcción de Sistema Slurry Test							
P	Celda	1-Sep-18	1-Nov-18	100	2136000	2136000	2136000	6500000
Q	Acumuladores	1-Sep-18	1-Nov-18	100	1682400	1682400	1682400	2300000
R	Arreglo de tuberías	1-Sep-18	1-Nov-18	100	1336800	1336800	1336800	1500000
S	Separador líquido-sólido	1-Sep-18	1-Nov-18	100	812400	812400	812400	1200000
	4.2. Ensamblaje de Sistemas Experimentales							
T	Ensamblaje de Sistema Slurry Test	1-Dec-18	1-Feb-19	40	960000	640000	384000	560000
U	Facilidades de Sistema Slurry Test	1-Dec-18	1-Feb-19	55	1356000	904000	745800	830000
V	Ensamblaje de Sistema Sandpack Test	1-Jul-18	1-Sep-18	90	2198400	2198400	1978560	2100000
W	Facilidades de Sistema Sandpack Test	1-Jul-18	1-Sep-18	90	1910400	1910400	1719360	2500000
	4.3. Pruebas Funcionales							
X	Prueba funcional de Sistema Slurry Test	1-Mar-19	30-Mar-19	0	1075200	0	0	0
Y	Prueba funcional de Sistema Sandpack Test	1-Mar-19	30-Mar-19	0	1233600	0	0	0
	TOTAL				705102711	702021911	701196831	725040000

Figura 22. Visualización de hoja de control presupuestario del proyecto

Los conceptos que son necesarios dominar para aplicar la técnica del Valor Ganado son los siguientes:

Valor Planeado o Costo Presupuestado del Trabajo Planeado (PV – BCWS):

Es el costo planeado de la cantidad total de trabajo programado a ser realizado para la fecha propuesta.

Costo Real o Costo Real del Trabajo Realizado (AC – ACWP): Costo incurrido para llevar a cabo el trabajo que se ha realizado hasta la fecha.

Valor Ganado o Costo Presupuestado del Trabajo Realizado (EV – BCWP): Es el costo planeado (no real) para completar el trabajo que se ha realizado.

A partir de estas definiciones se pueden derivar los siguientes indicadores:

Variación del Programa (SV): Es una comparación entre la cantidad de trabajo realizado durante un período de tiempo dado y lo que se había programado para ser ejecutado. Una variación negativa significa que el proyecto está atrasado en el cronograma.

$$SV = EV - PV$$

Variación de Costo (CV): Es una comparación entre el costo presupuestado del trabajo realizado y el costo real. Una variación negativa que el proyecto está por encima del presupuesto.

$$CV = EV - AC$$

Índice de Desempeño de la Programación (SPI): Muestra el valor del trabajo realizado comparado con lo que se había planeado.

$$SPI = EV / PV$$

Índice de Desempeño de Costos (CPI): Muestra cuántas unidades de dinero de trabajo se obtuvieron para la cantidad de unidades de dinero gastadas en el trabajo.

$$CPI = EV / AC$$

Índice Costo – Programación (CSI): Engloba los dos indicadores anteriores como una medida general del desempeño del proyecto. Mientras mas se aleje CSI de 1, menor es la posibilidad de que el proyecto se recupere.

5.3.3. Plan de Gestión de Riesgos

Atendiendo a las buenas prácticas de Gerencia de Proyectos, establecidas por el Project Management Institute (PMI) en el PMBOK (2017), se realizó en primer lugar la identificación de los riesgos, a los cuales se les asigna un valor de impacto y probabilidad. Se definió entonces una escala de impacto, sobre el costo, tiempo, alcance y calidad del proyecto, que va desde el 1 al 9, correspondiendo un impacto “muy bajo” al número 1 y un impacto “muy alto” al número 9. De manera similar, se definió una escala de probabilidad de ocurrencia del riesgo, que va desde 10% al 90 %, siendo “muy poco probable” el 10% y “altamente probable” el 90 %.

Una vez definido la forma en que se medirá la probabilidad y el impacto en el proyecto, fue necesario definir el nivel de riesgo, lo cual se logra multiplicando la probabilidad y el impacto. Para realizar un mejor estudio se usó una matriz de análisis cuantitativo como las propuestas por el PMBOK (2017), la cual se muestra en la Figura 23.

		Amenazas					Oportunidades				
Impacto	9	0,9	2,7	4,5	6,3	8,1	8,1	6,3	4,5	2,7	0,9
	7	0,7	2,1	3,5	4,9	6,3	6,3	4,9	3,5	2,1	0,7
	5	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	4,5	3,5	2,5	1,5	0,5
	3	0,3	0,9	1,5	2,1	2,7	2,7	2,1	1,5	0,9	0,3
	1	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	0,9	0,7	0,5	0,3	0,1
		10%	30%	50%	70%	90%	90%	70%	50%	30%	10%
		Probabilidad									

Figura 23. Matriz de análisis cuantitativo de riesgos del proyecto

Esto permitió adoptar un método para comparar cualitativamente los diferentes riesgos que vayan apareciendo en un proyecto. El área color rojo corresponde a un “nivel de riesgo alto”, el área color verde a un “nivel de riesgo bajo”, mientras que el área color amarillo corresponde a un “nivel de riesgo moderado”.

Para complementar el análisis, se calificaron cada uno de los riesgos según el nivel de control que se puede ejercer sobre ellos, por medio de las actividades o tareas de respuesta a riesgos. Se establece pues una escala de nivel de control que va desde 1 hasta 9, correspondiendo un control “muy bajo” al número 1 y un control “muy alto” al número 9.

A continuación en la Tabla 8 se presenta la matriz de riesgos elaborada para el proyecto de instalación de sistemas experimentales para estudios de control de arena en el Laboratorio de Mecánica de Perforación.

Tabla 8. Matriz de riesgos del proyecto

Descripción del Riesgo	Respuesta al Riesgo	Impacto	Probabilidad	Nivel de Riesgo Numérico	Nivel de Riesgo Relativo	Nivel de Control
Retrasos en contratación	Mitigación: Solicitar la asesoría de personal de la Gerencia Departamental que haya realizado procesos de contratación similares con anterioridad, de manera que sus lecciones aprendidas permitan al personal del proyecto ser mas eficientes en la contratación. Además, se solicitaría que este proceso de contratación lo guíe el personal de Finanzas con más experiencia	9	70,00%	6,3	Alto	5
Retrasos en los procesos de procura y compra de materiales	Mitigación: Hacer una investigación previa de proveedores de materiales y equipos, a los cuales se les haya hecho compras similares a las requeridas por el proyecto, verificar su disponibilidad de productos y hacer las recomendaciones pertinentes al personal de Bariven	6	90,00%	5,4	Alto	2
Retrasos en taller mecánico de PDVSA Intevep	Mitigación: Involucrar a personal del taller mecánico en la fase de diseño de celdas y partes, de manera de lograr el compromiso de estos con el proyecto, así como también generar la orden de servicio con suficiente de anticipación	5	30,00%	1,5	Bajo	7
Fallas en la simulación numérica de la celda "Sand Pack Test"	Mitigación: Realización de una mesa de trabajo en las instalaciones del fabricante del sistema, donde el personal de PDVSA Intevep servirá de mediador para garantizar que se le entregue a los especialistas en simulación numérica, información clara y precisa para hacer el trabajo de la celda de manera adecuada	3	10,00%	0,3	Bajo	8
Recortes en el presupuesto	Mitigación: Elaborar un plan de contingencia que involucre la potencial participación de las Universidades nacionales y el uso de material disponible en laboratorios y almacenes de PDVSA Intevep.	9	60,00%	5,4	Alto	2
Confiabilidad de los proveedores de productos y servicios	Mitigación: Seleccionar sólo proveedores de productos y servicios que cuenten con sistemas de gestión de la calidad instalados y las certificaciones correspondientes a sus líneas de servicio	2	20,00%	0,4	Bajo	7

1) Retrasos en contratación: Dado que PDVSA es una empresa del Estado, el proceso de contratación del proveedor de servicios foráneo para realizar la ingeniería, procura y construcción del sistema experimental *Sand Pack Test*, se debe apegar a la Ley de Contrataciones Públicas y normativas internas, lo cual en la mayoría de los casos puede tomar un tiempo considerable y ser un factor que afecte los tiempos de ejecución del proyecto. Con la finalidad de reducir los riesgos de retraso por contratación, se propone solicitar la asesoría de personal de la Gerencia Departamental que haya realizado procesos de contratación similares con anterioridad, de manera que sus lecciones aprendidas permitan al personal del proyecto ser mas eficientes en la contratación de la empresa que construirá el

sistema *Sand Pack Test*. Además, se solicitaría que este proceso de contratación lo guíe el personal de Finanzas con más experiencia.

2) Retrasos en los procesos de procura y compra de materiales: Todos los procesos de procura y compra de materiales en PDVSA son llevados a cabo por medio de su filial Bariven, implicando una centralización que consta en la mayoría de los casos de trámites lentos que traen como consecuencia frecuentes retrasos en la adquisición y entrega de materiales y equipos. El proyecto de sistemas experimentales para el Laboratorio de Mecánica de Perforación no escapa a esta realidad, y, en el caso particular de la construcción del sistema *Slurry Test*, el retraso asociado a los procesos de procura y compra de Bariven afectarán las tareas de construcción, instalación y puesta a punto del mismo, así como la generación de protocolos de ensayos. Se propone pues, como estrategia para la mitigación de este tipo de riesgos, hacer una investigación previa de proveedores de materiales y equipos, a los cuales se les haya hecho compras similares a las requeridas por el proyecto, verificar su disponibilidad de productos y hacer las recomendaciones pertinentes al personal de Bariven en las ordenes SOLPED generadas.

3) Retrasos en taller mecánico de PDVSA Intevep: Los trabajos de fabricación de piezas del sistema *Slurry Test* se realizarán en el taller mecánico de PDVSA Intevep, para lo cual debe generarse una orden de servicio y esperar a que su personal técnico tenga la disponibilidad para hacer el trabajo, por lo tanto la rapidez con que se ejecuten estas piezas dependerá de la lista de prioridades y volumen de trabajo del taller mecánico. Para mitigar los riesgos de retraso en la construcción del sistema *Slurry Test* se propone involucrar a personal del taller mecánico en la fase de diseño de celdas y partes, de manera de lograr el compromiso de estos con el proyecto, así como también generar la orden de servicio con suficiente de anticipación.

4) Fallas en la simulación numérica de la celda “Sand Pack Test”: Debido a las altas presiones a manejar, la verificación del diseño de la celda *Sand Pack Test* se realizará mediante simulación numérica, a través de un proveedor de

servicios especializados externo, y su éxito en el modelado, así como la obtención de resultados confiables, dependerá de la buena comunicación que establezca el equipo de ingeniería en el suministro de datos e información necesaria para la simulación. Para mitigar este riesgo se propone en el cronograma la realización de una mesa de trabajo en las instalaciones del fabricante del sistema, donde el personal de PDVSA Intevep servirá de mediador para garantizar que se le entregue a los especialistas en simulación numérica, información clara y precisa para hacer el modelaje de la celda lo mas apegado a la realidad posible.

5) Recortes en el presupuesto: Siendo PDVSA una operadora estatal cuyo funcionamiento depende del comportamiento del mercado petrolero y que, adicionalmente, debe responder a las necesidades del Estado, es probable que se produzcan recortes en el presupuesto disponible para el proyecto, dada la situación de inestabilidad económica del país, lo que pudiera afectar el alcance establecido, o limitar en tiempo y calidad las piezas fabricadas por terceros. Para mitigar este riesgo, sobretodo en la construcción del sistema *Sand Pack Test* que involucra un presupuesto en dólares americanos, se propone elaborar un plan de contingencia que involucre la potencial participación de las Universidades nacionales y el uso de material disponible en laboratorios y almacenes de PDVSA Intevep. Se requiere entonces garantizar la vigencia de los convenios con las Universidades del país y un inventario mínimo de materiales en los almacenes y laboratorios de PDVSA Intevep.

6) Confiabilidad de los proveedores de productos y servicios: Comprendiendo que los sistemas experimentales para el Laboratorio de Mecánica de Perforación van a ser operados por personas, se debe garantizar su construcción con materiales de alta calidad, para evitar afectar las condiciones de seguridad, higiene y ambiente en el laboratorio, sobretodo cuando se manejen altas presiones y temperatura. La garantía de esta calidad comienza con la selección de proveedores confiables para fabricar las piezas necesarias, así como para la venta de materiales y equipos necesarios para los montajes experimentales. Para mitigar riesgos en este sentido, se propone seleccionar solo proveedores de

productos y servicios que cuenten con sistemas de gestión de la calidad instalados y las certificaciones correspondientes a sus líneas de servicio.

5.3.4. Plan de Gestión del Tiempo

El proyecto presenta hitos importantes para su control y seguimiento, los cuales son considerados en el Plan de Ejecución Detallado presentado en el punto 5.4 de este trabajo de investigación.

Como parte de la estrategia para el seguimiento y control del proyecto se proponen las siguientes mesas de trabajo, ya reflejadas en el plan de ejecución:

- Mesa de trabajo 1, para generar recomendaciones y toma de decisiones con respecto al diseño y construcción de los sistema experimentales (culminada la Inteligencia Tecnológica).
- Mesa de trabajo 2, para validar las premisas, bases y criterios de diseño a considerar en la construcción del sistema experimental *Sand Pack Test*
- Mesa de trabajo 3, para revisar y validar los diseños plasmados en los croquis y planos del sistema experimental *Sand Pack Test*
- Mesa de trabajo 4, para desarrollar las pruebas al sistema experimental *Sand Pack Test*, previo a su despacho
- Mesa de trabajo 5, para revisar y validar los diseños plasmados en los croquis y planos del sistema experimental *Slurry Test*
- Mesa de trabajo 6, para realizar análisis de lecciones aprendidas y cierre de proyecto.

Estas mesas de trabajo garantizará la comunicación efectiva entre el personal de las diferentes disciplinas, gerencias y organizaciones involucradas en el desarrollo del proyecto. Adicionalmente, permitirá la revisión y aprobación de los diferentes entregables que se vayan generando, así como la retroalimentación constante de

la información, todo esto con el objeto de realizar las correcciones necesarias para alcanzar exitosamente los objetivos del proyecto.

5.3.5. Plan de Gestión de Adquisiciones

Entre los recursos mas importantes a considerar para la ejecución del proyecto, se destaca el personal técnico del Laboratorio de Mecánica de Perforación, de donde sale la iniciativa para llevar a cabo el diseño y construcción de los sistemas experimentales, como una alternativa para la solución de los problemas de producción de arena de la Faja Petrolífera del Orinoco, y que además debe comenzar a desarrollar los conocimientos necesarios para ejecutar e interpretar las pruebas de métodos de control de arena en el laboratorio.

Comprendiendo la importancia que juega el desarrollo de la Inteligencia Tecnológica, como base para la toma de decisiones en cuanto a opciones de diseño y construcción de los sistemas experimentales, se requiere contar con acceso a bases de datos internacionales de la industria petrolera, acostumbrado servicio prestado por el personal del Centro de información Técnica (CIT) de PDVSA Intevep. La profundidad del análisis realizado en la elaboración de la Inteligencia Tecnológica determinará la funcionalidad de los sistemas experimentales diseñados.

A continuación se presenta el plan propuesto para gestionar la adquisición de todos esos recursos con los cuales no se cuenta en PDVSA Intevep para ejecutar el proyecto o que se requieren para complementar los que se tienen en la ejecución de una determinada actividad. En la Tabla 9 se presenta la matriz de adquisiciones del proyecto.

Tabla 9. Matriz de adquisiciones del proyecto

Cve	WBS	Paquetes de contratación					
		Personal Intevep	Empresa Consultora	Proveedores	Construcción Metalmecánica	Outsourcing	Inspección y pruebas
1	Inteligencia Tecnológica	X					
2	Diseño de Sistema Slurry Test	X	X				
3	Equipos para sistema Slurry Test			X			
4	Diseño de sistema Sand Pack Test		X			X	
5	Adquisición de sistema Sand Pack Test					X	
6	Pruebas del sistema Sand Pack Test					X	
7	Construcción del sistema Slurry Test	X			X		
8	Ensamblaje de sistemas experimentales				X		
9	Pruebas funcionales	X					X
Esquemas de Contratación		Personal Intevep	Empresa Consultora	Proveedores	Construcción Metalmecánica	Outsourcing	Inspección y pruebas
Tipo de contrato			Honorarios profesionales	Orden de compra	Precio Unitario	% de avance de trabajo	% de avance de trabajo
Tipo de Relación Contractual			Agente	Vendedor	Vendedor	Agente	Agente
Forma de pago		Salario	Entregables	Entrega de bienes y	Avance de obra	Avance de obra	Recursos ejercidos

			materia prima			
Importe aproximado	120.000.000 Bs	242.892.160 Bs	2.235.000.000 Bs	185.886.000 Bs	136.500 USD	34.632.000 Bs
Anticipo aproximado	No aplica	30 %	50 %	50 %	50 %	No aplica
Tipo de Concurso	Asignación	Concurso abierto	Concurso abierto	Concurso cerrado	Concurso cerrado	Concurso cerrado
Fecha de Concurso	Inmediata	Enero 2019	Junio 2020	Julio 2020	Abril 2019	Agosto 2020
Fecha de Contratación	Inmediata	Abril 2019	Agosto 2020	Septiembre 2020	Junio 2019	Octubre 2020

A continuación se explican las premisas consideradas para la elaboración de la matriz de adquisiciones anteriormente expuesta:

1. Desarrollo de la Estructura Desagregada de Trabajo (WBS): Presentada en el Plan de Gestión del Alcance del Proyecto, se estableció un esqueleto del trabajo, al desagregarlo en componentes menores, siendo esto la materia prima básica para la matriz. El proyecto se descompuso según la secuencia natural de ejecución de las actividades y los productos finales que se desean obtener.

2. Tipo de paquetes de contratación: Se establecieron según las competencias y áreas de conocimiento involucradas a saber: Personal Intevep, consultora de ingeniería, proveedores, construcciones metalmecánicas y empresa de inspecciones y pruebas.

3. Esquema de contratación: De acuerdo con Chamoun (2002) la definición del esquema de contratación implica los siguientes puntos:

Tipo de contrato por cada compañía, empresa o proveedor:

- Para la contratación de la Empresa Consultora que desarrollará los estudios de simulación numérica asociados a los diseños de los sistemas experimentales, se propone la elaboración de un contrato por Honorarios Profesionales, típicamente usado en el desarrollo de proyectos de ingeniería para entes gubernamentales, ya que permite honrar el trabajo de los profesionales involucrados en este tipo de actividad especializada (trabajo intelectual).

- Con respecto a la adquisición de los equipos y materiales para la construcción del sistemas *Slurry Test*, se propone la colocación de Órdenes de Compra, las cuales son un tipo de contrato especial, puesto que el proveedor cuenta con estos bienes en sus almacenes o tiene las facilidades para importarlos, y posteriormente lo entrega en un sitio determinado y el comprador pagará la cantidad acordada a la entrega a satisfacción. Es necesario destacar que las órdenes de compra no garantizan la instalación del bien adquirido y su garantía es solo contra defectos de fabricación.
- Para las construcciones metalmecánicas asociadas a la construcción de los sistemas experimentales, se propone la elaboración de contratos por Precios Unitarios, los cuales entran en la clasificación de contratos de Costos Fijos, donde el contratante acuerda con el contratado una tarifa en función de las partidas que se vayan ejecutando durante la construcción de piezas y partes de los sistemas experimentales. Ideal para este tipo de trabajos que cuentan con información detallada de costos y alcance proveniente de la Ingeniería, permitiendo la revisión de aumentos y disminuciones.
- Para la actividad de inspecciones y pruebas, así como para el *outsourcing* propuesto para el diseño y adquisición del sistema *Sand Pack Test*, se propone la elaboración de un contrato por Porcentaje de Avance de la Obra, donde se presenta un riesgo medio para el contratante y existe un componente fijo, tal como precio unitario, y un componente variable por el número de horas o metros cuadrados de la obra. La principal ventaja de este tipo de contrato es la rapidez para su elaboración y tramitación. Sin embargo, el personal subcontratado mediante esta tipología de contrato no tiene ningún incentivo para ser eficiente, por esta razón se deberá realizar un gran esfuerzo en la supervisión y revisión de las tareas realizadas, tiempo invertido en las mismas, planificación del trabajo diario, etc.

Relación contractual: De acuerdo con Chamoun (2002), se identificaron los siguientes tipos de relación contractual

- Agente: este provee un servicio especializado y representa al cliente, su rol es guiar y asesorar, son contratados en función de su capacidad y confiabilidad. En esta categoría encontramos a: consultora de ingeniería, empresa de *outsourcing* y empresa de inspección.
- Vendedor: este provee un producto o servicio definido y a cierto precio, siendo contratados en función a precio, servicio y soporte después de la venta. En esta categoría encontramos a los proveedores de materiales y equipos, así como la empresa de construcciones metalmecánicas.

Forma de pago:

- Para el contrato de la consultora de ingeniería se establece una forma de pago con base en entregables, asumiendo así la gerencia de proyecto menor riesgo, puesto que pagará con base en resultados, con criterios de aceptación preestablecidos.
- Para las órdenes de compra se establece una forma de pago con base a la entrega de bienes y materia prima, disminuyendo la administración requerida por el esquema de cuantificación de recursos y generando un mayor compromiso por parte del proveedor.
- Para los contratos de construcciones metalmecánicas y *outsourcing* se establece una forma de pago con base a porcentaje de avance, ameritando una administración mas detallada, en la que se debe hacer seguimiento del tipo y número de partidas que se van ejecutando.
- Para el contrato de inspección y pruebas se propone una forma de pago con base a recursos ejercidos, implicando un menor compromiso con los objetivos por parte del proveedor, así como un mayor riesgo para el cliente. Se requiere administración detallada para contabilizar el número, clase y monto de los recursos utilizados.

Importe aproximado: Se estiman los siguientes importes por contrato, con sus anticipos correspondientes:

- Personal Intevep: Bs. 120.000.000,00 (no aplica anticipo)
- Consultora de ingeniería: Bs. 242.892.160,00 (anticipo de 30 %)
- Órdenes de compra: Bs. 2.235.000.000,00 (anticipo de 50 %)
- Construcciones metalmecánicas: Bs. 185.886.000,00 (anticipo de 50 %)
- *Outsourcing*: USD 136.500,00 (anticipo de 50 %)
- Inspección y pruebas: Bs. 34.632.000,00 (no aplica anticipo)

De esta manera el presupuesto total estimado para la obra es: Bs. 2.698.410.160,00 y USD 136.500,00, lo cual incluye una holgura de Bs. 385.487.165,00 y USD 19.500,00 respectivamente, que puede servir para mitigar los riesgos asociados al proyecto.

Tipo de concurso: Se proponen las siguientes modalidades de selección de los contratistas o proveedores que van a trabajar en el proyecto:

- **Concurso Cerrado:** en la que al menos cinco (5) participantes son invitados de manera particular a presentar ofertas por el órgano o ente contratante, con base en su capacidad legal, financiera y técnica. La Ley de Contrataciones Públicas (LCP) establece como supuestos cuantitativos para el caso de contratación de bienes y servicios entre 5.000 y 20.000 UT. La LCP hace énfasis en la preferencia que debe existir en la invitación de medianas y pequeñas industrias, pequeños productores, cooperativas y otras formas asociativas comunitarias, naturales de la localidad donde será ejecutada la contratación. Esta es la modalidad de selección propuesta para los contratos de consultora de ingeniería y de compra de equipos y materiales.
- **Concurso Abierto:** en la que pueden participar personas naturales o jurídicas nacionales y extranjeras, previo cumplimiento de los requisitos establecidos en la LCP, su Reglamento y las condiciones particulares inherentes al pliego de condiciones. La LCP establece como supuestos cuantitativos para el caso de contratación de obras por encima de 50.000 UT. Se propone como mecanismo

de calificación un Acto Único de recepción y apertura de sobres contentivos de Manifiestos de Voluntad, Documentos necesarios para la Calificación, Ofertas Técnicas y Ofertas Económicas (incluye Compromiso de Responsabilidad Social). Esta es la modalidad de selección propuesta para los contratos de construcciones metalmecánicas, *outsourcing* y pruebas e inspecciones.

Fechas de concursos: Considerando un tiempo estimado de ejecución del proyecto de 24 meses, sin interrupciones que incluyen las labores de diseño, procura y construcción, y además la secuencia de actividades, se proponen las siguientes fechas de concursos:

- Contrato de consultora de ingeniería: Enero 2019
- Órdenes de compra: Junio 2020
- Contrato de construcciones metalmecánicas: Julio 2020
- Contrato de *outsourcing*: Abril 2019
- Contrato de inspecciones y pruebas: Agosto 2020

Fechas de contratación: Considerando las fechas de concursos establecidas anteriormente, se proponen las siguientes fechas de contratación:

- Contrato de consultora de ingeniería: Abril 2019
- Órdenes de compra: Agosto 2020
- Contrato de construcciones mecánicas: Septiembre 2020
- Contrato de *outsourcing*: Junio 2019
- Contrato de inspecciones y pruebas: Octubre 2020

Considerando el alto impacto de la contratación del *outsourcing* en el proyecto (servicio foráneo), se requiere el apoyo gerencial con el Nivel Aprobatorio Financiero suficiente para contar con las divisas necesarias, para materializar y llevar a feliz término este contrato. Igualmente se necesita de la aprobación de los

recursos económicos para comprar los materiales y equipos asociados a la construcción del sistema *Slurry Test*.

De más está decir, el enorme apoyo requerido de parte del personal de la Unidad de Contratación de la Gerencia de Finanzas y Taller Mecánico de PDVSA Intevep. Los primeros con alta experiencia en procesos contrataciones nacionales e internacionales, así como un amplio manejo de la Ley de Contrataciones Públicas y normativas internas. Por otra parte, el personal de Taller Mecánico cuenta con la pericia y máquinas herramientas para construir diferentes componentes del sistema *Slurry Test*.

5.4. Estructurar el plan detallado de ejecución del diseño y construcción de los sistemas experimentales para la evaluación de métodos de control de arena.

A continuación se presentan los detalles e hitos a ser considerados en cada una de las fases del desarrollo del proyecto de instalación de sistemas experimentales para estudios de control de arena en el Laboratorio de Mecánica de Perforación, los cuales representan un insumo importante para el proceso de Control y Seguimiento de Proyectos, establecido en el PMBOK (2017):

5.4.1. Inteligencia Tecnológica

- Una vez realizada la búsqueda en bases de datos internacionales de la industria petrolera, se debe realizar el análisis y redacción de documentos correspondiente.
- Como hito importante de esta fase se destaca la realización de una mesa de trabajo para generar recomendaciones y toma de decisiones con respecto al diseño y construcción de los sistema experimentales.

5.4.2. Diseño y construcción de sistema *Sand Pack Test*

- Realizar proceso de contratación del proveedor de servicios foráneo para el diseño, construcción e instalación del sistema *Sand Pack Test*, esto con el

apoyo de la Unidad de Contratación de la Gerencia de Finanzas en PDVSA Intevep.

- Establecimiento de las premisas de diseño, que servirá de base para la realización de planos y cálculos de resistencia de materiales e hidráulica.
- Visita a proveedor foráneo N° 1, para realizar mesa de trabajo que permita validar las premisas, bases y criterios de diseño a considerar en la construcción del sistema experimental.
- Ejecución de croquis y planos detallados del sistema experimental: diagramas de tubería e instrumentación (DTI), cortes / despieces de celdas y portacupones. Se deben incorporar en los planos lista de materiales, tolerancias y acabados superficiales.
- Visita a proveedor foráneo N° 2, para realizar mesa de trabajo que permita revisar y validar los diseños plasmados en los croquis y planos del sistema experimental.
- Desarrollar memorias de cálculo asociados a resistencia de los materiales de las celdas e hidráulica del sistema de desplazamiento de fluidos. Se deben considerar criterios convencionales de falla de metales y ecuaciones de flujo interno viscoso en tuberías.
- Verificación del diseño de las celdas por medio de simulación numérica, vía Método de Elementos Finitos.
- Una vez realizados planos, cálculos y verificación de diseños con simulación numérica se procede a elaborar la versión definitiva de la lista de materiales del sistema completo.
- Con base en la lista de materiales, el proveedor foráneo deberá iniciar la procura de materiales y equipos necesaria para la construcción del sistema experimental. Se debe prestar especial atención a las certificaciones de calidad

de los materiales, pruebas hidrostáticas y calibraciones de balanzas y transductores de presión.

- Construir el sistema experimental *Sand Pack Test* bajo una estructura modular que permita fácilmente su desarmado y ensamblaje, para efectos de despacho y transporte a la sede PDVSA Intevep.
- Visita a proveedor foráneo N° 3, para realizar mesa de trabajo que permita desarrollar las pruebas al sistema experimental *Sand Pack Test*, previo a su despacho.

5.4.3. Diseño de sistema *Slurry Test*

- Establecimiento de las premisas de diseño, que servirá de base para la realización de planos y cálculos de resistencia de materiales e hidráulica.
- Ejecución de croquis y planos detallados del sistema experimental: diagramas de tubería e instrumentación (DTI), cortes y despieces de celdas. Se deben incorporar en los planos lista de materiales, tolerancias y acabados superficiales.
- Mesa de trabajo con personal técnico del Taller Mecánico de PDVSA Intevep, que permita revisar y validar los diseños plasmados en los croquis y planos del sistema experimental.
- Desarrollar memorias de cálculo asociados a resistencia de los materiales de las celdas e hidráulica del sistema de desplazamiento de fluidos. Se deben considerar criterios convencionales de falla de metales y ecuaciones de flujo interno viscoso en tuberías.
- Una vez realizados planos y memorias de cálculos de los diseños se procede a elaborar la versión definitiva de la lista de materiales del sistema completo.

5.4.4. Procura de materiales para *Slurry Test*

- Establecer contacto con posibles proveedores de los diferentes elementos incluidos en la lista de materiales, apoyándose con el personal técnico de otros

laboratorios de PDVSA Intevep, que tengan bajo su responsabilidad equipos de medición de permeabilidad.

- Solicitar y analizar las ofertas técnico-económicas realizadas por los diferentes proveedores, previamente contactados. A partir de este análisis se elabora el presupuesto de materiales y equipos en su versión definitiva.
- Realizar las ordenes SOLPED y hacer el seguimiento correspondiente con el personal de Bariven.

5.4.5. Construcción de sistema *Slurry Test*

Construir en el taller mecánico de PDVSA Intevep los diferentes componentes del sistema experimental *Slurry Test*: celdas, eductor para inyección de lechada, dispersor estático para favorecer mezcla líquido-sólido en la celda y portacupón para fijar muestra de medio filtrante. Se debe construir bajo una estructura modular que permita fácilmente su desarmado y ensamblaje, para facilitar la instalación y tareas de mantenimiento.

5.4.6. Implantación de sistemas experimentales en laboratorio

- El personal técnico del proveedor de servicios foráneo instalará y realizará las pruebas funcionales del sistema experimental *Sand Pack Test*, con la presencia del personal del Laboratorio de Mecánica de Perforación.
- El personal técnico del taller mecánico de PDVSA Intevep instalará y realizará las pruebas funcionales del sistema experimental *Slurry Test*, con la presencia del personal del Laboratorio de Mecánica de Perforación.
- El equipo del proyecto elaborará la documentación asociada a la instalación y pruebas funcionales de ambos sistemas experimentales, la cual deberá incluir las lecciones aprendidas. Asimismo, se procederá a la divulgación de esta documentación y lecciones aprendidas, para posteriormente dar paso al proceso de cierre del proyecto.

A continuación en la Figura 24 se presenta el Plan Detallado de Ejecución del Proyecto.

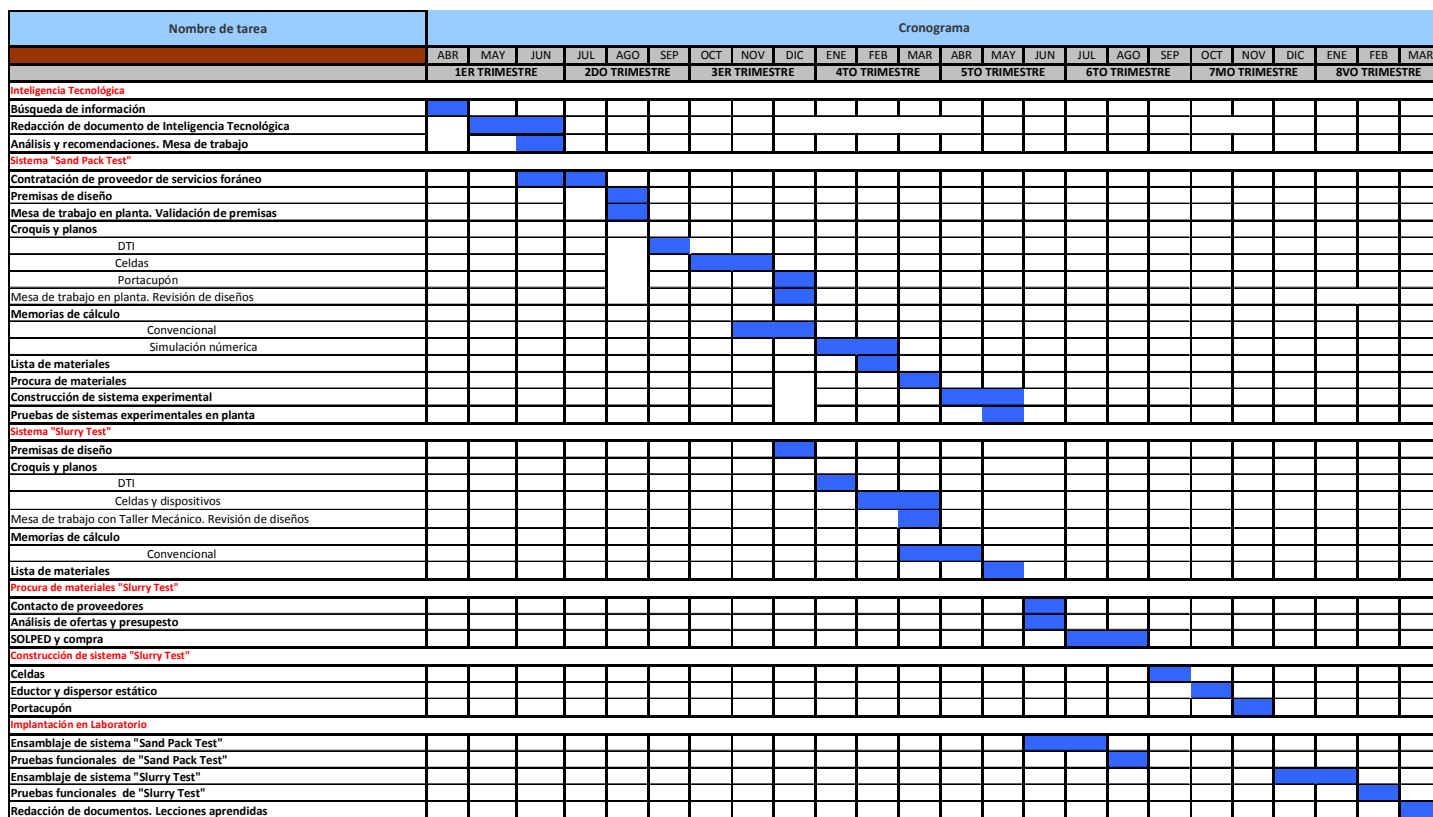


Figura 24. Plan Detallado de Ejecución del Proyecto

CAPITULO VI: LA PROPUESTA

En este capítulo se presenta el diseño de la propuesta como mejora de la metodología para estudios de control de arena existente actualmente en PDVSA Intevep y solución a los problemas de producción de arena en los diferentes campos de hidrocarburos del país. El proyecto formulado permitirá la incorporación de sistemas experimentales de vanguardia en el Laboratorio de Mecánica de Perforación, para de esta manera impulsar las actividades de asistencia técnica e investigación en el área de control de arena.

6.1. Descripción de la propuesta

En la actualidad, un alto porcentaje de los pozos productores de crudo pesado y extrapesado de la Faja Petrolífera del Orinoco presentan problemas de producción de arena masiva, lo cual incide en forma negativa en la productividad del campo y genera daños mecánicos en la completación de los pozos, bombas, equipos y tuberías de superficie. De acuerdo a esto, se propone la instalación de sistemas experimentales que permitan evaluar las diferentes alternativas mecánicas de control de arena (tales como rejillas, tuberías ranuradas o empaques con grava) para poder ejecutar de una forma más precisa y efectiva su selección y diseño, estableciéndose así los esquemas óptimos de completación de los yacimientos.

6.2. Patrocinador del Proyecto / Gerencia Contratante

El proyecto es propuesto por el Laboratorio de Mecánica de Perforación, unidad técnica perteneciente a la Gerencia Departamental de Construcción de Pozos (PRCP) de PDVSA Intevep, destinada al diseño y ejecución de ensayos experimentales para el soporte de investigaciones estratégicas y de desarrollo en el área de mecánica de perforación y completación de pozos.

6.3. Objetivos y propósitos del proyecto

Objetivo:

Diseñar sistemas experimentales tipo *Slurry Test* y *Sand Pack Test* para evaluar la eficiencia de retención de las diferentes alternativas mecánicas de completación

de pozos para control de arena, para lo cual son desarrolladas curvas de desempeño de los medios filtrantes que permiten predecir la capacidad de flujo y retención de sólidos en función de las características de la arena del yacimiento.

Propósitos del proyecto:

- Diseñar los sistemas experimentales *Slurry Test* y *Sand Pack Test* atendiendo a las buenas prácticas y criterios de diseño mecánico confiable y satisfaciendo las características de funcionalidad en las instalaciones del Laboratorio de Mecánica de Perforación: espacio, facilidades de servicios, acometidas eléctricas, entre otros.
- Realizar la procura y construcción de partes necesarias para la construcción y ensamblaje de los sistemas experimentales, que cumplan con los requisitos y especificaciones establecidos en el diseño y satisfagan una óptima relación costo – beneficio.
- Instalar y poner en marcha los sistemas experimentales para estudios de control de arena en el Laboratorio de Mecánica de Perforación, realizando todas las pruebas que validen su funcionamiento como método de ensayo confiable.

6.4. Alineación estratégica

El incremento de las actividades de explotación de yacimientos no consolidados en la Faja Petrolífera del Orinoco ha generado el incremento de producción diferida asociada a problemas de arenamiento de pozos. La optimización del diseño de control de arena para la completación de pozos mediante el desarrollo de pruebas experimentales de medios filtrantes permitirá incrementar la productividad, reducir costos y tiempos no productivos asociados a actividades de completación y rehabilitación de pozos así como disminuir la producción diferida, soportando así el incremento progresivo de la producción establecido en el Plan “Siembra Petrolera”, principalmente de los yacimientos de arenas poco consolidadas y yacimientos maduros en áreas tradicionales.

6.5. Entregables del proyecto

- Inteligencia tecnológica resultante de una investigación bibliográfica en bases de datos internacionales de ingeniería, ciencias y patentes
- Planos de celdas y sistemas experimentales
- Informe de memorias de cálculos de resistencia asociados a las celdas
- Informe de verificación del diseño vía simulación numérica
- Lista de materiales para cada sistema experimental
- Sistemas experimentales ensamblados en el Laboratorio de Mecánica de Perforación y probados con una matriz de ensayos amplia
- Protocolo de montaje y ejecución de ensayos en los sistemas experimentales *Sand Pack Test* y *Slurry Test*

6.6. Estrategias consideradas

La alternativa seleccionada por el equipo de proyecto es la de contratar la ingeniería, procura y construcción del sistema *Sand Pack Test* con un proveedor de servicios foráneo y construir el sistema *Slurry Test* en PDVSA Intevep. Esto refleja una estrategia en la cual se pretende, acelerar el proceso de construcción del sistema *Sand Pack Test*, y llevar a cabo un proceso de transferencia de conocimientos.

La estrategia planteada parte en primer lugar por reconocer que el personal técnico del Laboratorio de Mecánica de Perforación tiene una curva de aprendizaje que recorrer en el diseño de y construcción de sistemas experimentales para estudios de control de arena y, lamentablemente, los problemas operacionales en la Faja Petrolífera del Orinoco, asociados a la alta producción de arena de los pozos, no pueden esperar por soluciones tecnológicas a largo plazo. Por lo tanto, se propone la contratación de un proveedor de servicios foráneo que diseñe, construya e instale el sistema experimental *Sand Pack Test*, que es el mas

indicado para las arenas no consolidadas presentes en la Faja, permitiendo obtener una solución tecnológica en el corto o mediano plazo.

Por supuesto, la estrategia contempla garantizar la correcta selección del proveedor foráneo que prestará el servicio, para lo cual se apelará a la amplia experiencia con la que cuenta el personal de otros laboratorios de PDVSA Intevep, en la compra y mantenimiento de equipos medidores de permeabilidad en núcleos de yacimientos, ya que tienen características de funcionamiento similares a las de los sistemas experimentales para estudios de control de arena. Sumado a esto, se debe garantizar que el proveedor de servicios foráneo se encuentre dispuesto a hacer transferencia de conocimiento al personal técnico del laboratorio y, además, respetar las cláusulas de confidencialidad que deberán estar claramente establecidas en el contrato.

Una vez que inicie el proceso de transferencia de conocimientos del proveedor de servicios foráneo hacia los técnicos del Laboratorio de Mecánica de Perforación, y también tomando como referencia la Inteligencia Tecnológica desarrollada en la primera etapa del proyecto, se podrá dar inicio en paralelo a las tareas de diseño y construcción del sistema experimental *Slurry Test*. Finalmente, se espera contar con ambos sistemas experimentales instalados y operativos en laboratorio, en un plazo de dos años.

6.7.Recomendaciones

Se debe garantizar que desde el proceso de contratación del proveedor de servicios foráneo, se incluyan las cláusulas necesarias para la transferencia de conocimiento en el diseño, operación y mantenimiento del sistema *Sand Pack Test* construido, así como las cláusulas de confidencialidad asociadas al diseño propio y propiedad intelectual de los equipos y sistemas generados por el equipo del proyecto.

Adicionalmente, se recomienda involucrar al personal técnico del Taller Mecánico de PDVSA Intevep en el diseño del sistema *Slurry Test*, que garantice la

generación de un diseño de celda y dispositivos factibles de construir con las máquinas herramientas y materiales disponibles en la empresa.

6.8. Lista de riesgos mayores

- Retrasos en el proceso de contratación.
- Retrasos en los procesos de procura y compra de materiales y equipos.
- Retrasos en el Taller Mecánico de PDVSA Intevep.
- Fallas en la simulación numérica de la celda “Sand Pack Test”.
- Recortes en el presupuesto disponible para el proyecto.
- Confiabilidad de los proveedores de productos y servicios.

6.9. Resumen del presupuesto

En el marco del proyecto de instalación de sistemas experimentales para estudios de control de arena en el Laboratorio de Mecánica de Perforación, se estima un presupuesto de Bs. 2.698.410.160,00 y USD 136.500,00. Para mayores detalles de los desembolsos a realizar durante el período de ejecución del proyecto, se puede ver el Plan de Gestión de Costos del Proyecto en el Capítulo V de este trabajo de investigación.

CAPITULO VII: EVALUACIÓN DEL PROYECTO

En este capítulo se presenta la evaluación del proyecto desde el punto de vista del cumplimiento de los objetivos y las lecciones aprendidas. Se hace una revisión de las tareas mas importantes realizadas para el logro de los diferentes objetivos específicos, así como de las lecciones aprendidas durante el desarrollo del trabajo de investigación, con el objeto de que sean divulgadas y puedan servir de referencia y aporte a la metodología con la cual normalmente se ejecutan los proyectos en PDVSA Intevep.

7.1. Cumplimiento de los objetivos

Con respecto al planteamiento de los objetivos que se lograron en el trabajo, merecen especial atención los relacionados con el diseño de los planes para la ejecución del proyecto. Estos se realizaron buscando siempre atender a la mejores prácticas y recomendaciones establecidas por el Project Management Institute en el PMBOK (2017).

Con respecto al objetivo específico relacionado con el establecimiento de las bases y criterios de diseño de los sistemas experimentales, se requirió de una amplia búsqueda en bases de datos especializadas y literatura técnica, además del consenso de los diferentes interesados del proyecto a partir de mesas de trabajo y reuniones, lo cual permitió determinar con un buen nivel de precisión los requisitos con los que deben cumplir los sistemas experimentales, tales como; materiales, capacidades, espacio físico, entre otros. De esta manera, las herramientas e instrumentos que tuvieron mayor impacto en el logro de este objetivo fueron el juicio de expertos, análisis documental y bases de datos.

Un objetivo específico de gran importancia para la formulación del proyecto fue el de definir la estrategia a seguir para diseñar y construir los sistemas experimentales en el laboratorio, y en este punto es donde la experiencia, conocimientos y habilidades de la Gerencia de Proyectos son puestos a prueba para idear el camino a seguir, sorteando las dificultades y limitaciones existentes, y conseguir alcanzar con éxito las metas del proyecto. Para cumplir con este

objetivo, se contó nuevamente con la experiencia de todos los involucrados en el proyecto, esta vez evaluando con detalle las diferentes alternativas que se generaron de una tormenta de ideas, para lo cual fue necesario especificar bien los criterios de evaluación, muy relacionados con los requisitos que deben cumplir los sistemas experimentales. Es así como una de las herramientas mas importantes usadas en este objetivo fue la Matriz de Selección de Alternativas, además del Juicio de Expertos y Observación Estructurada.

Para cumplir con el tercer objetivo específico se decidió trabajar en los siguientes planes subsidiarios, considerados fundamentales para la formulación del proyecto: Plan de Gestión del Alcance, Plan de Gestión de Costos, Plan de Gestión de Riesgos, Plan de Gestión del Tiempo y Plan de Gestión de Adquisiciones. Para cada uno de estos planes, en forma respectiva, se destacan los siguientes instrumentos recomendados por el Project Management Institute en el PMBOK (2017): estructura desagregada de trabajo (EDT), presupuesto del proyecto, matriz de riesgos, cronograma del proyecto y matriz de adquisiciones. Gracias a estos, se logró hacer una formulación de proyecto con un buen nivel de detalle.

Finalmente, en el cuarto objetivo específico de este trabajo de investigación, relacionado con la elaboración del Plan Detallado de Ejecución del Proyecto, se lograron definir los detalles e hitos a ser considerados en cada una de las fases del desarrollo del proyecto de instalación de sistemas experimentales para estudios de control de arena en el Laboratorio de Mecánica de Perforación, los cuales representan un insumo importante para el proceso de Control y Seguimiento de Proyectos. Definidas las diferentes actividades a realizar en el proyecto, el trabajo mas complejo consistió en hacer la secuencia y la estimación de la duración de cada una de ellas, jugando aquí un papel muy importante las herramientas de juicio de expertos, entrevistas no estructuradas y flujogramas, con las cuales fue posible elaborar el Diagrama de Gantt del proyecto.

En forma general, se cumplieron los desarrollos planteados en cada uno de los objetivos específicos de este trabajo de investigación, contando de esta manera con un documento que sirve de base para ejecutar el proyecto de diseño y

construcción de los sistemas experimentales, al contar con una definición clara de los objetivos, alcance, requisitos, productos o entregables, además del desarrollo inicial de planes de ejecución, estimación global de costos y reconocimiento de los riesgos asociados al proyecto.

7.2. Lecciones aprendidas

Las lecciones aprendidas, contribuyen a transformar el conocimiento desarrollado en una determinada actividad en información disponible para ser divulgada a todo el equipo de trabajo y la empresa en general. De esta manera, la experiencia obtenida en cada proyecto o actividad, pasa a formar parte del acervo científico y tecnológico de la empresa. Con el objeto de contribuir con la difusión de las experiencias obtenidas durante el desarrollo de este trabajo de investigación, a continuación se presentan los aspectos mas relevantes que dieron oportunidad de adquirir un mayor conocimiento durante el desarrollo del trabajo de investigación.

- El tema seleccionado para ser desarrollado en este Trabajo Especial de Grado, como una propuesta para el desarrollo de sistemas experimentales que permitan ofrecer soluciones tecnológicas en estudios de control de arena, desde la Gerencia Departamental de Construcción de Pozos de PDVSA Intevep, queda completamente alineado con la “Formulación y Evaluación de Proyectos”, la cual es una de las líneas de trabajo del Postgrado en Gerencia de Proyectos de la UCAB.
- El tema genera mucha expectativa, ya que se trata de enfrentar los problemas de producción de arena que se presentan actualmente en los campos de producción de hidrocarburos de nuestro país, los cuales representan altos costos asociados a producción diferida y mantenimiento de los pozos e instalaciones en superficie. Además, abre las puertas para crecer en actividades de investigación y desarrollo orientadas a estudiar y determinar el comportamiento de las diferentes alternativas mecánicas de control de arena.
- En lo referente a la investigación bibliográfica realizada, fue bastante amplia la cantidad de artículos y publicaciones consultadas, gracias a las bases de datos

especializadas con las que se cuenta en la empresa. Fue necesario clasificar y analizar la información revisada, y una vez hecho esto se pudieron observar las diferencias y similitudes entre los diferentes sistemas experimentales propuestos por los investigadores especialistas en esa área de conocimiento. Así pues, fue necesario realizar reuniones con el personal propio de mas experiencia, y por medio de juicio de expertos llegar a un consenso para definir las bases y criterios de diseño de los sistemas experimentales a instalar en nuestro Laboratorio de Mecánica de Perforación.

- Fue bien importante haber establecido el objetivo específico relacionado con la definición de la estrategia a seguir en el proyecto, es algo que como investigadores poco hacemos en los diferentes proyectos que desarrollamos, y tal vez sea una de las principales razones por las cuales contamos con tantas actividades dispersas. Cuando las organizaciones son muy grandes, si no se cuenta con el liderazgo adecuado se tiende a divagar, a adquirir variedad de compromisos y dedicar esfuerzos en tareas que las alejan de su verdadera visión. En el contexto organizacional, con este objetivo específico la idea fue definir estrategias que realmente se logren “operacionalizar”, sincerarlas de acuerdo con la realidad o situación en la que se encuentre la empresa, se quiere realmente ejecutar la estrategia para ver los resultados y productos que se esperan. En este sentido, una de las lecciones aprendidas fue la importancia que tiene determinar los recursos con los que se cuenta, ya sea humanos, financieros o materiales, antes de diseñar cualquier estrategia.
- Durante la realización de los diferentes planes subsidiarios del proyecto, quedaron en evidencia los errores y deficiencias que existen en la forma como se conciben actualmente los proyectos en la empresa, sobre todo a nivel de la etapa de planificación, donde se deben cumplir con tantos procesos y recolectar/analizar amplia información, para así cumplir con las buenas prácticas plasmadas en el PMBOK (2017), siempre en la búsqueda de mejorar y estandarizar los procesos en los diferentes proyectos de investigación. Debe existir el compromiso de de empezar a cerrar esas brechas que han sido

detectadas y profundizar en el estudio de conceptos y procesos donde tengamos mayores debilidades, además de cambiar nuestra cultura de trabajo, para evitar concentrarse solo en el logro de los objetivos sino también en la ejecución de un trabajo con alto nivel de calidad.

- Con la realización del Plan Detallado de Ejecución del Proyecto, se logró tener un mayor conocimiento sobre los procesos de Gerencia de Proyectos involucrados en el área de Gestión del Tiempo y más específicamente sobre la metodología para elaborar un buen cronograma de trabajo y su posterior afinamiento y optimización. Uno de los aspectos mas importantes aprendidos es que las actividades programadas deben ser definidas a un nivel de detalle de forma tal que permita determinar la secuencia lógica de ejecución con el número de precedencias necesarias, destacándose que mientras mas detalladas sean las actividades, mas compleja sería su programación y por ende aumenta la probabilidad de que existan omisiones o errores, trayendo como consecuencia posteriormente deficiencias en el control del proyecto.

En la Tabla 10 se presenta una tabla de evaluación del trabajo de investigación, con el resumen del cumplimiento de los objetivos y las lecciones aprendidas durante su ejecución.

Tabla 10. Tabla de evaluación del proyecto

Objetivo General	Formular un proyecto para diseñar y construir sistemas experimentales que permitan evaluar la eficiencia de retención de las diferentes alternativas mecánicas de completación de pozos para control de arena en el Laboratorio de Mecánica de Perforación de PDVSA Intevep.	
Objetivos Específicos	% Cumplimiento	Lecciones Aprendidas
Determinar las bases y criterios a considerar en el diseño de los sistemas experimentales para la evaluación de métodos de control de arena.	100 %	Diseño de sistemas experimentales en laboratorio Análisis documental Juicio de expertos
Establecer la estrategia a seguir para diseñar y construir los sistemas experimentales para la evaluación de métodos de control de arena en el Laboratorio de Mecánica de Perforación	100 %	Matriz de alternativas Definición de criterios de evaluación Determinación de recursos disponibles Diseño de estrategias
Diseñar los planes subsidiarios que conformen el plan de ejecución del proyecto en estudio.	100 %	Buenas prácticas PMBOK Estandarización de procesos EDT Presupuesto por partidas Control de proyectos por hitos Matriz de riesgos Matriz de adquisiciones
Estructurar el plan detallado de ejecución del diseño y construcción de los sistemas experimentales para la evaluación de métodos de control de arena.	100 %	Metodología para cronogramas Diagrama de Gantt Secuencia de actividades Estimación de recursos

CAPITULO VIII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones del trabajo de investigación desarrollado, las cuales son importantes tomar en cuenta para la ejecución del proyecto formulado. Asimismo es importante hacer la divulgación de de estas conclusiones y recomendaciones para retroalimentar la metodología con la que se llevan a cabo actualmente los proyectos en la Gerencia Departamental de Construcción de Pozos de PDVSA Intevep.

8.1. Conclusiones

- El Trabajo de Investigación presentado permitió la formulación de un proyecto para el diseño y construcción de sistemas experimentales que permitan evaluar el comportamiento de los medios filtrantes usados en las completaciones de los pozos, con respecto a la retención de arena y el taponamiento. Este tipo de pruebas complementará una metodología para estudios de control de arena que ha venido desarrollando PDVSA Intevep, aumentando la confiabilidad del diseño y selección de tuberías ranuradas, rejillas y empaques de grava, usados como método de control de arena en fondo de pozo.
- Dada la necesidad y problemática planteada, y comprendiendo que los proyectos son la unidad operativa y esencial en el desarrollo empresarial, con un ciclo de vida que inicia con la concepción de la idea y formulación de proyecto, donde se requiere de un análisis multidisciplinario que permita plantear una serie de alternativas de solución y las bases para realizar una toma de decisiones para la ejecución del proyecto, el trabajo de investigación contempló el logro de cuatro objetivos específicos a través de los cuales se obtuvo: bases y criterios de diseño de los sistemas experimentales, estrategias de ejecución a considerar, planes subsidiarios y plan detallado de ejecución del proyecto.
- Se lograron establecer las bases y criterios de diseño de sistemas experimentales para la evaluación de medios filtrantes, bajo el esquema *Sand Pack Test* y *Slurry Test*, tomando en cuenta la amplia investigación

bibliográfica realizada hasta la fecha actual y la experiencia de los profesionales que trabajan en estudios de control de arena y Laboratorio de Mecánica de Perforación.

- La evaluación de parámetros de dinámica de fluidos, tales como caída de presión y velocidades, y la definición de criterios de diseño, permitirán hacer más precisa y efectiva la selección y uso de estos métodos mecánicos para control de arena, estableciéndose de esta manera los esquemas óptimos de completación de los yacimientos, lo cual se traduce en un mejor aprovechamiento de los recursos y disminución de costos asociados a reparaciones de pozos.
- El diseño de estrategias se realizó para ser capaces de aprovechar las fortalezas y oportunidades, para conseguir los objetivos, visión y metas de la organización. Las empresas que desarrollan proyectos con estrategias de ejecución bien planteadas, son las que realmente consiguen el éxito en sus negocios, pues esta es la herramienta que logra sacarlas del esquema rutinario y operacional. Las empresas que diseñan estrategias con sus proyectos, son estáticas y no pueden reinventarse, por lo son muy susceptibles de fracasar.
- Durante la realización de los diferentes planes subsidiarios del proyecto y el Plan Detallado de Ejecución, se aplicaron las buenas prácticas establecidas por el Project Management Institute, a través del PMBOK (2017). De esta manera, se logró hacer una formulación de proyecto, sumando en cada una de los planes, herramientas, instrumentos y soportes que permitieron profundizar en el análisis de la investigación, condición necesaria para ir a un proceso de evaluación y toma de decisiones, para conseguir materializar en forma exitosa el proyecto.
- Una de las herramientas más importantes incorporadas durante la realización de los planes subsidiarios del proyecto, fue la matriz de análisis de riesgos y la matriz de impacto/probabilidad que permitió precisar los niveles de riesgo y los planes de respuesta para los mismos. A través de estas se pudo determinar las

deficiencias que se tenían en el proyecto, en lo referente al proceso de gestión de riesgos. De esta manera, se consiguió mejorar el grado de detalle en la formulación de nuestro proyecto.

- Se elaboró un Plan Detallado de Ejecución del Proyecto, que contempla un cronograma de trabajo de 24 meses, iniciando el mes de abril 2019 y culminando el mes de marzo 2021. Para la ejecución del proyecto se estima un presupuesto de Bs. 2.698.410.160,00 y USD 136.500,00, considerando la disponibilidad de profesionales de PDVSA Intevep y todo el conjunto de contrataciones que se explican en la matriz de adquisiciones que forma parte del Plan de Gestión de Adquisiciones. Como parte de la estrategia para el seguimiento y control del proyecto se propusieron 6 mesas de trabajo, ya reflejadas en el plan de ejecución, que permitan la evaluación del avance en los hitos de importancia establecidos.

8.2.Recomendaciones

- En la Gerencias Departamentales de PDVSA Intevep se debe divulgar y reconocer la importancia de la generación de un Plan de Gestión de Proyectos que integre los planes secundarios y líneas base, y que realmente sea un documento de referencia y consulta permanente a lo largo de la vida del Proyecto, un instrumento para cumplir con los procesos de Seguimiento y Control.
- Como parte de la elaboración de este Plan, se le debe dar especial importancia a la realización de la Estructura Desagregada de Trabajo (EDT), un Plan de la Calidad, un Plan de Gestión de las Comunicaciones (sobre todo cuando se tienen profesionales de diferentes disciplinas y en diferentes áreas geográficas) y, por último, un Plan para el Manejo de los Riesgos que nos permita estar preparados para las eventualidades que se puedan presentar.
- Incorporar a los proyectos la contratación de asesores externos con alta experiencia, ya sea de Universidades o de centros de investigación similares a

PDVSA Intevep, que eleven el nivel de competencia de los profesionales que forman parte del equipo de trabajo.

- Fomentar en PDVSA Intevep el desarrollo de este tipo de proyectos donde se integren diferentes disciplinas de conocimiento, lo cual permite la obtención de productos o entregables con un alto nivel de calidad.
- Con respecto a la Matriz de Adquisiciones, elaborada para el Plan de Gestión de Adquisiciones, se recomienda incluir en las contrataciones de la consultora de ingeniería, el desarrollo de un análisis de resistencia mecánica por simulación numérica, previo a la construcción de la celdas, y la ejecución de una prueba de hidrostática posterior a la construcción, con el objeto de otorgarle una mayor confiabilidad a los diseños propuestos y reducir los riesgos de seguridad en el laboratorio cuando se manejen altas presiones durante las pruebas.
- Entrenar a los Jefes de Proyectos y Gerentes Departamentales de PDVSA Intevep para que reciban todos estos conocimientos, recomendaciones y buenas prácticas que ofrece el Project Management Institute, como una manera de garantizar que los proyectos se desarrollen con un alto nivel de calidad y eficiencia.
- Para finalizar, a manera de reflexión, muchos de los proyectos que se desarrollan en nuestra industria petrolera son proyectos de inversión, los cuales transforman y crean infraestructura en la industria y país en general, ameritando necesariamente un enfoque como el propuesto por el Project Management Institute en su PMBOK (2017), para garantizar su ejecución exitosa con el menor grado de riesgos y pérdidas posibles. Esto implica que los equipos de proyecto deberían contar con las habilidades, destrezas y madurez para la aplicación de mejores prácticas, como las establecidas en el PMBOK (2017), y la creación de valor en la gestión de proyectos. Al mismo tiempo, implica que las organizaciones deberían fomentar más esta metodología de

trabajo, como una forma de incrementar su valor competitivo que les permita prevalecer en el mercado petrolero tan complejo de la actualidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Acock, A.; Alexander, J.; Andersen, G.; Kaneko, T. (2004). Métodos prácticos de manejo de la producción de arena. *Revista Oilfield Review*. Julio de 2004. Páginas 10 a 29.

Arias, F. (2012). *El proyecto de investigación. Introducción a la metodología científica*. Sexta Edición. Editorial Episteme. Caracas, Venezuela. 2012.

Baca Urbina, G. (2001). *Evaluación de Proyectos*. Cuarta Edición. McGraw Hill Interamericana Editores, S.A. México. 2001.

Balestrini, M. (2006). *Como se Elabora el Proyecto de Investigación*. Séptima Edición. BL Consultores Asociados. Caracas, Venezuela. 2006.

Ballard, T.; Beare, S. (2006). Retention Testing: The More you do, The Worse it gets. Paper *SPE 98308. SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control*. Lafayette, Louisiana, 15-17 February 2006.

Bennion, D.; Gupta, S.; Gittins, S.; Hollies, D. (2008). Protocols for slotted liner design for optimum SAGD operation. *Congreso Internacional Canadiense de Petróleo*. Calgary, Canadá. 17 al 19 de Junio de 2008.

Centro Internacional de Educación y Desarrollo - CIED. (1999). *Rehabilitación de pozos petroleros. Manual de entrenamiento*. PDVSA. Caracas, Venezuela. 1999.

Chamoun, Y. (2002). *Administración profesional de proyectos. La guía*. McGraw Hill Interamericana Editores, S.A. México. 2002.

Champura, R.; Hodge, R.; Andrews, J.; Toffanin, E.; Moen, T.; Parlar, M. (2011). A review of screen selection for Stan Alone applications and a new methodology. *SPE Drilling and Completion*. Febrero de 2011. Páginas 37 a 45.

Colegio de Ingenieros de Venezuela - CIV. (2012). *Código de Ética Profesional*. Recuperado de: http://www.civ.net.ve/uploaded_pdf/cep

Halliburton. (2014). *Tecnología de Completaciones para Formaciones Inconsolidadas*. Catálogo. Houston, Texas. 2014.

Han, G.; Dusseault, M.; Cook, J. (2002). Quantifying Rock Capillary Strength Behavior in Unconsolidated Sandstones. *SPE 78170. SPE / ISRM Rock Mechanics Conference*. Irving, Texas. October, 2002.

Hernández, R.; Fernández, C. y Baptista, M. (2014). *Metodología de la Investigación*. Sexta Edición. McGraw-Hill / Interamericana Editores, S.A. de C.V. México D.F., México. 2014.

Hudson, J.; Harrison, J. (1997). *Engineering Rock Mechanics*. Published by Elsevier Science Ltd. Oxford – United Kingdom. First Edition, 1997.

Kaplan, R. y Norton, D. (2001). *Cómo utilizar el cuadro de mando integral*. HBS Publishing Corporation. Ediciones Gestión 2000. Barcelona, España. 2001.

Larsen, O.; Fjellstad, V.; Mathisen, A.; Andrews, J.; Joranson, H.; Aas, B. (2012). New sand retention test setup exhibits no plugging tendencies with various screen types using nonuniform test sand. *Congreso SPE Internacional de Control de Daño a la Formación*. Lafayette, Louisiana, 15-17 de Febrero 2012.

Mathisen, A.; Aasveit, G.; Alteras, E. (2007). Succesfull installation of Stand Alone Screen in more than 200 wells – The importance of screen selection process and fluid qualification. *Revista SPE Drilling and Completion*. Octubre de 2007. Páginas 54 a 59.

Meza Díaz, B. (2008). *Sand on Demand: An Approach to Improving Productivity in Horizontal Wells under Heavy Oil Primary Production*. Trabajo Especial de Grado para optar al título de Doctor en Ingeniería de Petróleo. Universidad de Alberta. 2008.

Monzón, E. (2006). *Formulación de un ambiente de pruebas de aplicaciones informáticas para una entidad financiera*. Trabajo Especial de Grado para optar al Título de Especialista en Gerencia de Proyectos. UCAB. 2006.

Nicholson, E.; Goldsmith, G. and Cook, J. (1998). Direct Observation and Modeling of Sanding Processes in Weak Sandstone. *Paper SPE 47328*. 1998.

Nouri, A.; Vaziri, H.; Belhaj, H.; Rafiquel, I. (2003). A comprehensive approach to modeling sanding during oil production. *SPE 81032. Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference*. Port of Spain, Trinidad. April, 2003.

Palacios, Luis E. (2005). *Gerencia de Proyectos. Un enfoque latino*. Caracas: UCAB. 2005.

PEMEX. (2006). *Guía para la aplicación de la geomecánica en el diseño de la perforación de pozos*. Publicado por PEMEX. México, 2006.

PDVSA. (2018). *Portal Corporativo de PDVSA*. www.intranet.pdvs.com. 2018.

PDVSA Intevep. (2005). *Política de Ética en el Negocio y Conflicto de Intereses de PDVSA Intevep*. Artes Gráficas PDVSA Intevep. Los Teques, Venezuela. 2005.

PDVSA Intevep. (2010). *Manual de Organización de PDVSA Intevep. Normativa INT-PG-001*. Centro de Información Técnica. Los Teques, Venezuela. 2010.

Porter, M. (1980). *Competitive Strategy*. The Free Press. New York. 1980.

Project Management Institute - PMI. (2017). *Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos (Guía del PMBOK)*. 6° edición. Pennsylvania, EE.UU. 2017.

Project Management Institute - PMI. (2013). *Código de Ética y Conducta Profesional*. Recuperado de: https://www.pmi.org/-/media/pmi/documents/public/pdf/ethics/pmi-code-of-ethics.pdf?sc_lang=temp=es-ES.

Risnes, R. (1992). *Petroleum related rock mechanics*. Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam – The Netherlands. First Edition. 1992.

Rivero, G.; Pineda, J.; Oliveira, D.; Belisario, R. (2013). *Evaluaciones experimentales de medios filtrantes: pruebas de retención de arena*. Documento técnico SEA-0309,2013. PDVSA Intevep. Los Teques – Venezuela.

Rogers, E. (1971). Sand control in Oil and Gas Wells. *Oil and Gas Journal*. (Nov. 1971), p.54-68.

Sanfilippo, F.; Brignoli, M.; Giacca, D.; Santarelli, F. (1997). Sand production: from prediction to management. *SPE 38185. SPE European Formation Damage Conference*. The Netherlands. June, 1997.

Saucier, R. (1974). Considerations in Gravel Pack Design. SPE 4030. *Journal of Petroleum Technology*. Volumen 26, nº 2, (Feb. 1974), p. 205-212.

Somogyi, G.; Pineda, J.; Oliveira, D.; Belisario, R. 2010. Metodología integral para la evaluación y el diseño de completaciones de pozos en campos con problemas de arenamiento. *VII SEFLUCEMPO*. Puerto Ordaz, Venezuela. 2010.

Tiffin, D.; King, G.; Larese, R.; Britt, L. (1998). New Criteria for Gravel and Screen Selection for Sand Control. *SPE 39437, SPE Formation Damage Control Conference*. Lafayette, Louisiana, USA, (Feb. 1998).

Tovar, J. (2006). *Diseño de completación para yacimientos con problemas de arenamiento. Manual de entrenamiento*. Innovative Engineering Systems Ltd (IESL). Aberdeen, Escocia. 2006.

Universidad Pedagógica Experimental Libertador - UPEL. (1998). *Manual de Trabajos de Grado de Especialización, Maestría y Tesis Doctorales*. Caracas. 1998.

Valarino, E.; Yáber, G.; Cemborain, M. (2010). *Metodología de la investigación paso a paso*. Primera Edición. Editorial Trillas. México. 2010.

Vásquez, A. (2001). *Introducción a la geomecánica petrolera*. Quinta edición. V.V.A. Consultores, C.A. Caracas, Venezuela. 2001.

Veeken, C.; Kooijman, A.; Kenter, C.; Davies, D. (1991). Sand Production Prediction Review: Developing an Integrated Approach. *Paper SPE 22792*. 1991.

Villalba, J. 1996. *Menú estratégico: el arte de la guerra competitiva*. Ediciones IESA. Caracas. 1996.

Zoback, M. 2006. *Reservoir Geomechanics*. Cambridge University Press. United Kingdom. First Edition. 2006.