

**EVALUACIÓN DE LA APLICABILIDAD DEL MODELO PACKER TANDEM
ANALYSIS EN LA INSTALACIÓN DE EMPAQUES TIPO TÁDEM EN
DIFERENTES COMPLETAMIENTOS DE SARTAS SELECTIVAS DE
ECOPETROL S.A.**

**MATEO NAVARRETE LASSO
MARCO ANDRES SERRANO VILLANUEVA**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ D.C.
2019**

**EVALUACIÓN DE LA APLICABILIDAD DEL MODELO PACKER TANDEM
ANALYSIS EN LA INSTALACIÓN DE EMPAQUES TIPO TÁDEM EN
DIFERENTES COMPLETAMIENTOS DE SARTAS SELECTIVAS DE
ECOPETROL S.A.**

**MATEO NAVARRETE LASSO
MARCO ANDRÉS SERRANO VILLANUEVA**

**Proyecto integral de grado para optar el título de:
INGENIERO DE PETRÓLEOS**

**Directora
Claudia Marcela Hernández cortés
Ingeniera de petróleos**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ D.C.
2019**

Nota de aceptación.

Ing. Laydy Paola Mora Parrado

Ing. Diego Camilo Araque Barrera

Bogotá D.C., Julio 2019.

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro:

Dr. MARIO POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos:

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Posgrados:

Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Decano de la Facultad de Ingenierías:

Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director Programa de Ingeniería de Petróleos:

Ing. JUAN CARLOS RODRÍGUEZ ESPARZA

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente, no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento, estos corresponden únicamente a los autores.

AGRADECIMIENTOS

Los autores presentan sus agradecimientos a:

Las directivas, cuerpo de docentes y demás funcionarios de la universidad de América que brindaron en todo momento las capacitaciones necesarias para la elaboración de este trabajo de grado junto con el progreso de nuestras carreras profesionales.

A **Ecopetrol S.A.** por brindarnos todo el apoyo que tuvieron a su alcance para el desarrollo del trabajo de grado.

Ing. **Marcela Hernández**, directora, por su paciencia, asesoría y tiempo para hacer exitoso este trabajo de grado.

Ing. **Yatnielah Pirela**, orientadora, que tuvo en cuenta este trabajo de grado y logro enfocarlo de manera eficiente.

A **Valeria Suárez**, por brindarnos todo el apoyo que necesitábamos sin importar las circunstancias en las que nos encontrábamos.

Ing. **Diego Mariño**, por tomarse toda la paciencia para resolver y aclarar nuestras dudas ante cualquier necesidad que se presentó durante este trabajo de grado.

Ing. **Leonardo Gómez**, por transmitirnos parte de su conocimiento en la elaboración de este trabajo de grado.

DEDICATORIA

A mi madre Olga Lucía, por su amor y apoyo incondicional, sin ella no hubiese sido posible mi trayectoria profesional como ingeniero.

A mi padre Javier, por forjar en mí todos los valores necesarios para ser un hombre con principios.

A todas las personas que a lo largo de mi carrera universitaria me brindaron experiencias de vida y me ayudaron a ser una mejor persona.

Mateo Navarrete Lasso.

DEDICATORIA

A Mary Villanueva y Walter Serrano, mis padres, por todo el cariño, el tiempo y el esfuerzo que siempre me han dedicado.

A mis amigos, con los cuales tuve el placer de compartir diversas experiencias a lo largo de la carrera.

Marco Andrés Serrano Villanueva.

CONTENIDO

	Pag.
INTRODUCCIÓN	26
OBJETIVOS	27
1. COMPLETAMIENTO	28
1.1 COMPLETAMIENTO INFERIOR	28
1.1.1 Completamiento a hueco abierto.	29
1.1.2 Completamiento con liner ranurado.	29
1.1.3 Completamiento con hueco cementado y con liner	29
1.1.4 Completamiento con hueco abierto con mallas de control de arena y empaquetamiento con grava	30
1.1.5 Completamiento cementado con empaquetamiento de grava	30
1.1 COMPLETAMIENTO SUPERIOR	30
1.1.1 Completamiento sin tubería de Producción.	31
1.1.2 Completamiento con tubería de Producción sin Empaque.	31
1.1.3 Completamiento con tubería de Producción y con Empaque.	32
1.1.4 Completamiento Doble tubería de Producción y Empaque Doble	32
2. INYECCIÓN DE AGUA Y SARTA SELECTIVA	33
2.1 INYECCIÓN DE AGUA	33
2.1.1 Tipos de eficiencias en la inyección	33
2.1.1.1 Eficiencia areal	33
2.1.1.2 Eficiencia vertical.	33
2.1.2 Tipos de inyección.	33
2.1.2.1 Inyección periférica o externa	33
2.1.2.2 Inyección en arreglos o dispersa	34
2.1.2.3 Inyección de agua selectiva	35
2.2 DEFINICIÓN DE SARTA SELECTIVA	36
2.2.1 Diseño sarta selectiva	37
2.2.1.1 Selección de herramientas	38
2.2.1.2 Espaciamiento	38
2.2.1.3 Análisis de esfuerzos	38
2.2.2 Objetivo de la sarta selectiva	38
2.3 SARTAS SELECTIVAS UTILIZADAS POR ECOPETROL	38
2.3.1 Completamiento con empaques hidráulicos de cuñas	39
2.3.2 Espaciamiento entre empaques con cuñas	39
2.3.3 Cantidad de empaques de cuñas por pozo	40
2.3.4 Cantidad de empaques de cuñas por pie	41
2.3.5 Completamiento con/sin empaque cero	42
2.3.6 Completamiento con/sin junta de expiación.	43
2.3.7 Ubicación del mandril en la zona	43

3.	EMPAQUES	45
3.1	DEFINICIÓN DE LOS EMPAQUES	45
3.1.1	Componentes de un empaque	45
3.1.1.1	Ratch	46
3.1.1.2	Cuñas	46
3.1.1.3	Gomas	46
3.1.1.4	Gauge Ring	46
3.1.1.5	Mandril	46
3.2	CLASIFICACIÓN DE EMPAQUES	47
3.2.1	Anclaje	47
3.2.2	Conexión de empaque a sarta de producción	47
3.2.3	Número de tuberías y movimiento	48
3.2.4	Tipos de empaques	48
3.2.5	Recuperación de empaques	48
3.2.6	Sistema de Anclaje	48
3.2.6.1	Anclaje por rotación	48
3.2.6.2	Anclaje por tensión	48
3.3	TIPOS DE EMPAQUES	48
3.3.1	Empaques mecánicos	48
3.3.2	Empaques hidrostáticos	49
3.3.3	Empaques hidráulicos	49
3.3.4	Empaques hidráulicos tipo tándem	50
3.3.5	Empaques no integrales	51
3.4	EMPAQUES PARA SARTAS SELECTIVAS	52
3.4.1	Características de empaques para sartas selectivas	52
4.	ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y FALLAS	53
4.1	CARGAS EN LA TUBERIA	53
4.1.1	Colapso	54
4.1.2	Estallido	55
4.1.3	Axial	55
4.1.3.1	Balonamiento	56
4.1.3.2	Balonamiento inverso	57
4.1.3.3	Pandeo	57
4.1.3.4	Fuerzas tipo Pistón	59
4.1.3.5	Temperatura	61
4.1.3.6	Sumatoria de Fuerzas Axiales (Axial Load)	62
4.1.4	Triaxial	62
4.2	ESPECIFICACIONES TECNICAS	66
4.2.1	Colapso	67
4.2.1.1	Colapso por Fluencia	67
4.2.1.2	Colapso Plástico	67
4.2.1.3	Colapso Transicional	68

4.2.1.4	Colapso Elástico	68
4.2.2	Estallido	68
4.2.3	Axial	69
4.2.4	Triaxial	69
4.3	FACTORES DE DISEÑO	69
4.3.1	Factor de Diseño por Colapso	70
4.3.2	Factor de Diseño por Estallido	70
4.3.3	Factor de Diseño Axial	70
4.3.4	Factor de Diseño Triaxial	71
4.4	ENVOLVENTE OPERATIVA	72
4.5	SISTEMAS DE FALLA	73
4.5.1	Falla de conexión cuerpo principal – guía	74
4.5.2	Colapso del cuerpo principal (Mandrill).	74
4.5.3	Falla del Sistema de elementos de Sello.	75
4.5.4	Colapso en el cuerpo de la conexión pin-guía	75
4.5.5	Falla del tope del hombro-rodamiento	75
4.5.6	Falla del sistema de candado del cuerpo principal	75
5.	APLICACIÓN DEL MODELO PACKER TANDEM ANALYSIS	77
5.1	MODELO DE LUBINSKI	77
5.2	PREMISAS MODELO PACKER TANDEM	80
5.2.1	Modelo de Empaque Individual	80
5.2.2	Modelo de empaque intermedio	81
5.2.3	Empaque sin cuñas (Tándem).	82
5.3	MODELO PACKER TANDEM ANALYSIS (PTA)	83
5.3.1	Primera sección	85
5.3.2	Segunda sección	85
5.3.3	Tercera sección	86
5.3.4	Cuarta sección	87
5.3.5	Quinta sección	87
5.3.7	Séptima sección	88
5.3.8	Octava sección	89
5.4	EJEMPLO MODELO PTA	91
5.4.1	Datos de entrada WELLCAT	92
5.4.2	Ejemplo inyección total	94
5.4.2.1	Resultados inyección completa con PTA	96
5.4.3	Ejemplo inyección par	96
5.4.3.1	Resultados inyección par con PTA	97
5.4.4	Ejemplo inyección impar	98
5.4.4.1	Resultados de inyección impar con PTA.	99
6.	EVALUACION DE SARTAS SELECTIVAS TENIENDO EN CUENTA EL MODELO PACKER TANDEM ANALYSIS	101

6.1	CONDICIONES DE EVALUACIÓN PARA EL DISEÑO DE COMPLETAMIENTO	101
6.1.1	Tamaño de Casing y tubing	101
6.1.2	Grado de la tubería	102
6.1.2.1	Grado N80	102
6.1.2.2	Grado J55	102
6.1.3	Profundidad	103
6.1.4	Cantidad de empaques	103
6.1.5	Espaciamiento entre empaques	104
6.1.6	Presión de inyección	104
6.1.7	Tipo operación	105
6.1.7.1	Inyección total	105
6.1.7.2	Inyección par	106
6.1.7.3	Inyección impar	106
6.2	DIVISIÓN Y RESULTADOS DE LOS CASOS DE SIMULACIÓN	107
6.2.1	Primera sección	109
6.2.2	Segunda sección	111
6.2.3	Tercera sección	113
6.2.4	Cuarta sección	115
6.2.5	Quinta sección	117
6.2.6	Sexta sección	119
6.2.7	Séptima sección	119
6.2.8	Octava sección	121
6.2.9	Novena sección	123
6.2.10	Décima sección	125
6.2.11	Undécima sección	127
6.2.12	Duodécima sección	129
6.3	ANÁLISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS	129
6.3.1	Análisis Variables	129
6.3.1.1	Grado de tubería	129
6.3.1.2	Profundidades	129
6.3.1.3	Número de empaques	129
6.3.2	Análisis factores de seguridad	130
6.3.2.1	Factor de seguridad axial	130
6.3.2.2	Factor de seguridad triaxial	130
6.3.2.3	Factor de seguridad de estallido	130
6.3.2.4	Factor de seguridad de colapso	130
7.	CRITERIOS, RECOMENDACIONES PARA OPERACIONES DE EMPAQUES TIPO TÁNDEM	131
7.1	CONSIDERACIONES PARA LA AGRUPACIÓN DE DATOS	131
7.1.1	Consideraciones para los factores de diseño	131
7.1.2	Consideraciones para las variables	131

7.2	PARÁMETROS SEGÚN FACTORES DE DISEÑO	132
7.2.1	Parámetros factor de seguridad axial	132
7.2.1.1	Factor de seguridad axial a 3 empaques	132
7.2.1.2	Factor de seguridad axial a 5 empaques	138
7.2.2	Parámetros factor de seguridad triaxial	143
7.2.2.1	Factor de seguridad triaxial a 3 empaques	143
7.2.2.2	Factor de seguridad triaxial a 5 empaques	150
7.2.3	Parámetros factor de seguridad estallido	156
7.3	CRITERIOS, RECOMENDACIONES Y PROCEDIMIENTOS PARA ASENTAMIENTO DE EMPAQUES TIPO TÁNDEM	158
7.3.1	Criterios según variables expuestas	158
7.3.1.1	Criterios Profundidad	158
7.3.1.2	Criterios número de empaques	159
7.3.1.3	Criterios para tipo de operación	159
7.3.1.4	Criterios para presión de inyección	159
7.3.1.5	Criterios para tamaño de tubería	160
7.3.1.6	Criterios para grado de tubería	160
7.3.1.7	Criterios de espaciamento	161
7.3.2	Procedimiento y recomendaciones	161
7.4	APLICACION DEL MODELO PTA EN ESCENARIOS REALES	162
7.4.1	Primer caso	162
7.4.2	Segundo Caso	168
8.	CONCLUSIONES	175
9.	RECOMENDACIONES	177
	BIBLIOGRAFÍA	178
	ANEXOS	180

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Tipos de completamiento inferior	29
Figura 2. Tipos de completamiento superior	31
Figura 3. Método de inyección de agua periférica	34
Figura 4. Método de inyección de agua en arreglos o disperso	35
Figura 5. Completamiento de sarta selectiva	36
Figura 6. Diseño de sarta selectiva	37
Figura 7. Ejemplo de sarta selectiva	39
Figura 8. Ejemplo de espaciamiento entre empaques con cuñas	40
Figura 9. Ejemplo de cantidad de empaques de cuñas por pozo	41
Figura 10. Ejemplo de cantidad de empaques de cuñas por pie	42
Figura 11. Ejemplo de completamiento con empaque cero	43
Figura 12. Ejemplo de ubicación del mandril en la zona	44
Figura 13. Componentes de un empaque	46
Figura 14. Clasificación de empaques	47
Figura 15. Empaques mecánicos de producción modelo PMDJ	49
Figura 16. Empaque hidrostático de producción modelo RFH	49
Figura 17. Empaque hidráulico de producción modelo PHJ	50
Figura 18. Empaque hidráulico Tándem modelo THT	50
Figura 19. Empaque permanente modelo HS	51
Figura 20. Balonamiento	56
Figura 21. Pandeo	58
Figura 22. Fuerza piston	61
Figura 23. Esfuerzos Triaxiales	64
Figura 24. Capacidad de Cargas	72
Figura 25. Elementos de la envolvente operativa	73
Figura 26. Zonas de falla	74
Figura 27. Fuerza que ejerce el empaque a la tubería	78
Figura 28. Anclado de tubería a empaque y de empaque a revestimiento	79
Figura 29. Libre de tubería a empaque y anclado de empaque a revestimiento	79
Figura 30. Anclado de tubería a empaque y libre de empaque a revestimiento	80
Figura 31. Diagrama de Flujo de la Aplicación del Modelo PTA	84
Figura 32. Packer Tandem Analysis (PTA)	85
Figura 33. Variables para grados de tubería	86
Figura 34. Datos de entrada programa comercial	86
Figura 35. Corrección cargas axiales	87
Figura 36. Cargas totales halladas	87
Figura 37. Especificaciones técnicas halladas	88
Figura 38. Factores de diseños establecidos con los datos	88
Figura 39. Esquema de pozo tipo	92
Figura 40. Envolvente operativa de empaque hidráulico PCS-5	93
Figura 41. Estado mecánico de inyección total	95
Figura 42. Esquema de inyección par	97

Figura 43. Esquema inyección impar	98
Figura 44. Esquema de 3 empaques	103
Figura 45. Esquema de 5 empaques	104
Figura 46. Inyección total para estado mecánico de 3 y 5 empaques	105
Figura 47. Inyección par para estado mecánico de 3 y 5 empaques	106
Figura 48. Inyección impar para estado mecánico de 3 y 5 empaques	107
Figura 49. Esquema de simulaciones	108
Figura 50. Primera sección de la simulación	109
Figura 51. Segunda sección de la simulación	111
Figura 52. Tercera sección de la simulación	113
Figura 53. Cuarta sección de la simulación	115
Figura 54. Quinta sección de la simulación	117
Figura 55. Séptima sección de la simulación	119
Figura 56. Octava sección de la simulación	121
Figura 57. Novena sección de la simulación	123
Figura 58. Décima sección de la simulación	125
Figura 59. Undécima sección de la simulación	127
Figura 60. Estado mecánico Pozo A	163
Figura 61. Datos de entrada primer caso	165
Figura 62. Estado mecánico Pozo B	169
Figura 63. Datos de entrada segundo caso	171

LISTA DE CUADROS

	Pag.
Cuadro 1. Conceptos básicos de empaques tipo tándem	51
Cuadro 2. Grados API del Acero	66
Cuadro 3. Datos de entrada para el programa	93
Cuadro 4. Datos tenidos en cuenta para el diseño del pozo	94
Cuadro 5. Factores de diseño de Ecopetrol S.A.	96
Cuadro 6. Propiedades primer caso de tamaño de tubería	101
Cuadro 7. Propiedades segundo caso de tamaño de tubería	102
Cuadro 8. Relación de presión de inyección con caudal de inyección	105
Cuadro 9. Datos de entrada del primer caso	164
Cuadro 10. Datos de entrada del segundo caso	170

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Cargas de los empaques en inyección total	95
Tabla 2. Datos obtenidos modelo PTA inyección completa	96
Tabla 3. Cargas de los empaques en inyección par	97
Tabla 4. Datos obtenidos modelo PTA inyección par	98
Tabla 5. Cargas de los empaques en inyección impar	99
Tabla 6. Datos obtenidos modelo PTA inyección impar	99
Tabla 7. Resultados primera sección	110
Tabla 8. Resultados segunda sección	112
Tabla 9. Resultados tercera sección	114
Tabla 10. Resultados cuarta sección	116
Tabla 11. Resultados quinta sección	118
Tabla 12. Resultados séptima sección	120
Tabla 13. Resultados octava sección	122
Tabla 14. Resultados novena sección	124
Tabla 15. Resultados décima sección	126
Tabla 16. Resultados undécima sección	128
Tabla 17. Criterios de profundidad	158
Tabla 18. Criterios de número de empaques	159
Tabla 19. Criterios de tipo de operación	159
Tabla 20. Criterios de presión	160
Tabla 21. Criterios de tamaño de tubería	160
Tabla 22. Criterios de grado de tubería	161
Tabla 23. Criterios de espaciamiento	161
Tabla 24. Resultado Inyección total – Primer caso	165
Tabla 25. Resultado Inyección Impar- Primer caso	166
Tabla 26. Resultado Inyección Par – Primer caso	166
Tabla 27. Resultado Prueba tubería – Primer caso	167
Tabla 28. Resultado Prueba anular – Primer caso	167
Tabla 29. Resultado Inyección total – Segundo caso	171
Tabla 30. Resultado Inyección Par- Segundo caso	172
Tabla 31. Resultado Inyección Impar – Segundo caso	172
Tabla 32. Resultado Prueba tubería – Segundo caso	173
Tabla 33. Resultado Prueba anular – Segundo caso	173

LISTA DE ECUACIONES

	Pag.
Ecuación 1. Colapso	54
Ecuación 2. Esbeltez	54
Ecuación 3. Espesor	55
Ecuación 4. Estallido	55
Ecuación 5. Balonamiento	56
Ecuación 6. Balonamiento directo	57
Ecuación 7. Balonamiento inverso	57
Ecuación 8. Pandeo	58
Ecuación 9. Alojamiento por pandeo	59
Ecuación 10. Momento de inercia	59
Ecuación 11. Fuerza tipo piston	60
Ecuación 12. Alargamiento de longitud	60
Ecuación 13. Temperatura	61
Ecuación 14. Sumatoria fuerza axial	62
Ecuación 15. Estrés VME	63
Ecuación 16. Carga Axial	64
Ecuación 17. Carga radial interna	65
Ecuación 18. Carga radial externa	65
Ecuación 19. Carga tangencial interna	65
Ecuación 20. Carga tangencial externa	65
Ecuación 21. Cedencia por Colapso	67
Ecuación 22. Colapso Fluencia	67
Ecuación 23. Colapso Plástico	67
Ecuación 24. Colapso Transicional	68
Ecuación 25. Colapso Fluencia	68
Ecuación 26. Cedencia por Estallido	69
Ecuación 27. Cedencia por carga axial	69
Ecuación 28. Factor de Diseño	69
Ecuación 29. Diseño por colapso	70
Ecuación 30. Factor de Diseño por Estallido	70
Ecuación 31. Factor de Diseño axial	71
Ecuación 32. Factor de Diseño triaxial	71
Ecuación 33. Fuerza tubería a empaque	77
Ecuación 34. Fuerzas empaque a revestimiento	78
Ecuación 35. Fuerza tubería al empaque modificado a empaque individual	81
Ecuación 36. Fuerza tubería al empaque modificado a empaque individual resultante	82
Ecuación 37. Fuerza tubería al empaque modificado a tándem	82
Ecuación 38. Fuerza tubería al empaque tándem	83

LISTA DE GRAFICAS

	Pag.
Gráfica 1. Graficas modelo PTA. FD Axial	89
Gráfica 2. Modelo PTA. FD Triaxial	90
Gráfica 3. Modelo PTA. FD Estallido	90
Gráfica 4. Modelo PTA. FD Colapso	91
Gráfica 5. Factor de Seguridad Axial – Profundidad 5000 ft – 3 empaques – Espaciamiento 300 ft	133
Gráfica 6. Factor de Seguridad Axial – Profundidad 5000 ft – 3 empaques – Espaciamiento 400 ft	133
Gráfica 7. Factor de Seguridad Axial – Profundidad 5000 ft – 3 empaques – Espaciamiento 500 ft	134
Gráfica 8. Factor de Seguridad Axial – Profundidad 8000 ft – 3 empaques – Espaciamiento 300 ft	134
Gráfica 9. Factor de Seguridad Axial – Profundidad 8000 ft – 3 empaques – Espaciamiento 400 ft	135
Gráfica 10. Factor de Seguridad Axial– Profundidad 8000 ft – 3 empaques – Espaciamiento 500 ft	135
Gráfica 11. Factor de Seguridad Axial – Profundidad 10000 ft – 3 empaques – Espaciamiento 300 ft	136
Gráfica 12. Factor de Seguridad Axial – Profundidad 10000 ft – 3 empaques – Espaciamiento 400 ft	137
Gráfica 13. Factor de Seguridad Axial – Profundidad 10000 ft – 3 empaques – Espaciamiento 500 ft	137
Gráfica 14. Factor de Seguridad Axial – Profundidad 5000 ft – 5 empaques – Espaciamiento 300 ft	138
Gráfica 15. Factor de Seguridad Axial – Profundidad 5000 ft – 5 empaques – Espaciamiento 400 ft	139
Gráfica 16. Factor de Seguridad Axial – Profundidad 5000 ft – 5 empaques – Espaciamiento 500 ft	139
Gráfica 17. Factor de Seguridad Axial – Profundidad 8000 ft – 5 empaques – Espaciamiento 300 ft	140
Gráfica 18. Factor de Seguridad Axial – Profundidad 8000 ft – 5 empaques – Espaciamiento 400 ft	140
Gráfica 19. Factor de Seguridad Axial – Profundidad 8000 ft – 5 empaques – Espaciamiento 500 ft	141
Gráfica 20. Factor de Seguridad Axial – Profundidad 10000 ft – 5 empaques – Espaciamiento 300 ft	142
Gráfica 21. Factor de Seguridad Axial – Profundidad 10000 ft – 5 empaques – Espaciamiento 400 ft	142
Gráfica 22. Factor de Seguridad Axial – Profundidad 10000 ft – 5 empaques – Espaciamiento 500 ft	143
Gráfica 23. Factor de Seguridad Triaxial – Profundidad 5000 ft – 3 empaques – Espaciamiento 300 ft	144

Gráfica 24. Factor de Seguridad Triaxial – Profundidad 5000 ft – 3 empaques – Espaciamiento 400 ft	144
Gráfica 25. Factor de Seguridad Triaxial – Profundidad 5000 ft – 3 empaques – Espaciamiento 500 ft	145
Gráfica 26. Factor de Seguridad Triaxial – Profundidad 8000 ft – 3 empaques – Espaciamiento 300 ft	146
Gráfica 27. Factor de Seguridad Triaxial – Profundidad 8000 ft – 3 empaques – Espaciamiento 400 ft	147
Gráfica 28. Factor de Seguridad Triaxial – Profundidad 8000 ft – 3 empaques – Espaciamiento 500 ft	148
Gráfica 29. Factor de Seguridad Triaxial – Profundidad 10000 ft – 3 empaques – Espaciamiento 300 ft	148
Gráfica 30. Factor de Seguridad Triaxial – Profundidad 10000 ft – 3 empaques – Espaciamiento 400 ft	149
Gráfica 31. Factor de Seguridad Triaxial – Profundidad 10000 ft – 3 empaques – Espaciamiento 500 ft	149
Gráfica 32. Factor de Seguridad Triaxial – Profundidad 5000 ft – 5 empaques – Espaciamiento 300 ft	150
Gráfica 33. Factor de Seguridad Triaxial – Profundidad 5000 ft – 5 empaques – Espaciamiento 400 ft	151
Gráfica 34. Factor de Seguridad Triaxial – Profundidad 5000 ft – 5 empaques – Espaciamiento 500 ft	151
Gráfica 35. Factor de Seguridad Triaxial – Profundidad 8000 ft – 5 empaques – Espaciamiento 300 ft	152
Gráfica 36. Factor de Seguridad Triaxial – Profundidad 8000 ft – 5 empaques – Espaciamiento 400 ft	152
Gráfica 37. Factor de Seguridad Triaxial – Profundidad 8000 ft – 5 empaques – Espaciamiento 500 ft	153
Gráfica 38. Factor de Seguridad Triaxial – Profundidad 10000 ft – 5 empaques – Espaciamiento 300 ft	154
Gráfica 39. Factor de Seguridad Triaxial – Profundidad 10000 ft – 5 empaques – Espaciamiento 400 ft	154
Gráfica 40. Factor de Seguridad Triaxial – Profundidad 10000 ft – 5 empaques – Espaciamiento 500 ft	155
Gráfica 41. FS Colapso Encima	157
Gráfica 42. FS Colapso Debajo	157

GLOSARIO

COMPLETAMIENTO: conjunto de trabajos que se realizan en un pozo después de haber sido perforado para dejarlo en las condiciones adecuadas para desempeñar un determinado servicio.

COMPLETAMIENTO SUPERIOR: también llamado upper completion, es la configuración de tuberías en junto con herramientas y accesorios que permiten comunicar de óptimamente el fondo del pozo con la superficie.

COMPLETAMIENTO INFERIOR: también llamado lower completion, consta de todo el acondicionamiento que necesite el pozo desde la cara de la formación con el pozo hasta el revestimiento.

COMPRESION: resultante de una sobrepresión caracterizada por la reducción del volumen y un acortamiento en una determinada dirección del cuerpo sobre el cual se realiza la fuerza.

EFICIENCIA AREAL: es la fracción del área del patrón de flujo que es contactada por el agua de inyección.

EFICIENCIA VERTICAL: es la fracción del espesor de las arenas inyectadas afectada por la inyección del fluido. Depende de la movilidad de las capas inyectadas y la permeabilidad.

EMPAQUE: herramienta de completamiento cuya función es la de aislar y controlar la producción (o inyección) de fluidos junto con sus presiones de manera tal que se pueda prevenir fallas mecánicas dentro del casing o la zona productora.

ESPACIAMIENTO: consiste en ubicar herramientas en las profundidades adecuadas, con el fin de que estas funcionen de manera acorde al servicio para el cual son asentadas.

ESPACIO ANULAR: es el espacio comprendido entre la tubería de producción y el revestimiento por donde pueden fluir fluidos.

ESPESOR: es la diferencia que hay entre el OD y el ID dividido en 2, de este dependen propiedades de la tubería como el estallido, el colapso y los esfuerzos

axiales.

GRADO DE TUBERIA: grado del material del cual una tubería esta realizada.

HIDROCARBUROS: son aquellos compuestos químicos que se encuentran formados por hidrógeno y carbono.

INYECCION DE AGUA: es un método de recuperación secundaria utilizado para mejorar la eficiencia arial y vertical de un yacimiento.

POZO INYECTOR: se trata de un pozo perforado para inyectar fluido para mantener presión o aumentar producción.

PUNTO DE CEDENCIA: punto donde los aumentos en deformación o esfuerzos generan una deformación permanente.

SARTA SELECTIVA: es una combinación de varios tipos de tuberías y herramientas especializadas utilizadas para intervenir zonas específicas.

TENSION: fuerza interna aplicada por unidad de superficie.

TUBERIA: tubular de pozo utilizado para producir los fluidos dentro de un reservorio. Esta debe ser compatible con la geometría del pozo, la producción y las características de los fluidos del yacimiento.

WORKOVER: es la reparación o simulación de un pozo de producción existente con el propósito de prolongar, restaurar o potenciar la producción de hidrocarburos.

ABREVIATURAS

°	Grados
ΔL_{bal}	Cambio de longitud causado por el Balonamiento
ΔL_p	Cambio de longitud por efecto de la fuerza tipo Pistón
ΔP	Diferencial de Presión
ΔP_{an}	Diferencial de Presión en el anular en el empaque
ΔP_{ip}	Cambio de presión en el empaque de una condición a otra
ΔP_p	Cambio de presión promedio de una condición a otra
ΔP_t	Diferencial de Presión de la tubería en el empaque
A_i^a	Área interna de la tubería por encima del empaque
A_i^b	Área interna de la tubería en por debajo del empaque
A_o^a	Área externa de la tubería por encima del empaque
A_o^b	Área externa de la tubería
A_i	Área interna de la tubería
A_{icsg}	Área interna del revestimiento
A_l	Axial Load, sumatoria de las fuerzas
A_o	Área externa de la tubería
A_p	Área del empaque
A_{pi}	Área Interna del Empaque
API	Instituto americano del petróleo
A_{ti}	Área Interna de la Tubería
A_{to}	Área Externa de la Tubería
A_x	Área transversal de la tubería
Bwpd	Barriles de agua por día
CSG	Casing
C_t	Coeficiente e expansión térmica,
E	Módulo de Young
e	Esbeltez
F_a^a	Fuerza axial por encima del empaque
F_a^b	Fuerza Axial por debajo del empaque
F_{ax}	Fuerza Axial
f_{bal}	Fuerza de balonamiento
F_c	Fuerza del empaque al revestimiento
F_{oi}	Razón entre el OD y el ID de la tubería
F_p	Fuerza de la tubería al empaque
f_{pad}	Fuerza de pandeo
f_{pi}	Fuerza tipo pistón
f_t	Fuerza de temperatura
I	Momento de inercia de la tubería con respecto al diámetro
ID	Diámetro interno
L	Longitud de la tubería
OD	Diámetro externo

$^{\circ}\text{F}$	Grados Farenheit
P_{0^a}	Presión por encima de la tubería
P_{0^b}	Presión externa por debajo del empaque
P_{cyp}	Presión de colapso por fluencia
P_e	Presión de Colapso Plástico
P_{est}	Presión de estallido
P_i	Presión interna
P_o	Presión externa
P_p	Presión de Colapso Plástico
r	Espacio entre el OD de la tubería y el ID del revestimiento
t	Espesor de la tubería
W_{fd}	Peso del fluido desplazado
W_{ft}	Peso del fluido en la tubería
W_i	Peso de la tubería
Y_p	Punto de cedencia de la tubería
Y_{pa}	Presión de cedencia de la tubería corregida
μ	Coefficiente de Poisson
σ_a	Carga Axial
σ_r	Esfuerzo Radial
σ_{re}	Carga radial externa
σ_{ri}	Carga radial interna
σ_t	Esfuerzo Tangencial
σ_{te}	Carga tangencial externa
σ_{ti}	Carga tangencial interna
Σv_{me}	Estrés VME

RESUMEN

TITULO:

EVALUACIÓN DE LA APLICABILIDAD DEL MODELO PACKER TÁNDEM ANALYSIS EN LA INSTALACIÓN DE EMPAQUES TIPO TÁNDEM EN DIFERENTES COMPLETAMIENTOS DE SARTAS SELECTIVAS DE ECOPETROL S.A.

DESCRIPCION:

En este proyecto se realizaron los parámetros de utilización del modelo matemático Packer Tandem Analysis (PTA), para su aplicación en diferentes configuraciones con sartas selectivas en los campos de Ecopetrol S.A., teniendo en cuenta los diferentes factores que influyen en su utilización.

En primera instancia se realizó la descripción de los tipos de completamiento utilizados con sartas selectivas al igual que la descripción de cada una de sus partes. Acto seguido se presentó más a profundidad los usos de las sartas selectivas en los procesos de inyección de agua al igual que los criterios de selección de la sarta dependiendo de las condiciones y del tipo de operación. En el tercer capítulo se describen los tipos de empaque, la herramienta que será el enfoque del proyecto, sus tipos, clasificación y su empleo en el uso de sartas selectivas.

Una vez explicados se pasan a explicar las cargas a las cuales son sometidas las tuberías y los empaques y la forma en la que se analizan y relacionan matemáticamente para efectos teóricos, también se profundiza en los conceptos de factores de diseño y especificaciones técnicas de estos componentes de completamiento. Posteriormente se pasa a describir el modelo bajo el cual está regido el PTA, así como una detallada explicación de su funcionamiento y un ejemplo aplicado a un pozo tipo.

Realizado esto, se realizan las corridas que permiten analizar el desempeño del modelo en diversos escenarios para discriminar su aplicación. Una vez realizadas se aplica el PTA a ejemplos de casos de la vida real para obtener una base más firme para evaluar la certeza de sus resultados. Finalmente se exponen los parámetros de utilización del modelo basados en los resultados analizados anteriormente junto con las recomendaciones pertinentes para su correcta aplicación.

Palabras clave: Empaque, completamiento, tándem, modelo matemático, sarta selectiva, inyección agua.

INTRODUCCIÓN

En el trabajo de grado a continuación se busca conocer la viabilidad de la implementación del modelo Packer Tandem Analysis (PTA) como modelo óptimo para un buen diseño de completamiento evitando fallas en los empaques hidráulicos tipo tándem en diferentes configuraciones de sartas selectivas las cuales de no ser tomadas con cautela en pozos inyectoros de Ecopetrol S.A. Para ello se harán numerosas corridas con diversos datos de pozos reales y ficticios a manera de simulación. Esto con el fin de determinar a que condiciones estas herramientas tienen la posibilidad de fallar.

Es de recordar que una falla en completamiento puede conllevar a costos adicionales de cambios de tubería, a un reacondicionamiento del pozo o en el peor de los casos, una pérdida total del pozo.

Las corridas se realizarán utilizando el programa Wellcat™ de diseño de tuberías de la empresa Landmark de Halliburton, utilizado por Ecopetrol S.A. Si bien este programa es muy completo y competente como simulador no tiene la función del empaque tándem dentro de su sistema. Para ello se tiene el modelo matemático PTA el cual ajustara los datos provenientes del programa simulador para el uso correcto del empaque en cuestión.

Una vez realizadas estas corridas se entrará a hacer un extenso análisis de los causales de las fallas a fin determinar sus orígenes y establecer criterios fiables de selección y aplicabilidad de estas versátiles herramientas.

Los criterios de evaluación a utilizar serán determinados dentro del trabajo teniendo en cuenta las características cruciales al evaluar un completamiento entero y la herramienta sola con el objetivo de tener un estudio prudente del desempeño del empaque solo y en conjunto.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Establecer criterios del uso de los empaques tándem con una evaluación de aplicabilidad del modelo Packer Tandem Analysis (PTA) en la instalación de diferentes configuraciones de sartas selectivas de Ecopetrol S.A.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Describir los completamientos con sartas selectivas utilizadas por Ecopetrol en los procesos de inyección.
2. Identificar cuáles son las fallas que se presentan en los empaques tipo Tándem.
3. Realizar la descripción del proceso y del modelo matemático que calcula el impacto que generan los empaques tándem sobre el análisis de esfuerzos de completamiento (Tubing Stress Analysis).
4. Analizar el impacto que producen los diferentes servicios, configuraciones y condiciones de sartas selectivas con empaques tándem haciendo uso del modelo matemático.
5. Evaluar la aplicabilidad del modelo PTA teniendo en cuenta diseños de sartas selectivas a diferentes condiciones de operación dentro de los pozos de inyección de Ecopetrol S.A.
6. Establecer criterios, recomendaciones y procedimientos para el asentamiento de empaques sin cuñas como empaques intermedios en sartas selectivas utilizadas para las operaciones de Ecopetrol.

1. COMPLETAMIENTO

En este capítulo se tendrán en cuenta los completamientos que se utilizan principalmente dentro de la empresa Ecopetrol S.A; para ello se hace una breve explicación de las caracterizaciones que estos tienen, junto con sus principales ventajas y desventajas.

Finalizada la perforación de un pozo, es necesario implementar un completamiento adecuado para las condiciones de operación que se vayan a realizar, sean estas de inyección o de producción. El completamiento de pozos contempla todas las condiciones que este tiene para su posterior diseño, las herramientas que se deben bajar a fondo y que opciones se deben tomar para así producir la máxima optimización, para producir hidrocarburos, o para generar una óptima inyección dentro de un yacimiento.

El completamiento se comprende como todo mantenimiento posterior a la perforación hasta el punto de la producción y su campo de acción se efectúa desde la cara del pozo que contacta el yacimiento hasta la superficie donde se encuentra el sistema de preventoras (BOP). Al ser un campo de acción considerablemente amplio, el completamiento se divide en lo que se conoce como completamiento inferior (Lower completion) y completamiento superior (Upper Completion).¹

1.1 COMPLETAMIENTO INFERIOR

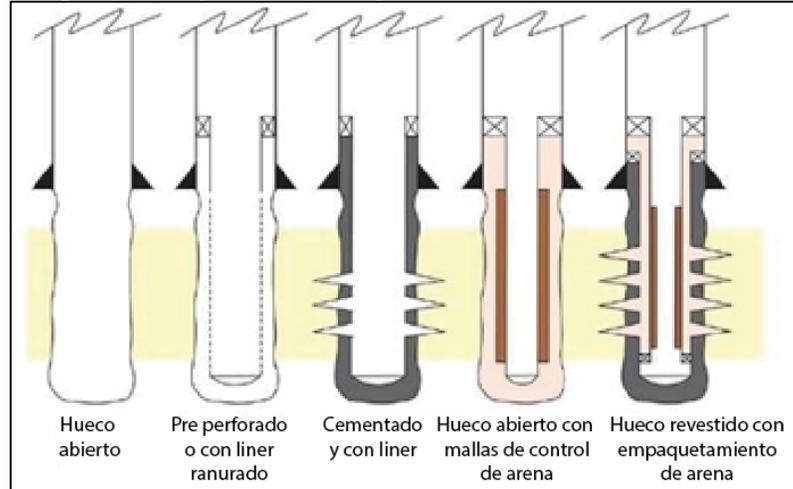
El completamiento inferior o también llamado lower completion consta de todo el acondicionamiento que necesite el pozo desde la cara de la formación con el pozo hasta el revestimiento. Sus aplicaciones derivan en revestir el intervalo productor con el casing, realizar empaques con gravas y cañonear zonas de interés, existen diferentes tipos de completamientos que deben ser analizados según las características que tiene el pozo.

Dependiendo del tipo de perforación que se haya realizado, sea este de manera convencional o de manera direccional, se debe tener en cuenta el tipo de completamiento que se le vaya a implementar al pozo. Así mismo se debe ver que tan complejo es la formación productora para poder seleccionar el completamiento más apropiado. En total existen 5 métodos que se utilizan en el completamiento inferior, todos estos se mencionan en la **Figura 1**.²

¹ CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Analisis del impacto de empaques tándemomo empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería completamientos de sartas selectivas , Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017. P 12.

² ibid. p. 18.

Figura 1. Tipos de completamiento inferior.



Fuente: BELLARBY J. Well completion Design. Aberdeen, UK. Elsevier. 2009. p 16.

1.1.1 Completamiento a hueco abierto. Es considerado como el tipo de completamiento más sencillo de todos, depende de la litología en donde se haya realizado la perforación. Básicamente no tiene ninguno tipo de complicaciones y es el que menor costo operacional tiene al no tener que aplicar herramientas. Permite el paso de fluidos sin problema, pero hay que recalcar que en futuros acondicionamientos de pozos puede llegar a tener problemas.³

1.1.2 Completamiento con liner ranurado. Este método es mucho más complejo que el anterior y de mismo modo más seguro. Se utiliza en formaciones en donde la litología no presente mayores riesgos de colapsos. A pesar de esto, puede presentarse un aumento en la producción de arena, por lo que es necesario aplicar unas ranuras lo suficientemente pequeñas que logren eliminar la presencia de arenas y lo suficientemente grandes para no chocar con el yacimiento.⁴

1.1.3 Completamiento con hueco cementado y con liner. De todos los completamientos inferiores este es el más común de todos. Ofrece la posibilidad de cementar el anular evitando así posibles colapsos gracias a la poca consolidación que pueda llegar a tener la formación. De mismo modo ofrece un aislamiento entre la formación y el pozo ofreciendo así un aislamiento hidráulico. Para generar las pequeñas conexiones entre el pozo y la formación se realiza distintos tipos de cañoneos rompiendo la tubería y llegando a la formación.⁵

³ BELLARBY J. Well completion Design. Aberdeen, UK. Elsevier. 2009. p 12.

⁴ CALDERON y CASTRO. Op. Cit., p. 19.

⁵ Ibíd. p. 19

1.1.4 Completamiento con hueco abierto con mallas de control de arena y empaquetamiento con grava. Este completamiento tiene una configuración especial con el hueco abierto; se utiliza cuando se puede llegar a considerar un aumento en la producción de arenas. En esencia son dos tipos de completamiento que se unifican todo con el fin de mitigar la presencia de arenas. Se debe tener en cuenta el tamaño de las arenas para la operación de este tipo de completamiento.⁶

1.1.5 Completamiento cementado con empaquetamiento de grava. Al igual que el anterior, es la unificación de dos métodos de completamiento inferior. Su fin consta de prevenir el colapso de la formación y de mismo modo poder mitigar la producción de arena. es un proceso bastante peculiar y usado en casos específicos. De nuevo, al igual que el caso del completamiento con cementación, se debe cañonear el pozo para generar canales de flujo del yacimiento hasta el pozo.⁷

1.1 COMPLETAMIENTO SUPERIOR

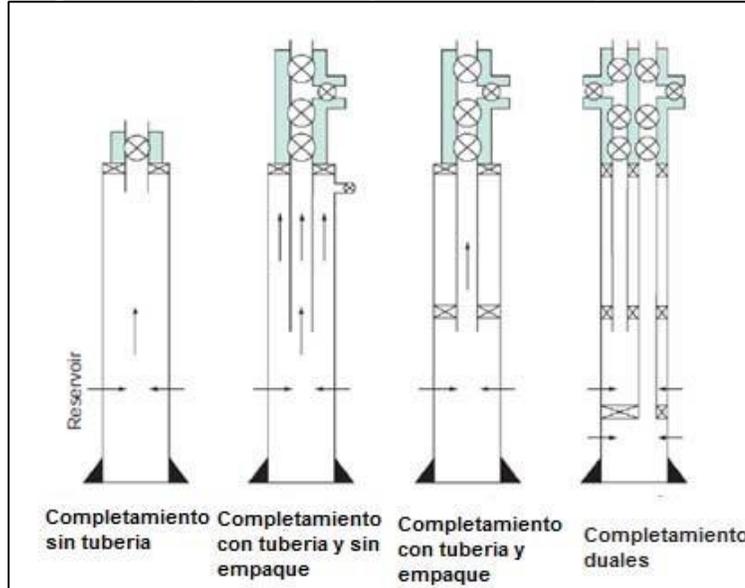
El completamiento superior, o también llamado como Upper completion, es todo el estudio del completamiento desde la tubería de revestimiento hasta el cabezal del pozo. Su principio consta de conducir los fluidos desde el completamiento del yacimiento a las facilidades en superficie. Para este fin, se debe hacer un análisis de la configuración de la tubería a bajar en conjunto con las herramientas y accesorios que permitan generar una buena comunicación entre la zona productora y el pozo de tal manera que se logre concretar el objetivo del pozo, una buena comunicación entre el fondo del pozo con la superficie.⁸ Existen un total de 5 tipos de completamientos superiores como se puede ver en la **Figura 2.**

⁶ Ibíd. p. 20

⁷ Ibíd.

⁸ CORTES, Claudia Marcela. Upper Completion o CPL Superior.[diapositivas] .Neiva, Huila, Colombia. 2017.

Figura 2. Tipos de completamiento superior.



Fuente: BELLARBY J. Well completion Design. Aberdeen, UK: Elsevier. 2009. p 17.

En total se cuenta con un total de 5 tipos de completamientos superiores. Cada uno con características diferentes a los demás. A continuación, se describe cada tipo de completamiento superior:

1.1.1 Completamiento sin tubería de Producción. El completamiento sin tubería es el diseño más simple de todos los que se encuentran. Esto se basa en que el arreglo de tubería no es elaborado. Es un completamiento poco común ya que se necesita de una tubería de revestimiento compacta para que la energía dentro del yacimiento logre llevar los fluidos hasta superficie; fuera de esto la formación debe encontrarse bien consolidada. Finalmente, con todo lo anterior dicho, el sistema de producción que se tiene en cuenta cuando se piensa en este completamiento es por flujo natural.⁹

1.1.2 Completamiento con tubería de Producción sin Empaque. En este completamiento se puede controlar el flujo dentro del yacimiento, sea este por el anular o por la tubería de producción. Esto se logra con sistemas de control (válvulas) y bombeo dentro del arreglo de tubulares bajados a fondo de pozo. Los mecanismos de levantamiento artificial (SLA) que se pueden emplear son: bombeo

⁹ CALDERON y CASTRO. Op. Cit., p 24.

mecánico, bombeo de cavidades progresivas (PCP), y bombeo electro sumergible (ESP). 10

1.1.3 Completamiento con tubería de Producción y con Empaque. Cuando la tubería se acopla con un solo empaque se le denomina completamiento sencillo, este tipo de completamiento posee ciertas ventajas que serán nombradas a continuación:

- El empaque genera un sello para que los fluidos dentro del yacimiento no logren pasar dentro del anular, esto tiene como fin generar una mayor durabilidad dentro del revestimiento.
- Pasado el tiempo este puede llegar a convertirse en un pozo inyector gracias al diseño de completamiento.
- Dependiendo del tipo de empaque este puede usarse para fracturamiento hidráulico o estimulación ácida.

El empaque se baja a fondo y se ancla entre el revestimiento y la tubería de producción. Si el empaque se baja con la tubería se debe generar un análisis de esfuerzos en los empaques para determinar si las condiciones de operación son óptimas según sus condiciones de operación. ¹¹

1.1.4 Completamiento Doble tubería de Producción y Empaque Doble. Según el tipo de yacimiento, se debe hacer un diseño especial. En el caso de tuberías con dobles empaques se busca una prevención en zonas donde se encuentren presiones anómalas. Esto quiere decir profundidades en donde haya aumentos de presiones que puedan generar una matada de pozo. ¹²

A pesar de esto, en muchas ocasiones este tipo de completamientos terminan siendo poco satisfactorios para la implementación de inyección selectiva en las formaciones de interés, por lo que no se suficientes empaques para así generar una selección selectiva de las zonas de interés, el concepto de sarta selectiva se hace vital para el avance del trabajo junto con el concepto de inyección de agua.

¹⁰ TRUJILLO, Jaime y VALBUENA, María. Evaluación de la envolvente operacional de los empaques de completamiento; interpretación, implementación e impacto sobre el diseño de completamiento de un pozo, Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2018. p 16.

¹¹ *Ibíd.* p. 16.

¹² *Ibíd.* p. 18.

2. INYECCIÓN DE AGUA Y SARTA SELECTIVA

Teniendo en cuenta el concepto de completamiento, se debe entender que uno de sus principios es el de poder inyectar agua a una formación de manera que se pueda Generar algún tipo de beneficio a futuro. Es por esto que se debe tener en cuenta el concepto de inyección de agua en este trabajo de grado y posterior a su descripción se tiene en cuenta el concepto de sarta selectiva junto con todos sus objetivos.

2.1 INYECCIÓN DE AGUA

La inyección de agua es considerada uno de los métodos de recuperación secundaria más eficaces en la actualidad. Su fin consta de poder aplicar agua dentro de las distintas zonas de interés. esto tiene como objetivo la de poder mejorar la presión dentro del yacimiento. De igual manera, se ha podido determinar que la inyección tiene otro propósito como lo es desplazar los hidrocarburos de manera tal que llegase una mayor cantidad de producción hacia los pozos productores.

Mientras se fue realizando la inyección se pudo determinar que dependiendo del tipo de arreglo junto con las características que posee el yacimiento se puede lograr una mejora en la producción de un campo. Todo esto se logra con el fin de mejorar no solo una eficiencia areal sino vertical.

2.1.1 Tipos de eficiencias en la inyección. Dentro de la inyección de agua existen eficiencias que sirven para la mejora de la eficiencia de una inyección. A continuación, se hace un análisis de este tipo de eficiencias.

2.1.1.1 Eficiencia areal. Se tiene en cuenta como el área horizontal en donde se va a tomar en cuenta la inyección de agua. Termina siendo fundamental dentro del proceso de inyección ya que tiene en cuenta parámetros como las propiedades de la roca (porosidad, permeabilidad, conductividad).

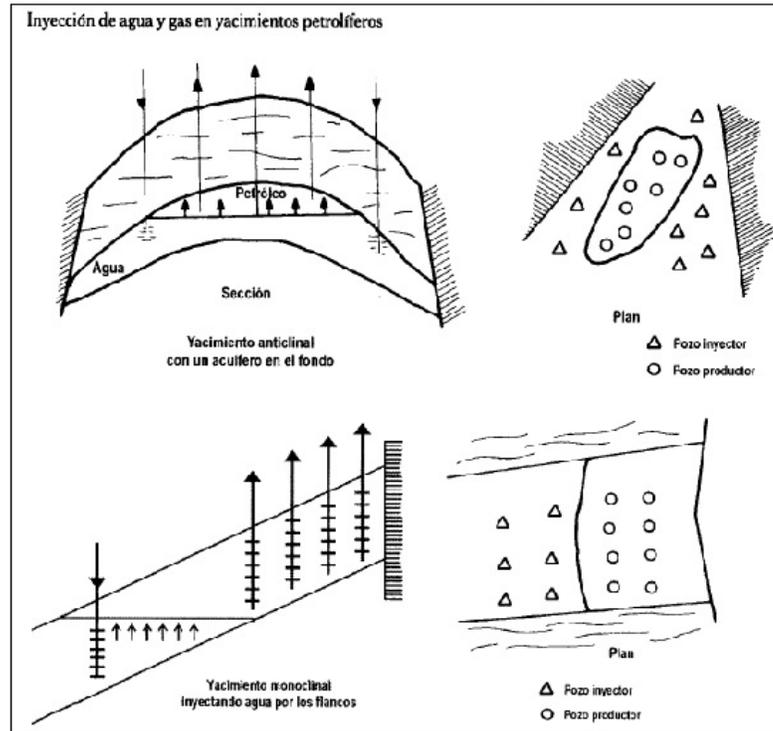
2.1.1.2 Eficiencia vertical. Este tipo de eficiencia, a comparación de la eficiencia areal, tiene en cuenta el espesor de las capas, esto termina siendo fundamental ya que dentro del estudio que se realiza se debe tomar en cuenta que esta característica toma en cuenta la cantidad de fluido que se piensa inyectar.

2.1.2 Tipos de inyección. De acuerdo al tipo de arreglo que se busque, y según las características que se posee del arreglo se puede llegar a un tipo de inyección que resulte más óptima para un campo. A continuación, se hace un breve análisis de los tipos de inyección encontrados en la industria.

2.1.2.1 Inyección periférica o externa. Es el método más popular cuando no se tiene un buen análisis del yacimiento y se busca hacer algún tipo de inyección de agua, su implementación consta en inyectar dentro del acuífero que se encuentra

debajo de la zona de petróleo de modo que este logre aumentar la presión y de esta forma se pueda tener un aumento en la producción¹³. A continuación, en la **Figura 3** se puede dar a entender la inyección externa.

Figura 3. Método de inyección de agua periférica.



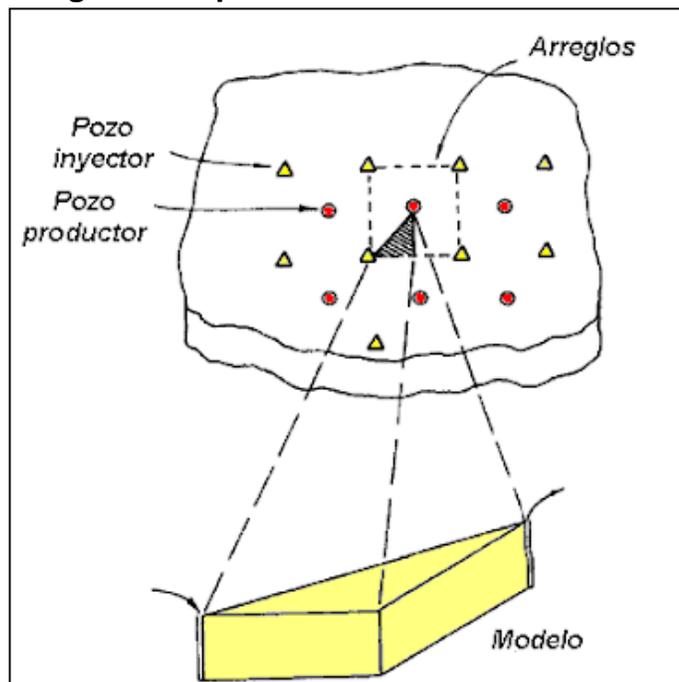
Fuente: PARIS DE FERRER, Magdalena. Inyección de agua y gas en Yacimientos Petrolíferos. 2da Edición. Maracaibo, Venezuela. 2001. p 13.

2.1.2.2 Inyección en arreglos o dispersa. Este tipo de arreglo se tiene en cuenta cuando se tiene conocimientos del yacimiento. Como tal, su principio consta de inyectar agua específicamente en la zona de petróleo de manera tal que este logre desplazarlo hacia el pozo productor, tiende a notarse un cambio algo dentro de la producción en los pozos productores. Se debe tener idea de como distribuir el pozo ya que de esta misma manera se tiene una mejora en los tipos de eficiencias explicadas anteriormente.¹⁴ En la **Figura 4** se tiene en cuenta el tipo de inyección explicado.

¹³ PARIS DE FERRER, Magdalena. Inyección de agua y gas en Yacimientos Petrolíferos. 2da Edición. Maracaibo, Venezuela. 2001. p 13.

¹⁴ Ibíd. p. 14.

Figura 4. Método de inyección de agua en arreglos o disperso.



Fuente: BAQUERO, Luis y VARGAS, Juan. Evaluación técnico financiera de la inyección de agua en un campo de la cuenca del Catatumbo colombiano mediante simulación analítica. Universidad de América. Facultad de ingenierías. 2018. p 61.

2.1.2.3 Inyección de agua selectiva. Según Baquero y Vargas¹⁵. Este tipo de inyección es utilizado de manera que se logre una optimización dentro del proceso de inyección. Para esto, se debe tener un diseño especial dentro la tubería de producción que logre restringir las zonas en donde no se requiera algún tipo de inyección. Por ende, la inyección de agua será mucho menor a la inyección de agua convencional.

La implementación de este tipo de inyección necesita del análisis de parámetros fundamentales como lo son la presión de yacimiento, permeabilidad, daño de formación, propiedades en específico de cada zona en la que se desea hacer una inyección. Para ello hay que tener en cuenta que los empaques son de vital importancia para la implementación de este tipo de inyección.

¹⁵ BAQUERO, Luis y VARGAS, Juan. Evaluación técnico financiera de la inyección de agua en un campo de la cuenca del Catatumbo colombiano mediante simulación analítica. Universidad de América. Facultad de ingenierías. 2018. p 61.

2.2 DEFINICIÓN DE SARTA SELECTIVA

El concepto de sarta selectiva se toma en cuenta teniendo la implementación de uno o más empaques en el momento que se baja la tubería de producción, hace parte del completamiento superior y se le conoce como completamiento con dos o más empaques. Su función es la de seleccionar zonas de interés gracias a los sellos que posee los empaques. Estos tipos de empaques sirven tanto para métodos de inyección como para métodos de producción. (Ver **Figura 5**).

Figura 5. Completamiento de sarta selectiva.



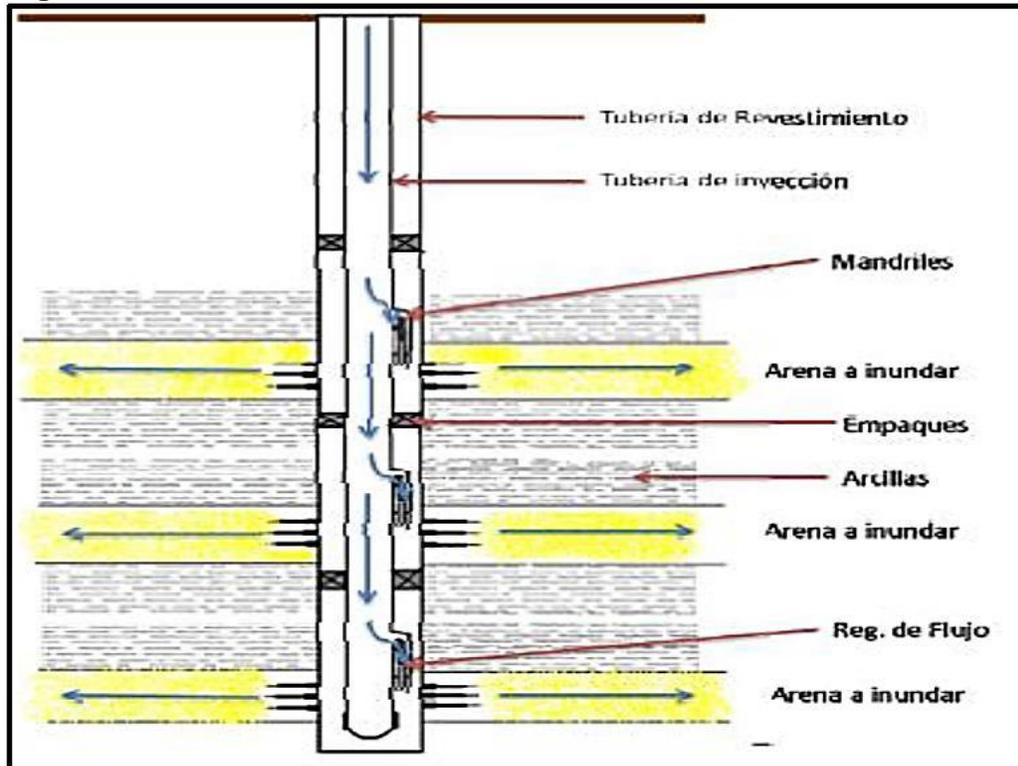
Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería completamientos de sarta selectivas, Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017. p 23.

La cantidad de empaques que se pueden bajar con la tubería varia de 2 a 21, este diseño termina siendo complejo y caro, por lo que se utilizan empaques tipo tándem, que logran disminuir los costos dentro del modelo. Pero, a pesar de esto, poseen un análisis de esfuerzo e hidráulicos complejos. ¹⁶

¹⁶ Ibíd.

2.2.1 Diseño sarta selectiva. El diseño de una sarta selectiva debe comprender distintos parámetros que serán esenciales para su funcionamiento. Primero se debe tener en cuenta que este tipo de diseños funciona teniendo sola tubería de producción, y en este se encuentra distintos tipos de herramientas que hace óptimo el desempeño de la inyección del pozo. A continuación, en la **Figura 6**, se tiene en cuenta los diseños típicos de una sarta selectiva.

Figura 6. Diseño de sarta selectiva



Fuente: ALFONSO, Carlos. Optimización de la inyección de agua en los pozos con sarta selectiva, mediante la simulación de flujo en el Campo Casabe. Trabajo de Grado. Ingeniero de Petróleos. Universidad De América. Colombia. 2009.

Para el diseño del completamiento hay que tener en cuenta varios conceptos para su óptimo desempeño. Según López y Mosquera¹⁷. Existen tres componentes de vital importancia para el diseño de una sarta selectiva:

¹⁷ LÓPEZ, Christian y MOSQUERA, Henry. Selección, diseño y análisis de esfuerzos para completamiento de inyección de agua selectiva. Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017. p 49.

2.2.1.1 Selección de herramientas. Es la capacidad de elegir todas las herramientas necesarias para que el completamiento haga su función, se utilizan herramientas como empaques, mandriles, conectores On-Off Tools, juntas de expansión, camisas y válvulas.

2.2.1.2 Espaciamiento. Hace referencia al concepto de ubicar las herramientas en las profundidades adecuadas con el fin que logren establecer de manera adecuada su función a cada tipo de servicio. Con un espaciamiento óptimo se busca maximizar la utilidad de dicha herramienta.

2.2.1.3 Análisis de esfuerzos. Posterior a la selección de las herramientas a usar, junto con las profundidades en las que van a ser utilizadas, se debe tener en cuenta un análisis de esfuerzos que puedan presentar todas las herramientas en fondo, para ello se tiene en cuenta las condiciones de presión y temperatura en las que se vera afectado el completamiento. Posteriormente, en el capítulo, se profundizará respecto al tema.

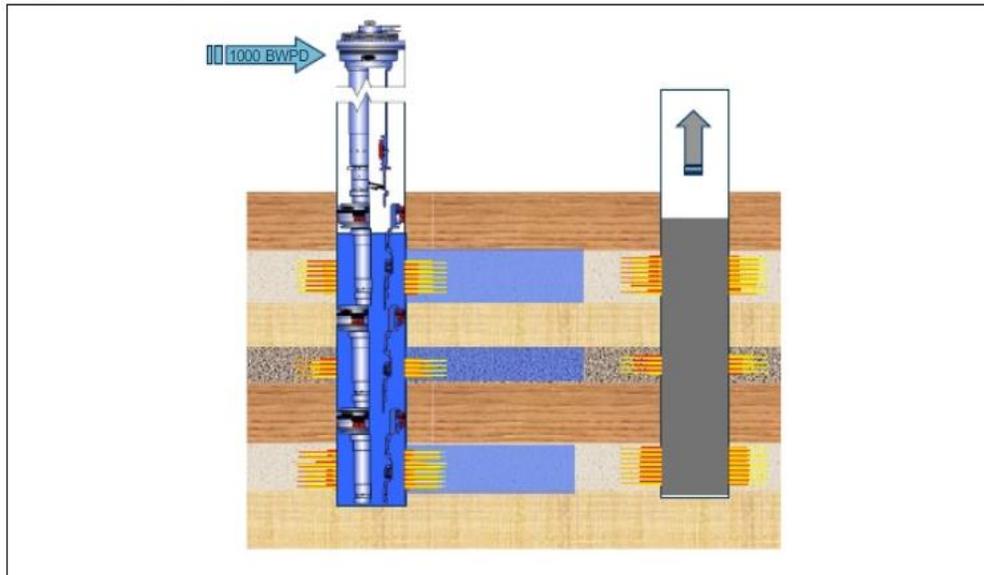
2.2.2 Objetivo de la sarta selectiva. La sarta selectiva tiene la capacidad de mejorar la eficiencia de barrido en pozos de inyección de agua, esto teniendo en cuenta la premisa que un pozo que posea sarta selectiva sirve para inyector o producir en zonas de interés. Esto, en otras palabras, hace alusión a una mejora de eficiencias de barrido encontradas dentro de la inyección, como lo es la eficiencia arial, y eficiencia vertical.

Para la implementación de una sarta selectiva es fundamental tener en cuenta los conceptos de empaques y como estos alteran las condiciones de un pozo inyector.

2.3 SARTAS SELECTIVAS UTILIZADAS POR ECOPETROL

A continuación, se explicarán los parámetros utilizados para el diseño de las configuraciones de sargas selectivas comúnmente utilizadas por esta empresa. Se debe tener en cuenta que estas sargas son diseñadas con base a las exigencias de la operación y la disposición del terreno por lo cual, las herramientas utilizadas y los espaciamientos de estas varían. Ninguna sarta es igual a otra. A continuación, se ilustra un ejemplo de las sargas selectivas utilizadas en la **Figura 7**.

Figura 7. Ejemplo de sarta selectiva



Fuente: MORENO, Andrés. Metodología para la evaluación técnica en proyectos de inyección con sartas selectivas, aplicado a la fase piloto en campo Tibú (Ecopetrol), Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías. 2011 p 32.

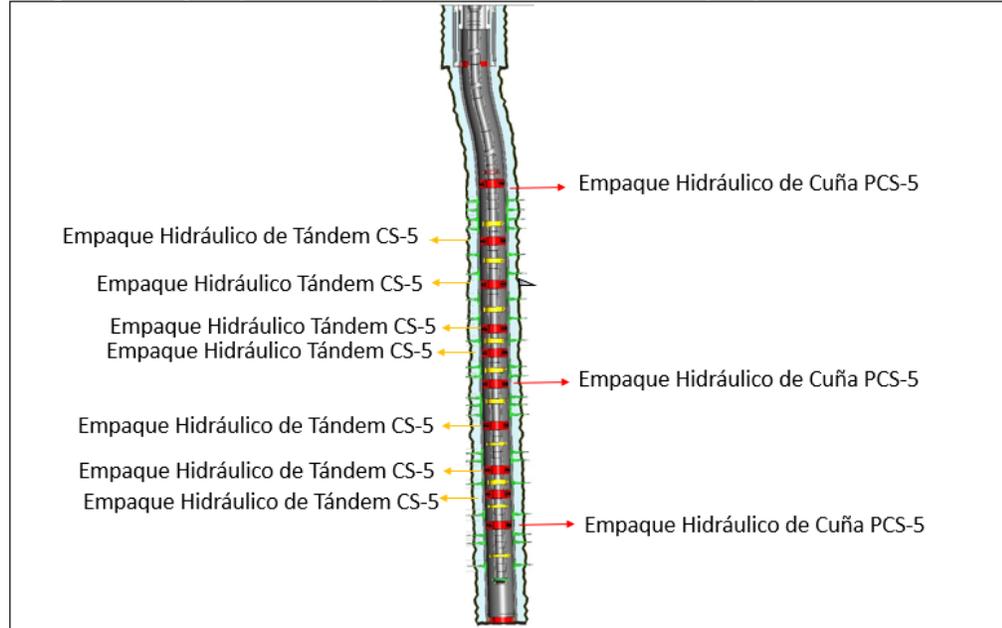
2.3.1 Completamiento con empaques hidráulicos de cuñas. Estas son sartas especialmente utilizadas en completamientos con varios empaques donde la distancia entre áreas es reducida. Estas permiten analizar el espaciamiento entre empaques con cuñas, la cantidad de empaques a utilizar por pozos y la cantidad de cuñas presentes por pie¹⁸.

2.3.2 Espaciamiento entre empaques con cuñas. Se refiere al espacio necesario para ubicar los empaques con cuñas en la tubería. En la **Figura 8** se puede ver lo dicho anteriormente¹⁹:

¹⁸ LUCUARA, Erika y TAHA, Layla. Desarrollo de un pozo operacional para el diseño de sartas selectivas en pozos inyectoros del campo la Cira Infantas, Fundación Universidad de América, Facultad de Ingenierías. 2018. p 92.

¹⁹Ibíd. p 92

Figura 8. Ejemplo de espaciamiento entre empaques con cuñas

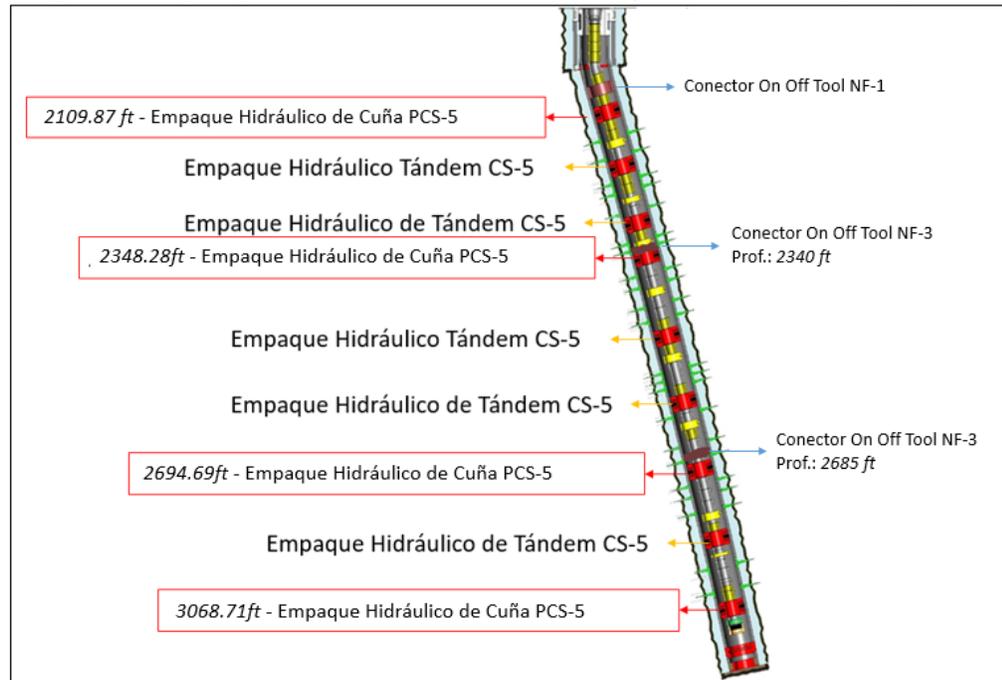


Fuente: LUCUARA, Erika y TAHA, Layla. Desarrollo de un pozo operacional para el diseño de sartas selectivas en pozos inyectores del campo la Cira Infantas, Fundación Universidad de América, Facultad de ingenierías. 2018. p 92.

2.3.3 Cantidad de empaques de cuñas por pozo. Con esta variable se determina la cantidad de empaques con cuñas utilizados por cada pozo inyector a fin de establecer comportamientos comunes en los diseños de las sartas corridas. Cabe resaltar que esta variable está en función a la longitud del pozo. En la **Figura 9** se puede apreciar lo anteriormente dicho²⁰.

²⁰ Ibíd. p .93

Figura 9. Ejemplo de cantidad de empaques de cuñas por pozo.

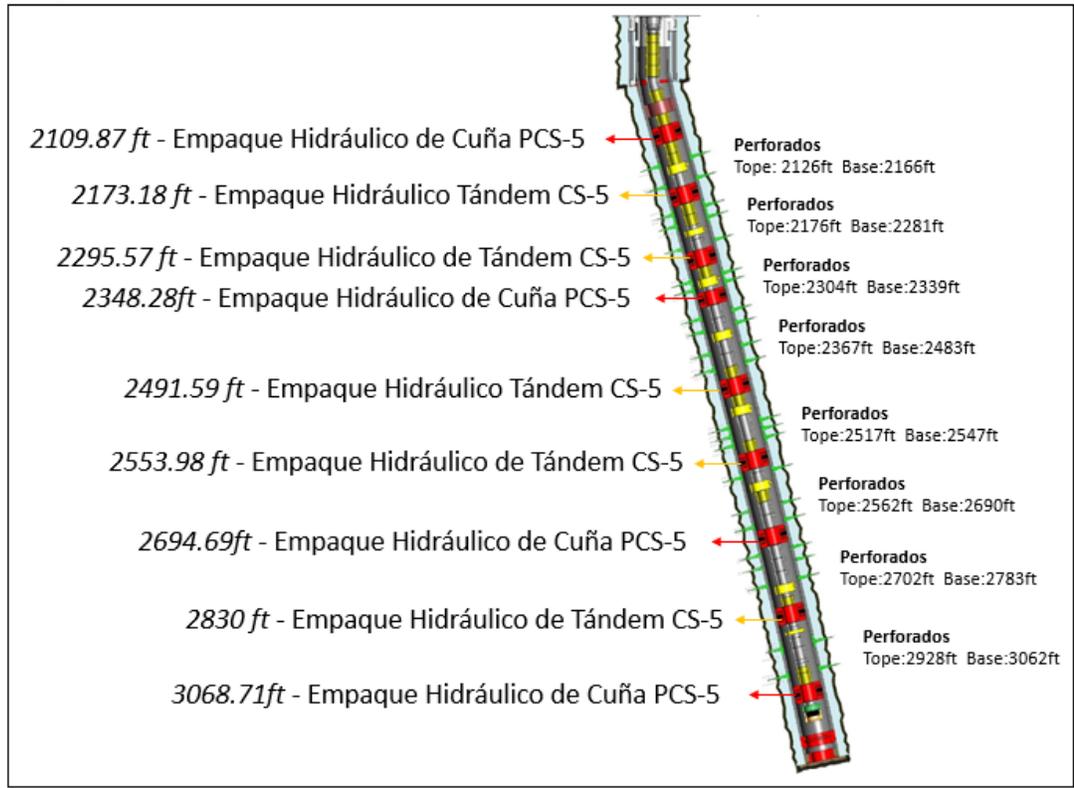


Fuente: LUCUARA, Erika y TAHA, Layla. Desarrollo de un pozo operacional para el diseño de sartas selectivas en pozos inyectores del campo la Cira Infantas, Fundación Universidad de América, Facultad de ingenierías. 2018. p 93.

2.3.4 Cantidad de empaques de cuñas por pie. Con esta variable se utiliza como un indicador, el cual relaciona la longitud de las zonas cañoneadas con la cantidad de espaciamentos presentes en el completamiento del pozo inyectivo²¹ como lo denota la **Figura 10**.

²¹ Ibíd.

Figura 10. Ejemplo de cantidad de empaques de cuñas por pie.

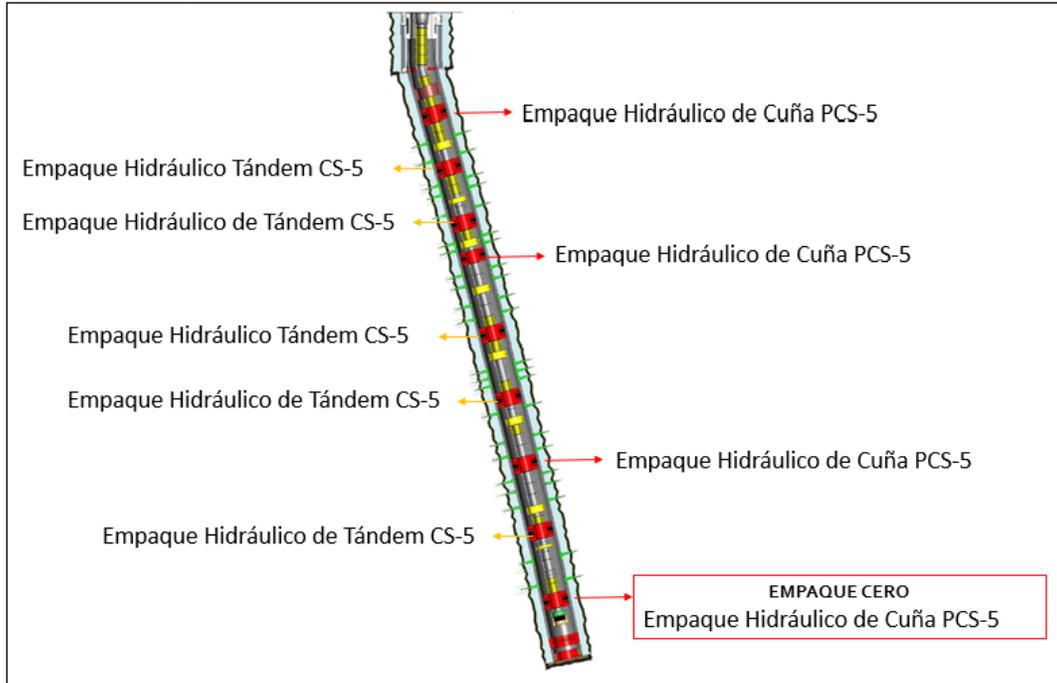


Fuente: LUCUARA, Erika y TAHA, Layla. Desarrollo de un pozo operacional para el diseño de sartas selectivas en pozos inyectoros del campo la Cira Infantas, Fundación Universidad de América, Facultad de ingenierías. 2018. p 94.

2.3.5 Completamiento con/sin empaque cero. Esta variable determina si se utilizara o no un empaque hidráulico de cuñas (empaque cero) al fondo del pozo. Este empaque aísla el fondo de los últimos intervalos perforados evitando así el arenamiento y el taponamiento de la zona cañoneada más profunda²², como la **Figura 11** lo ilustra.

²² Ibíd. p 94

Figura 11. Ejemplo de completamiento con empaque cero



Fuente: LUCUARA, Erika y TAHA, Layla. Desarrollo de un pozo operacional para el diseño de sartas selectivas en pozos inyectores del campo la Cira Infantas, Fundación Universidad de América, Facultad de ingenierías. 2018. p 95.

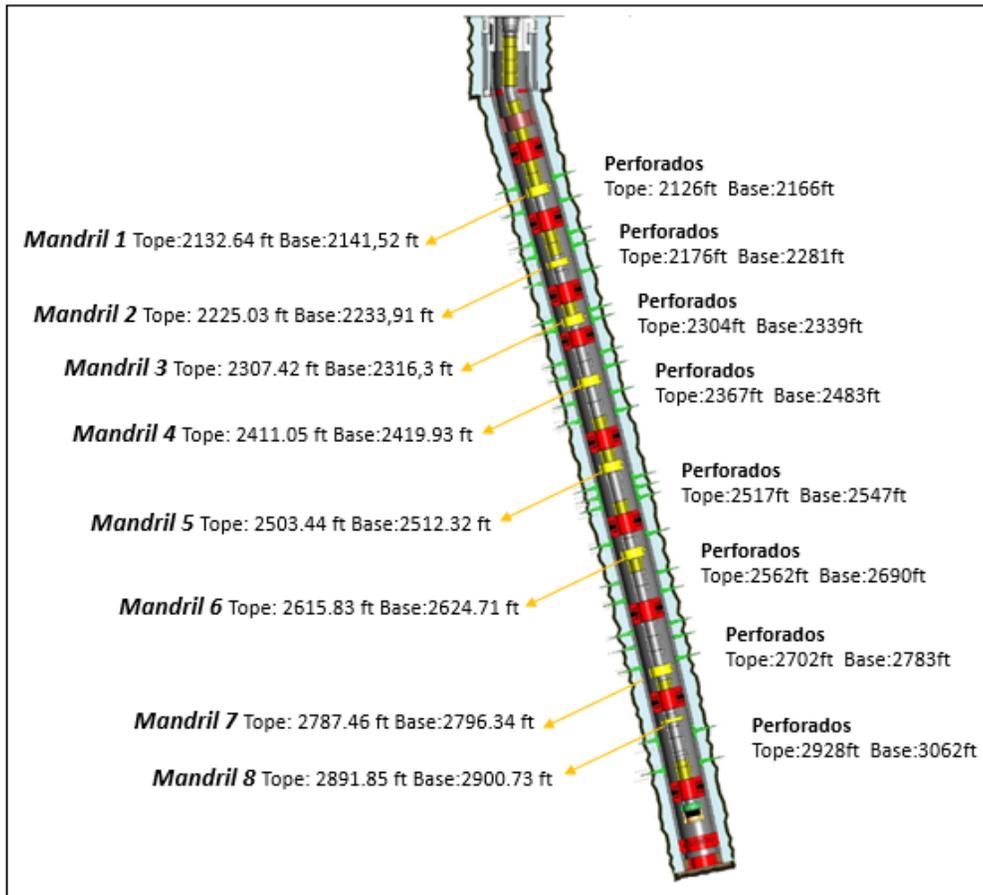
2.3.6 Completamiento con/sin junta de expiación. Con esta variable se determina la función de esta herramienta en el diseño de cada sarta selectiva²³.

2.3.7 Ubicación del mandril en la zona. Para estimar esta variable se deben tener en cuenta factores como la ubicación del mandril con respecto al inicio de la zona que fue cañoneada y el indicador de la posición del mandril en referencia a la longitud completa de la zona, ya que la ubicación del mandril está en función de su longitud y la zona cañoneada. Esta variable es crucial para el diseño de las sartas selectivas ya que son los mandriles las herramientas que permiten el flujo de agua en la zona a estimular²⁴. (Ver **Figura 12**)

²³ *Ibíd.* p 97.

²⁴ *Ibíd.*

Figura 12. Ejemplo de ubicación del mandril en la zona.



Fuente: LUCUARA, Erika y TAHA, Layla. Desarrollo de un pozo operacional para el diseño de sartas selectivas en pozos inyectores del campo la Cira Infantas, Fundación Universidad de América, Facultad de ingenierías. 2018. p 97.

3. EMPAQUES

Dentro del completamiento del pozo, y especialmente en el diseño del completamiento superior, los empaques son una parte fundamental para que el pozo pueda desempeñar su máximo potencial, en el siguiente capítulo se hace una retrospectiva de los tipos de empaques junto con las características que deben poseer para ser parte de una sarta selectiva.

3.1 DEFINICIÓN DE LOS EMPAQUES

Los empaques son una herramienta fundamental dentro del completamiento. Su principal función es la de aislar y controlar la producción (o inyección) de fluidos junto con sus presiones de manera tal que se pueda prevenir fallas mecánicas dentro del casing o la zona productora. Un empaque debe cumplir con al menos uno de los siguientes objetivos:

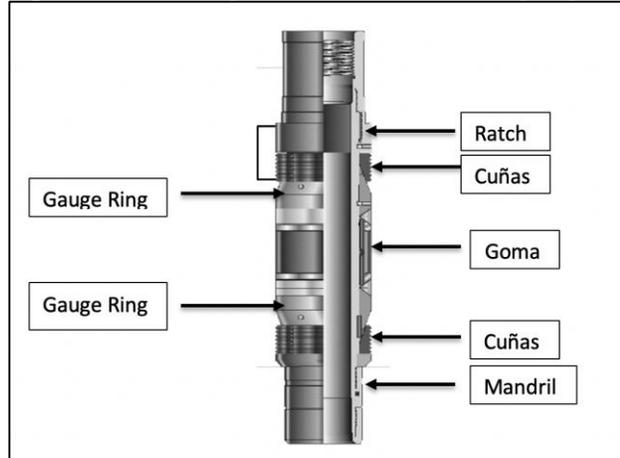
“Todos los empaques modernos combinan tres (3) elementos básicos, ellos son:

- Un mecanismo que permita correr el empaque y sentarlo a una profundidad determinada.
- Un elemento empacante que se expanda para llenar el espacio anular y efectúe un sello que soporte la presión diferencial existente, la temperatura y la acción química que se presente en el pozo.
- Un mandril o tubo de flujo que permita el paso de aceite, gas, agua o herramientas a través del empaque.”²⁵

3.1.1 Componentes de un empaque. Los empaques poseen ciertos componentes como se ilustra en la **Figura 13**. Todos estos componentes en conjunto forman la capacidad de aislar las zonas de interés. A pesar de esto existen partes que son exclusivas de ciertos empaques, como se explica a continuación:

²⁵ DELGADO, Juan. Especificaciones técnicas, manual – guía de empaque de operaciones de completamiento y reacondicionamiento de pozos. Universidad Industrial de Santander. Colombia. 2005. p 18.

Figura 13. Componentes de un empaque



Fuente: CORTES, Claudia. Componentes de completamiento. [diapositivas]. Neiva, Huila, Colombia. 2016.

3.1.1.1 Ratch. Es usado generalmente en los empaques hidráulicos. Su función es la de mantener el empaque en posición de asentamiento con base en un sistema de roscas.

3.1.1.2 Cuñas. Es usado para el anclaje que se necesita en la tubería de revestimiento. Esta herramienta impide todo tipo de movimiento que tenga el empaque dentro de la tubería, existen casos como el del empaque tipo tándem en donde no se posee esta herramienta.

3.1.1.3 Gomas. Son herramientas que permiten el sello necesario entre el anular y la tubería. El éxito de un óptimo desempeño de un empaque es el buen contacto de las gomas. Todos los empaques poseen estas herramientas que en conjunto con las cuñas permite aislar las zonas de interés.

3.1.1.4 Gauge Ring. También llamados Ring calibradores, son los componentes de los empaques en donde se encuentra su máximo diámetro (OD). Se ubican en los extremos de la goma permitiendo una mejor adherencia.

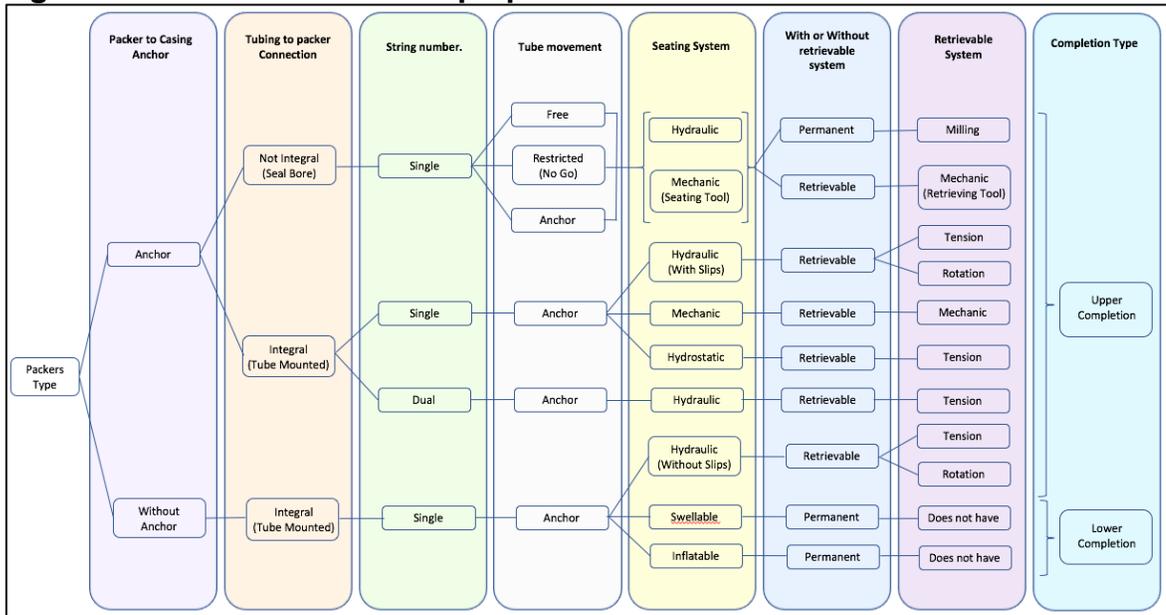
3.1.1.5 Mandril. Es el encargado de poder unir todos los componentes del empaque. De mismo modo es con el que se especifica todas las condiciones de operatividad del empaque. Son equipos que ayudan a alojar válvulas reguladoras de flujo.

3.2 CLASIFICACIÓN DE EMPAQUES

Según el diseño de completamiento que se vaya a implementar se debe tener en cuenta ciertos parámetros que son fundamentales. Uno de ellos es el tipo de empaque se vaya a utilizar. Las especificaciones técnicas de los empaques caracterizan de manera óptima las cualidades de este tipo de herramientas.

A continuación, se tiene en cuenta la **Figura 14**, en donde se especifican que clasificaciones poseen los empaques según sus condiciones.

Figura 14. Clasificación de empaques



Fuente: HERNANDEZ, Claudia. PEREZ, Robinson y RINCÓN, Cristian. Clasificación de empaques para diseño de completamiento. Bogotá, Colombia. 2018.

3.2.1 Anclaje. Los empaques poseen la capacidad de anclarse por medio de cuñas dentro de su sistema. Estas brindan un sello óptimo dentro del sistema para cumplir su función. A pesar de esto, existen empaques que no poseen este sistema de anclaje por lo que se basan en un sistema de gomas que generan un sistema relativamente similar.

3.2.2 Conexión de empaque a sarta de producción. Al bajar el diseño de tubería, existen empaques que se pueden bajar al tiempo con la tubería. Estos se llaman empaques integrados, se pueden usar tanto para completamiento superior como inferior. De mismo modo, existen empaques tipo *Sealbore* que pueden bajarse independiente a la tubería como se explicó anteriormente.

3.2.3 Número de tuberías y movimiento. Un completamiento puede estar integrado con una a o más tuberías de producción. De mismo modo se habla que tipo de herramientas se pueden encontrar dentro del completamiento

3.2.4 Tipos de empaques. Hace referencia a los tipos de empaques que se pueden encontrar dentro de un completamiento. Estos tipos de empaques pueden ser hidráulicos, hidrostáticos, mecánicos o tipo Sealbore.

3.2.5 Recuperación de empaques. Existen empaques que se pueden recuperar dentro del diseño de completamiento, esto se debe en parte a su sistema de liberación; pero, a pesar de esto, existen empaques permanentes que poseen como único método ser molido.

3.2.6 Sistema de Anclaje. Hace referencia a los métodos en los que se puede anclar un empaque, lo dos métodos utilizados dentro de la industria son por rotación y por tensión.

3.2.6.1 Anclaje por rotación. Este sistema es el más seguro dentro del sistema de anclaje de empaques. Su fin consta de dar $\frac{1}{4}$ de rotación al empaque de manera que este expanda sus cuñas y logre generar un sello.

3.2.6.2 Anclaje por tensión. Este mecanismo consta de generar un diferencial de presión dentro de la herramienta que genere una expansión de las cuñas. Este método se utiliza poco dentro de la sarta selectiva de inyección teniendo en cuenta que esta maneja altos caudales, presiones y temperaturas.

3.3 TIPOS DE EMPAQUES

A continuación, se explicarán los tipos de encontrados generalmente encontrados dentro de la industria.

3.3.1 Empaques mecánicos. Los empaques mecánicos (Ver **Figura 15**) dependen de la cantidad de peso que se le vayan a aplicar, esto gracias a su sentamiento por tensión. Dentro de los mecanismos de sentamiento están los tipos J o L; el sentamiento por tensión funciona aplicando presión en el empaque, generando así una liberación de las cuñas y logrando un sello entre las tuberías. ²⁶

²⁶ CORTES, Claudia Marcela. Componentes de completamiento. [Diapositivas]. Neiva, Huila, Colombia. 2017.

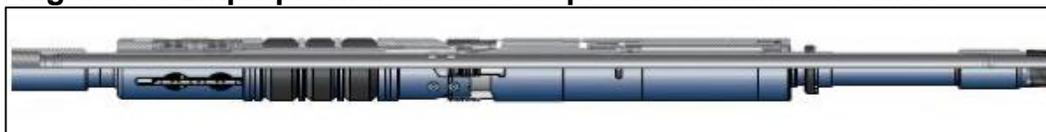
Figura 15. Empaques mecánicos de producción modelo PMDJ.



Fuente: SCHLUMBERGER. Packers and completions equipment catalog. Houston, Texas. 2014. p 2.

3.3.2 Empaques hidrostáticos. Estos tipos de empaques poseen una cámara de presión, con un aumento de presión diferencial, se liberan las cuñas logrando así su debido asentamiento. (ver **Figura 16**). Solo es diseñado para una sola corrida debido a su asentamiento por presión diferencial.²⁷

Figura 16. Empaque hidrostático de producción modelo RFH



Fuente: SCHLUMBERGER. Packers and completions equipment catalog. Houston, Texas. 2014. p 14.

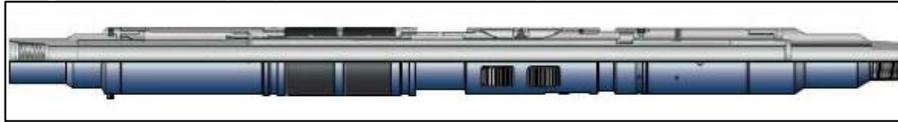
3.3.3 Empaques hidráulicos. Los empaques hidráulicos se pueden ver seccionados en dos tipos, aquellos que son liberados por tensión y aquellos que se liberan por rotación. Los empaques por tensión necesitan de un diferencial de presión para liberar los pines de asentamiento. Posterior a su liberación, el empaque necesita llegar a la presión determinada para generar el sello necesario; en el caso de los empaques por rotación, se usan cuando el ambiente de su asentamiento puede ser hostil por tensión causando así pérdidas en el sello.²⁸

Como bien se ha podido explicar, todos estos tipos de empaques poseen ciertas características en común como se pudo determinar en la **Figura 17**. A pesar de esto, existen ciertos tipos de empaques hidráulicos que se llaman empaques tipo Tándem, estos empaques tienen como cualidad la posibilidad de poder generar un sello sin la necesidad de poseer cuñas.

²⁷ Ibíd.

²⁸ Ibíd.

Figura 17. Empaque hidráulico de producción modelo PHJ



Fuente: SCHLUMBERGER. Packers and completions equipment catalog. Houston, Texas. 2014. p 18.

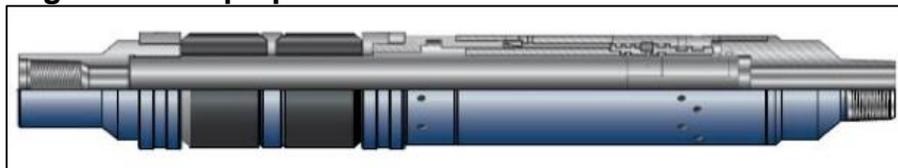
3.3.4 Empaques hidráulicos tipo tándem. Los empaques tipo tándem, o también llamados empaques sin anclaje se usan dentro del diseño de completamiento con el fin de poder disminuir los costos de operación. A diferencia de los otros empaques, estos pueden llegar a tener complicaciones en el momento de recibir sobreesfuerzos dentro del ambiente en el que se encuentre. Para ello se baja en conjunto con empaques hidráulicos con cuñas de manera que se pueda disipar esfuerzos adicionales dentro de los empaques tándem. Para ello se corren en conjunto de empaques hidráulicos con cuñas como empaques intermedios, de manera que por encima y por debajo de estos tipos de empaques haya otros soportes con cuñas.

Como bien se ha dicho, esta herramienta no posee anclajes mecánicos, como se puede ver en la **Figura 18**, por lo que la forma de generar sello consta de pines de seguridad calibrados; estos permiten la correcta adhesión del empaque a la zona de interés sin tener complicaciones en la bajada de la herramienta. Cabe resaltar que toda tensión superior a la de su liberación genera fuerza en el empaquetado de la herramienta.

Para liberar esta herramienta se debe hacer generando $\frac{1}{4}$ de vuelta hacia la derecha. Posee un mandril partido, lo que impide algún tipo de tensión o esfuerzo por debajo de la tubería sin antes haber liberado la herramienta.²⁹

El uso de esta herramienta a diferencia de la hidráulica convencional depende a los costos debido a su falta de cuñas. En promedio un empaque hidráulico puede llegar a costos de 25000 USD, mientras que por otro lado los costos de un empaque hidráulico tipo tándem pueden disminuir a los 10000 USD.

Figura 18. Empaque hidráulico Tándem modelo THT.



Fuente: SCHLUMBERGER. Packers and completions equipment catalog. Houston, Texas. 2014. p 24.

²⁹ Ibíd.

A continuación, la **Cuadro 1** se hace una breve explicación de los síntomas que puede presentar un empaque.

Cuadro 1. Conceptos básicos de empaques tipo tándem.

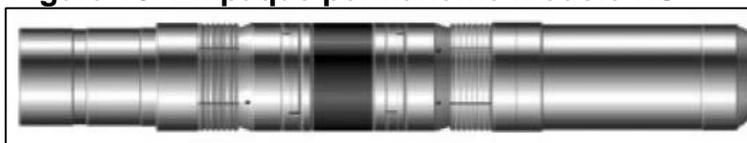
Aplicaciones	<ul style="list-style-type: none"> • Fijación Hidráulica • Sistema de liberación por medio de rotación • Sistema de fijación por pines de seguridad no genera vibración en el tamaño de la herramienta
Características	<ul style="list-style-type: none"> • Fijación hidráulica • Sistema de liberación por medio de rotación • Sistema de fijación por pines de seguridad • No genera variación en el tamaño de la herramienta
Beneficios	<ul style="list-style-type: none"> • Se puede operar con facilidad • Todo sobreesfuerzo en el empaque aumenta el sello en la zona

Fuente: Elaboración propia. 2019.

3.3.5 Empaques no integrales. Cuando se encuentran problemas longitudinales con la tubería de producción, se usan los empaques *Sealbore*, Estos empaques poseen el área pulida como se puede observar en la **Figura 19**. Estos tipos de empaques no hacen parte integral dentro de la tubería de producción por lo que no genera sobreesfuerzos ni tensiones adicionales dentro de la tubería de producción.

Estos empaques poseen la capacidad de soportar grandes volúmenes de producción y aguantar altas presiones (alrededor de los 3500 psi) y temperaturas, Los empaques Sealbore, se pueden dividir en empaques recuperables según su función.³⁰

Figura 19. Empaque permanente modelo HS



Fuente: SCHLUMBERGER. Packers and completions equipment catalog. Houston, Texas. 2014. p 46.

³⁰ Ibíd.

3.4 EMPAQUES PARA SARTAS SELECTIVAS

Para la construcción de una sarta selectiva es necesario tener en cuenta dos premisas que se pueden presentar durante una sarta selectiva:

- Al ser un diseño de completamiento bastante complejo, es necesario implementar empaques que logren ser instalados en una sola corrida. De mismo modo que se logren anclar de manera simultánea.
- En pozos inyectoros se pueden presentar altos caudales y temperaturas.

3.4.1 Características de empaques para sartas selectivas. Al tener en cuenta estos dos supuestos se determina que los empaques deben tener estas características para ser considerados óptimos para una sarta selectiva:

- El empaque puede o no poseer cuñas, dependiendo del diseño de tubería y la factibilidad económica que se tenga para el proyecto.
- Para practicidad del proyecto, los empaques deben estar integrados dentro de la tubería.
- Debe existir una sola sarta de completamiento, esto teniendo en cuenta el fin del diseño, que busca ser de inyección.
- Dentro de los tipos de empaques, los más óptimos para ser corridos dentro de la sarta son los empaques hidráulicos, teniendo en cuenta que el anclaje de todos estos puede generarse de manera simultánea.
- Idealmente estos tipos de empaques deberían, poder desanclarse por distintos factores que se puedan presentar durante el completamiento.
- Finalmente, y como factor crucial. Los empaques deben poseer la capacidad de aguantar altas presiones, temperaturas y caudales, ya que la sarta de inyección posee diferentes características al de otros tipos de completamientos, como se pudo explicar en el anterior capítulo.

Se decide que el tipo de empaque que se adapta a las condiciones son los hidráulicos por rotación, de tipo tándem o con cuñas. A pesar de esto, es necesario tener en cuenta un análisis de esfuerzos en las tuberías.

4. ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y FALLAS

Como sugiere Bellarby³¹, las condiciones tanto físicas como ambientales del yacimiento, son factores cruciales a tener en cuenta dentro del diseño y uso de toda herramienta en la industria del petróleo, estos determinan la cantidad de estrés que estas deben soportar a lo largo de su uso en operación.

Para ello las compañías realizan el análisis de esfuerzos, el cual es una “evaluación integral de las herramientas que conforman el diseño de completamiento, ante las condiciones ambientales y operativas del pozo”³². Presión, peso del lodo, temperatura, el tipo de empaques, el peso de la tubería, el tipo de operación, entre otros son causantes de este estrés, también denominado como carga, esta es comparada con las especificaciones técnicas de los utensilios dados por los fabricantes a fin de asegurar más allá de la duda si esta es apta para las condiciones a las cuales se le piensa someter, de ser inferior el resultado a las cargas producidas por el pozo, es indicativo de que valores más altos de resistencia son necesarios para trabajar en dicha operación. Para el caso de los empaques se deben comparar las cargas resultantes con la envolvente operativa.

4.1 CARGAS EN LA TUBERIA

Estos son esfuerzos producidos por las condiciones mecánicas, físicas y ambientales generadas por las condiciones al interior del pozo a lo largo de su funcionamiento.

“Las cargas en una tubería se traducen en movimiento y los elementos conectados a la tubería se ven dañados por el efecto resultante. Las cargas que el empaque ha de resistir son especificadas por su mecanismo de funcionamiento: La forma de ser de acoplado a la tubería, de adherirse al revestimiento y de aislar el anular del pozo. Si el empaque es acoplado directamente al tubing, los efectos de este son transmitidos a este. Las cargas en el empaque se resumen en tensión y compresión”³³.

Para entender cómo pueden fallar los empaques es necesario saber cómo pueden fallar las tuberías, ya que como se dijo anteriormente, la falla ocurrida a la tubería se transmitirá al empaque, estas serán expuestas a continuación.

³¹ BELLARBY. Op. cit., p 473.

³² TRUJILLO y VALBUENA. Op. Cit., p 33.

³³ *ibid.* p 36.

4.1.1 Colapso. De manera general, el colapso ocurre cuando la presión externa sobre la tubería es mayor a la interna, causando una cedencia en el material. Si bien esto es cierto no se debe tomar un diferencial de presión externa e interna para establecer el colapso, ya que la presión existente en las paredes externas de la tubería tiene un área de acción distinta a la presión interna, estas áreas deben ser relacionadas para determinar satisfactoriamente la presión de colapso³⁴.

En la **Ecuación 1** se representa lo descrito en el apartado anterior:

Ecuación 1. Colapso.

$$Pe = Po - \left[1 - \frac{2}{\left(\frac{D}{t}\right)} \right] * Pi = \Delta P + \left[\frac{2}{\left(\frac{D}{t}\right)} \right] Pi$$

Fuente: BELLARBY J. Well completion Design. Aberdeen, UK. Elsevier. 2009.p 513.

Donde:

Pe = Presión Equivalente de colapso en [psi]

Po = Presión Anular en [psi]

$\left(\frac{D}{t}\right)$ = Esbeltez, **Ecuación 2.**

ΔP = Diferencial de Presión en [psi]

Pi = Presión Interna en [psi]

Para de la **Ecuación 1** es necesario tener en cuenta el concepto de esbeltez. Como se representa en la **Ecuación 2.**

Ecuación 2. Esbeltez.

$$\text{Esbeltez} = \left(\frac{D}{t}\right)$$

Fuente: BELLARBY J. Well completion Design. Aberdeen, UK. Elsevier. 2009.p 513.

Donde:

D = OD de la tubería

t = Espesor de la tubería

³⁴ HERNANDEZ CORTEZ, Claudia Marcela. Completamiento Avanzado e Hidráulica de pozos. [Diapositivas]. Neiva. 2017

Sabiendo de mismo modo que el espesor hace referencia a la **Ecuación 3**.

Ecuación 3. Espesor.

$$t = \left(\frac{OD-ID}{2} \right)$$

Fuente: BELLARBY J. Well completion Design. Aberdeen, UK. Elsevier. 2009. p 513.

4.1.2 Estallido: Este es generado debido a la presión interna de la tubería al ser realizadas operaciones como la cementación o la inyección, teniendo en cuenta que además de la presión hidrostática dada por el fluido, existen presiones que se aplican desde superficie las cuales tienen la capacidad de superar la presión a la que el material cede³⁵. La **Ecuación 4** ilustra lo anterior:

Ecuación 4. Estallido.

$$\Delta P = P_i - P_o$$

Fuente: TRUJILLO, Jaime y VALBUENA, María. Evaluación de la envolvente operacional de los empaques de completamiento; interpretación, implementación e impacto sobre el diseño de completamiento de un pozo, Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2018. p 16.

Donde:

ΔP = Diferencial de Presión en [psi]

P_i = Presión Interna en [psi]

P_o = Presión Anular en [psi]

4.1.3 Axial. Según Bellarby³⁶, las cargas axiales son factores producto de los cambios tanto de presión como de temperatura presentes dentro del pozo, producto de los diferentes servicios que a este se realicen.

Para las cargas axiales se debe tener en cuenta una condición inicial y una final, siendo por ejemplo una inicial el asentamiento del completamiento y una final el momento en el cual se empieza a inyectar en el pozo.

³⁵ Ibíd.

³⁶ BELLARBY. Op. cit., p 478.

4.1.3.1 Balonamiento. De acuerdo a Bellarby³⁷, un tubo en tensión axial no causa únicamente deformaciones axiales sino también deformaciones radiales compresivas, estas son correspondientes una a la otra en la zona elástica. La **Ecuación 5** expone el concepto:

Ecuación 5. Balonamiento.

$$f_{bal} = 2\mu(Ati * \Delta Pip - Ato * \Delta Panp)$$

Fuente: BELLARBY J. Well completion Design. Aberdeen, UK. Elsevier. 2009. p 487.

Donde:

f_{bal} = Fuerza de Balonamiento en [lb]

μ = Coeficiente de Poisson

Ati = Área Interna de la Tubería en [in²]

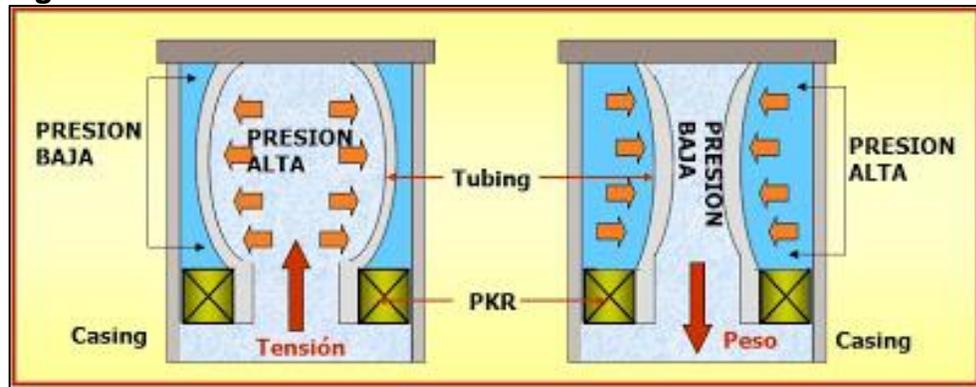
ΔPip = Cambio de presión promedio en el empaque de una condición a otra en [psi]

Ato = Área Externa de la Tubería en [in²]

ΔPan = Cambio de presión promedio del anular en el empaque de una condición a otra en [psi]

La resultante de esta fuerza puede ser negativa o positiva (axial de compresión o axial de tensión) dado que existen dos tipos de balonamiento. El balonamiento directo es producto de una mayor presión en el interior de la tubería que en el anular, forzando así una tensión sobre las paredes de esta. A causa de esto ocurrirá un acortamiento en la tubería por la presencia del empaque y sobre este se generará una fuerza que se dirige hacia abajo, produciendo una carga compresiva. (Ver **Figura 20**)

Figura 20. Balonamiento



Fuente: Efectos producidos sobre los packer por presión y temperatura. Petroblogger. [en línea], 14 de febrero de 2019. Disponible en Internet: <http://www.ingenieriadepetroleo.com/efectos-producidos-sobre-los-packer-por>

³⁷ Ibid p. 487.

La **Ecuación 6** demuestra lo escrito:

Ecuación 6. Balonamiento directo.

$$\Delta L_{bal} = - \left[\frac{2\mu L}{E} \right] \left[\frac{\Delta P_t - F_{oi}^2 * \Delta P_{an}}{F_{oi}^2 - 1} \right]$$

Fuente: BELLARBY J. Well completion Design. Aberdeen, UK. Elsevier. 2009. p 487.

Donde:

- ΔL_{bal} = Cambio de longitud causado por el Balonamiento en [in]
 μ = Coeficiente de Poisson
 L = Longitud de la tubería en [in]
 E = Esbeltez
 ΔP_p = Cambio de presión promedio de una condición a otra en [psi]
 F_{oi} = Razón entre el OD y el ID de la tubería en [in]

4.1.3.2 Balonamiento inverso. Al tener una presión mayor al exterior de la tubería que en el interior, se provoca una compresión a través de las paredes de la misma. Para este caso la tubería se alarga por la presencia del empaque y sobre este se genera una fuerza hacia arriba, creando una carga de tensión ³⁸.

Para el balonamiento indirecto, la **Ecuación 7** describe el alargamiento de la tubería por este efecto:

Ecuación 7. Balonamiento inverso.

$$\Delta L_{bal} = \left[\frac{2\mu L}{E} \right] \left[\frac{\Delta P_t - F_{oi}^2 * \Delta P_{an}}{F_{oi}^2 - 1} \right]$$

Fuente: BELLARBY J. Well completion Design. Aberdeen, UK. Elsevier. 2009. p 487.

4.1.3.3 Pandeo. Según lo planteado por Bellarby³⁹, se presenta normalmente en tuberías que son demasiado largas en comparación con su espesor, cuanto más grande es esta diferencia más tenderá a pandearse. Este fenómeno ocurre cuando la tubería está en compresión y su incidencia es mayor cuando las presiones al interior de este son grandes.

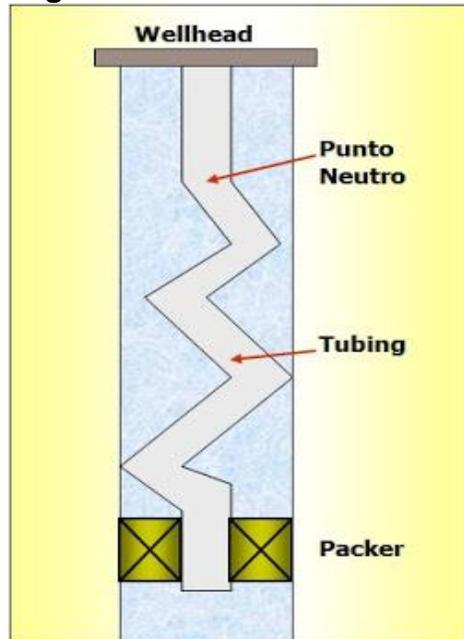
Al recostarse la tubería a un lado del revestimiento se genera un acortamiento en la tubería lo que causa mayores fuerzas axiales y sobre el empaque se ejercerá una carga compresiva debida a que esta se enrolla de manera helicoidal dentro del pozo

³⁸ *Ibíd.* p. 488.

³⁹ *Ibíd.* p. 492.

colocando un mayor peso sobre la herramienta. Además, dificulta la transmisión de peso o rotación al tubing. Se puede apreciar el resultado del pandeo en la siguiente **Figura 21.**

Figura 21. Pandeo.



Fuente: Efectos producidos sobre los packer por presión y temperatura. Petroblogger. [en línea], 14 de febrero de 2019. Disponible en Internet: <http://www.ingenieriadepetroleo.com/efectos-producidos-sobre-los-packer-por-presion-y-temperatura/>

La **Ecuación 8** plantea la fuerza resultante:

Ecuación 8. Pandeo.

$$f_{pad} = A_{pi}(\Delta P_t - \Delta P_{an})$$

Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Analisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería de completamientos de sartas selectivas, Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017. p 42.

Donde:

f_{pad} = Fuerza generada por el pandeo [lb]

ΔP_t = Diferencial de Presión de la tubería en el empaque en [psi]

ΔP_{an} = Diferencial de Presión en el anular en el empaque en [psi]

La **ecuación 9** expone el cambio de longitud resultante:

Ecuación 9. Alojamiento por pandeo

$$\Delta L_{pad} = \frac{r^2 * A_{pi}^2 (\Delta P_t - \Delta P_{an})^2}{8 * E * I (W_i + W_{ft} - W_{fd})}$$

Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería de completamientos de sargas selectivas, Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017. p 42.

Donde:

r = Espacio entre el OD de la tubería y el ID del revestimiento

A_{pi} = Área Interna del Empaque en [in]

E = Esbeltez

I = Momento de inercia de la tubería con respecto al diámetro en [in⁴]

Sabiendo que momento de inercia se expresa en la **Ecuación 10**.

Ecuación 10. Momento de inercia.

$$I = \left[\frac{\pi}{64} \right] [OD_{tub}^4 - ID_{tub}^4]$$

Fuente: BELLARBY J. Well completion Design. Aberdeen, UK: Elsevier. 2009. p 487.

W_i = Peso de la tubería en [lb/in]

W_{ft} = Peso del fluido en la tubería en [lb/in]

W_{fd} = Peso del fluido desplazado en [lb/in]

4.1.3.4 Fuerzas tipo Pistón. De acuerdo a lo dicho por Bellarby⁴⁰, son fuerzas producidas por fluidos o presión en el área transversal de la tubería, es decir la boyanza la cual incide no solo en fondo si no en todos los cambios de diámetros de esta. Estas fuerzas afectan a las fuerzas axiales directamente y la **Ecuación 11** a continuación lo esclarece:

⁴⁰ Ibíd p. 480.

Ecuación 11. Fuerza tipo pistón.

$$f_{pi} = \Delta P_t(A_{pi} - A_{ti}) - \Delta P_{an}(A_{pi} - A_{to})$$

Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería de completamientos de sartas selectivas, Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017. p 38.

Donde:

- f_{pi} = Fuerza tipo pistón en [lb]
 ΔP_t = Diferencial de Presión de la tubería en el empaque en [psi]
 A_{pi} = Área Interna del Empaque en [in²]
 A_{ti} = Área Interna de la Tubería en [in²]
 ΔP_{an} = Diferencial de Presión en el anular en el empaque en [psi]
 A_{to} = Área Externa de la Tubería en [in²]

Obtenida esta fuerza se puede hacer uso de la ley de Hooke, la cual establece la relación entre el alargamiento en longitud que sufre un material con respecto a la fuerza que a este se aplica, descrito en la **Ecuación 12**.

Ecuación 12. Alargamiento de longitud.

$$\Delta L_p = \left[\frac{L}{EA_x} \right] [\Delta P_t(A_{pi} - A_{ti}) - \Delta P_{an}(A_{pi} - A_{to})]$$

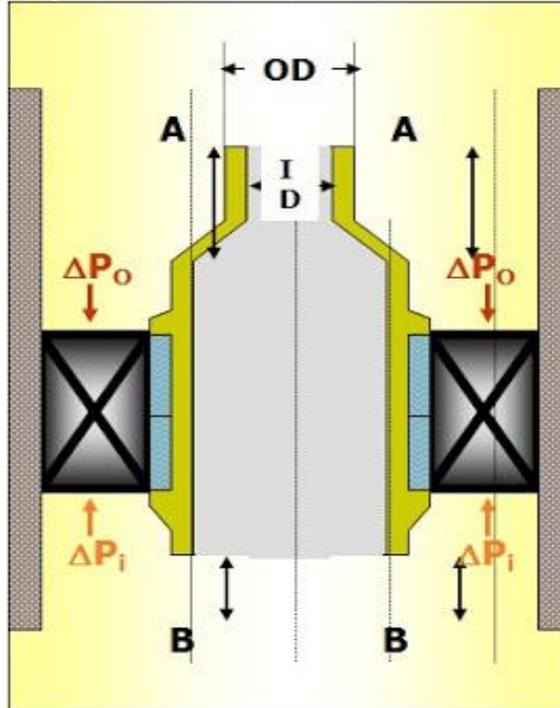
Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería de completamientos de sartas selectivas, Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017. p 38.

Donde:

- ΔL_p = Cambio de longitud por efecto de la fuerza tipo Pistón en [in]
 L = Longitud de la tubería en [in]
 E = Módulo de Young

Si la presión por encima del empaque es mayor, habrá tensión en la tubería y compresión en el empaque, si la presión es mayor debajo del empaque habrá compresión en la tubería y tensión en el empaque. La siguiente **Figura 22**.

Figura 22. Fuerza piston.



Fuente: Efectos producidos sobre los packer por presión y temperatura. Petroblogger. [en línea], 14 de febrero de 2019. Disponible en Internet: <http://www.ingenieriadepetroleo.com/efectos-producidos-sobre-los-packer-por/>

4.1.3.5 Temperatura. En correspondencia con Bellarby⁴¹, el metal con el que está hecha la tubería se expande al aumentar la temperatura, esto en presencia de un empaque integral hace que la tubería se comprima y genere fuerzas axiales. Al enfriarse el metal la tubería se acortará lo cual producirá fuerzas de tensión causando un alargamiento en su tamaño. El alargamiento producto del efecto de la temperatura se ilustra en la siguiente **Ecuación 13**:

Ecuación 13. Temperatura.

$$f_t = -C_t * E * \Delta T (A_o - A_i)$$

Fuente: BELLARBY J. Well completion Design. Aberdeen, UK. Elsevier. 2009. p 489.

Donde:

C_t = Coeficiente de expansión térmica, el cual varía dependiendo del material del que está hecha la tubería.

⁴¹ Ibíd p. 489.

Se debe tener en cuenta que “el empaque está formado por varios elementos los cuales tienen especificaciones que lo confinan a funcionar en determinadas condiciones dadas por la operación. Los elastómeros son las partes del empaque más susceptibles a ser afectados por este factor, al ser gomas de material especial que crean un sello y aislamiento que deben poder soportar la temperatura de trabajo, determinadas concentraciones de ácido sulfhídrico (H₂S) y dióxido de carbono (CO₂), los fluidos de completamiento y los fluidos producidos por el yacimiento”⁴².

4.1.3.6 Sumatoria de Fuerzas Axiales (Axial Load). “Al sumarse todas las fuerzas axiales en la profundidad correspondiente se hallará la fuerza axial total, esta fuerza resultante impacta sobre el empaque. Cuando este no está presente esta fuerza se transforma en movimientos de acortamiento o elongación de la tubería”⁴³.

Ecuación 14. Sumatoria fuerza axial

$$\Sigma f = Al = f_{bal} + f_{pad} + f_{pi} + f_t$$

Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería de completamientos de sartas selectivas. Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017. p 43

Donde:

Al = Axial Load, sumatoria de las fuerzas en [lb]

f_{bal} = Fuerza de balonamiento en [lb]

f_{pad} = Fuerza de pandeo [psi]

f_t = Fuerza de temperatura en [lb]

f_{pi} = Fuerza tipo pistón en [lb]

4.1.4 Triaxial. El análisis de estrés triaxial es el resultado de compaginar las cargas a las que es sometida la tubería, siendo estas las cargas axiales, la radial y la carga tangencial, todo esto para asegurar que la tubería soportar las condiciones a las cuales será sometida en operación⁴⁴.

⁴² TRUJILLO y VALBUENA. Op. Cit., p 38.

⁴³ HERNANDEZ CORTEZ, Claudia Marcela. Completamiento Avanzado e Hidráulica de pozos. [Diapositivas]. Neiva. 2017. Completamiento Avanzado e Hidráulica de pozos. 134 diapositivas. Citado por: CALDERON FALLA, Angie Lorena y CASTRO TRUJILLO, Javier Arturo. Análisis del impacto de empaques tándem (sin anclaje) como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería en completamientos de sartas selectivas. Neiva: Universidad Surcolombiana. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería de Petróleos. 2018. p. 43.

⁴⁴ CALDERON y CASTRO. Op. Cit., p 45

“Las cargas de las fuerzas axiales por si solas arrojan valores que sirven como referencia para conocer cómo se comportara la tubería, sin embargo, si por ejemplo se tiene una combinación de fuerzas axiales compresivas con presiones internas grandes o de fuerzas axiales de tensión con presiones anulares grandes se obtienen valores triaxiales mucho más grandes que los que se obtendrían si solo se tienen en cuenta las fuerzas axiales”⁴⁵.

Las cargas axiales, radiales y tangenciales se relacionan todas en la ecuación de Von Misses, la cuales se puede ver a continuación:

Ecuación 15. Estrés VME.

$$\sigma_{vme} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_a - \sigma_t)^2 + (\sigma_t - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_a)^2]^{1/2}$$

Fuente: BELLARBY J. Well completion Design. Aberdeen, UK. Elsevier. 2009. p 515.

Donde:

Σ_{vme} = Estrés VME

σ_a = Esfuerzo Axial en [lb]

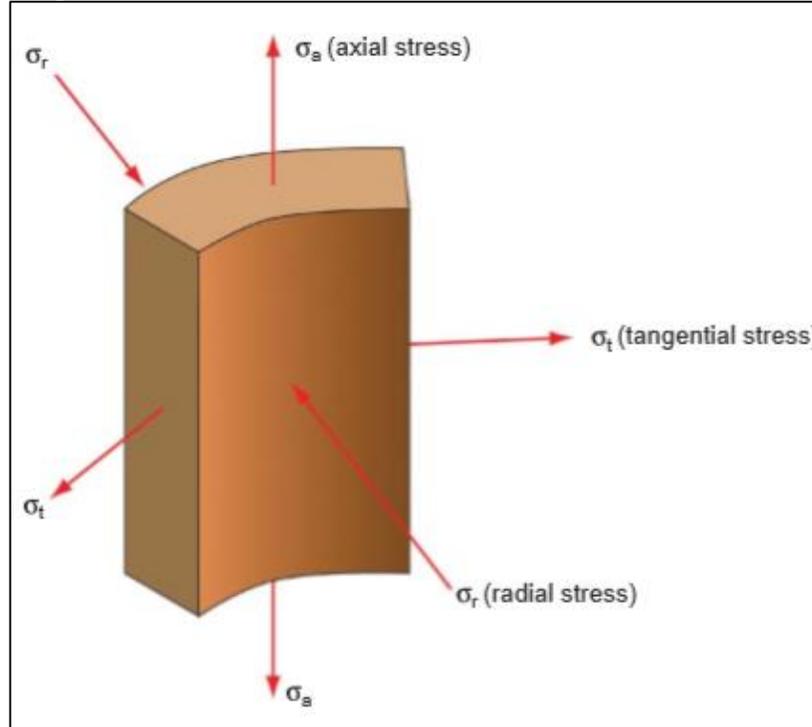
σ_t = Esfuerzo Tangencial en [lb]

σ_r = Esfuerzo Radial en [lb]

En la **Figura 23** se puede ver lo anteriormente expuesto:

⁴⁵ Ibíd.

Figura 23. Esfuerzos Triaxiales



Fuente: BELLARBY, J. Well completion Design. Aberdeen. UK. Elsevier. 2009. p 514.

Según Von Misses, la tubería cederá cuando el valor de VME exceda el grado de la tubería. Para tener una idea educada de lo que la tubería puede resistir, se hace una reflexión más a profundidad de las tres cargas⁴⁶, esta se expresa en la **Ecuación 16**.

Ecuación 16. Carga Axial.

$$\sigma_a = \frac{A_l}{A_o - A_i}$$

Fuente: BELLARBY J. Well completion Design. Aberdeen, UK. Elsevier. 2009. p 478.

Donde:

- σ_a = Carga Axial en [psi]
- A_o = Área externa de la tubería en [in^2]
- A_i = Área interna de la tubería en [in^2]

Para las cargas radiales se tienen 2, la **Ecuación 17** para la carga interna:

⁴⁶ CALDERON y CASTRO. Op. Cit., p 45.

Ecuación 17. Carga radial interna.

$$\sigma_{ri} = -P_i.$$

Fuente: BELLARBY J. Well completion Design. Aberdeen, UK. Elsevier. 2009. p 515.

Y **Ecuación 18** para la carga radial externa.

Ecuación 18. Carga radial externa.

$$\sigma_{re} = -P_o$$

Fuente: BELLARBY J. Well completion Design. Aberdeen, UK. Elsevier. 2009. p 515.

Donde:

σ_{ri} = Carga radial interna en [psi]

σ_{re} = Carga radial externa en [psi]

P_i = Presión interna en [psi]

P_o = Presión externa en [psi]

Para las cargas tangenciales igualmente se tienen 2, la **Ecuación 19** para la carga interna.

Ecuación 19. Carga tangencial interna

$$\sigma_{ti} = \frac{P_i(A_i + A_o) - 2P_oA_o}{A_o - A_i}$$

Fuente: BELLARBY J. Well completion Design. Aberdeen, UK. Elsevier. 2009. p 515.

Y la **Ecuación 20** para la carga tangencial externa.

Ecuación 20. Carga tangencial externa

$$\sigma_{te} = \frac{2P_iA_i - P_o(A_i + A_o)}{A_o - A_i}$$

Fuente: BELLARBY J. Well completion Design. Aberdeen, UK. Elsevier. 2009. p 515.

Donde:

σ_{ti} = Carga tangencial interna en [psi]

σ_{te} = Carga tangencial externa en [psi]

La causa por la cual se obtienen los valores en las paredes internas y externas es porque el estrés VME es siempre mayor en estas, jamás en medio.

4.2 ESPECIFICACIONES TECNICAS

Estas hacen referencia a las cantidades de presión, temperatura, torque, entre otros factores hasta donde un determinado material falla. Las tuberías son sometidas a pruebas para este fin.

Una de las especificaciones más usadas es la API (American Petroleum Institute) el cual califica las tuberías según su punto de cedencia. “Para estos propósitos se define como la tensión tensil requerida para producir un alargamiento total de 0.5 por ciento de la longitud. Sin embargo, el caso de la tubería de revestimiento P-110 es una excepción donde la cedencia se define como el esfuerzo tensil requerido para producir un alargamiento total, de 0.6 por ciento de longitud”⁴⁷. Este sistema funciona asignando una letra con un número, el cual indica el valor mínimo de cedencia del acero en Kpsi (miles de psi) como lo indica la siguiente⁴⁸ **Cuadro 2.**

Cuadro 2. Grados API del Acero.

Group	Grade	Elongation Under Load (%)	Yield Stress (ksi)		Minimum Tensile Strength (ksi)	Maximum Hardness (Rockwell C)
			Minimum	Maximum		
1	H40	0.5	40	80	60	–
	J55	0.5	55	80	75	–
	K55	0.5	55	80	95	–
	N80	0.5	80	110	100	–
2	M65	0.5	65	85	85	22
	L80	0.5	80	95	95	23
	L80	0.5	80	95	95	23
	L80	0.5	80	95	95	23
	C90	0.5	90	105	100	25.4
	C95	0.5	95	110	105	–
	T95	0.5	95	110	105	25.4
	P110	0.6	110	140	125	–
4	Q125	0.65	125	150	135	–

Fuente: BELLARBY, J. Well completion Design. Aberdeen, Uk. Elsevier. 2009. p 476.

A continuación, se describen cada una de las especificaciones técnicas de las tuberías:

⁴⁷ Landmark, Halliburton Company. Citado por CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería completamientos de sargas selectivas, Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017. P. 48.

⁴⁸ CALDERON y CASTRO. Op. Cit., p 49.

4.2.1 Colapso. Según el Boletín 5C3 de la API⁴⁹, se definen 4 tipos de colapsos, pero antes cabe anotar que se debe hacer una corrección para calcular los esfuerzos axiales cuando la tubería está en tensión, la cual está representada en la **Ecuación 21**:

Ecuación 21. Cedencia por Colapso.

$$Y_{pa} = \left[\sqrt{1 - 0.75 \left(\frac{\sigma_a}{Y_p} \right)^2} - 0.5 \frac{\sigma_a}{Y_p} \right]$$

Fuente: BELLARBY J. Well completion Design. Aberdeen, UK: Elsevier. 2009. p 513.

Donde:

Y_{pa} = Presión de cedencia de la tubería corregida en [psi]
 σ_a = Esfuerzo Axial en [psi]

4.2.1.1 Colapso por Fluencia. Se refiere a una inestabilidad del material de la tubería por efecto de las presiones del pozo. (Ver **Ecuación 22**):

Ecuación 22. Colapso Fluencia.

$$P_{cyp} = 2 * Y_p * \left[\frac{\left(\frac{D}{t} \right) - 1}{\left(\frac{D}{t} \right)^2} \right]^1$$

Fuente: BELLARBY J. Well completion Design. Aberdeen, UK. Elsevier. 2009. p 512.

Donde:

P_{cyp} = Presión de colapso por fluencia en [psi]
 Y_p = Punto de cedencia de la tubería en [psi]

4.2.1.2 Colapso Plástico. Se refiere a una deformación en la tubería, la cual regresara a la normalidad una vez la carga sea retirada.

Ecuación 23. Colapso Plástico.

$$P_p = Y_p * \left[\frac{A}{\left(\frac{D}{t} \right)} - B \right] - C$$

Fuente: BELLARBY J. Well completion Design. Aberdeen, UK. Elsevier. 2009. p 511.

⁴⁹ STAELENS, s. GALLE, t. DE WAELE, w y DE BAETS, p. Analysis of API 5C3 failure prediction formulae for casing & tubing [en línea]. Bélgica. 2012. p. 5 [Consultado: 22 de febrero de 2019]. Disponible en Internet: <https://biblio.ugent.be/publication/3131898/file/3132010.pdf>

Donde:

P_p = Presión de Colapso Plástico en [psi]

A, B y C son valores específicos que cambian dependiendo del grado de la tubería.

4.2.1.3 Colapso Transicional. Es el colapso en el cual la tubería sufre daño al superar el valor de presión dado por las especificaciones técnicas.

Ecuación 24. Colapso Transicional.

$$P_t = Y_p * \left[\frac{F}{\left(\frac{D}{t}\right)} - G \right]$$

Fuente: BELLARBY J. Well completion Design. Aberdeen, UK. Elsevier. 2009. p 511.

Donde:

P_p = Presión de Colapso Plástico en [psi]

F y G son valores específicos que cambian dependiendo del grado de la tubería

4.2.1.4 Colapso Elástico. Se refiere al punto que, de ser excedido, la tubería fallara irremediamente. Como se puede apreciar en la **Ecuacion 25.**

Ecuación 25. Colapso Fluencia

$$P_e = \frac{46.95 * 10^2}{\left[\left(\frac{D}{t}\right) * \left[\left(\frac{D}{t}\right) - 1\right]^2\right]}$$

Fuente: BELLARBY J. Well completion Design. Aberdeen, UK. Elsevier. 2009. p 510.

Donde:

P_e = Presión de Colapso Plástico en [psi]

4.2.2 Estallido. Del boletín 5C3 del American Petroleum Institute⁵⁰ se toma, que para que esto ocurra las presiones internas deben exceder a las externas hasta el punto de causar un daño irreparable (ver **Ecuación 26**).

⁵⁰ Ibíd. p 7.

Ecuación 26. Cedencia por Estallido

$$P_{est} = 0.875 * \left[\frac{2Y_p * t}{OD} \right]$$

Fuente: BELLARBY J. Well completion Design. Aberdeen, UK. Elsevier. 2009. P. 509.

Donde:

P_{est} = Presión de estallido en [psi]

t = Espesor de la pared de la tubería en [in]

4.2.3 Axial. Esta puede ser calculada por la **Ecuación 27:**

Ecuación 27. Cedencia por carga axial

$$F_{ax} = Y_p * A_x$$

Fuente: BELLARBY J. Well completion Design. Aberdeen, UK. Elsevier. 2009. p 478.

Donde:

F_{ax} = Fuerza Axial en [lb]

A_x = Área transversal de la tubería en [in²]

4.2.4 Triaxial. “La carga triaxial corresponde al mismo punto de cedencia (Y_p) el cual depende del grado de la tubería”⁵¹.

4.3 FACTORES DE DISEÑO

Después de calcular las cargas a las que la tubería estará sometida una vez esté en uso y las especificaciones técnicas de esta, se puede verificar por medio de los factores de diseño la integridad del completamiento. Los factores de diseño “son una medida matemática que asegura que el completamiento no fallará bajo ninguna de las condiciones de trabajo a través de la vida útil del pozo”⁵², como lo ilustra la siguiente **Ecuación 28.**

Ecuación 28. Factor de Diseño.

$$FD = \frac{\text{Especificacion Tecnica}}{\text{Carga}}$$

Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería de completamientos de sartas selectivas. Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017. p 56.

⁵¹ HERNANDEZ CORTEZ, Claudia Marcela. Completamiento Avanzado e Hidráulica de pozos. [Diapositivas]. Neiva. 2017

⁵² CALDERON y CASTRO. Op. Cit. p 56.

De acuerdo a lo anterior si el valor del factor de diseño es mayor a 1, se dice no habrá falla, de ser el caso contrario es necesario reevaluar el uso de la tubería planteada. Si el valor es 1, existe la posibilidad de que ocurran fallas tempranas, a razón de esto las compañías tienden a utilizar factores de seguridad por encima de 1 los cuales serán cotejados con los factores de diseño⁵³.

4.3.1 Factor de Diseño por Colapso. Es la condición a la que una tubería cede al ser enfrentada a grandes presiones al exterior, colapsándose sobre si, maneja un factor de seguridad de entre 1 y 1.1⁵⁴, se calcula con la **Ecuación 29** a continuación:

Ecuación 29. Diseño por colapso

$$FD_{colapso} = \frac{Presion\ de\ Colapso}{Presion\ Equivalente}$$

Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería de completamientos de sartas selectivas. Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017. p 57.

4.3.2 Factor de Diseño por Estallido. Es la condición a la cual una tubería reventara (burst) al ser puesta contra presiones excesivas en su interior, tiene un factor de seguridad de entre 1.1 y 1.25⁵⁵. Es definido por la **Ecuación 30**:

Ecuación 30. Factor de Diseño por Estallido

$$FD_{estallido} = \frac{Presion\ de\ Estallido}{P_i - P_o}$$

Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería de completamientos de sartas selectivas. Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017. p 57.

4.3.3 Factor de Diseño Axial. Las cargas axiales dependen de varios factores además de la presión. Como lo es la temperatura, el peso del lodo, entre otros. Al ser un factor tan decisivo se tienen factores de seguridad más altos, que van de 1.3 a 1.6⁵⁶ y se calcula con la **Ecuación 31**:

⁵³ Ibíd

⁵⁴ BELLARBY. Op. cit., p 511.

⁵⁵ Ibíd. p 513.

⁵⁶ BELLARBY. Op. cit., p 491.

Ecuación 31. Factor de Diseño axial

$$FD_{axial} = \frac{\text{Especificacion Tecnica}}{\text{Carga Axial}}$$

Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería de completamientos de sartas selectivas. Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017. p 58.

4.3.4 Factor de Diseño Triaxial. Este factor comprende las cargas axiales, radiales y tangenciales. En el gráfico de capacidad de cargas (**Figura 24**) se puede apreciar cómo es necesaria para la parte de estallido y compresión (esquina superior izquierda) y colapso y tensión (esquina inferior derecha)⁵⁷. Este factor define en conclusión los parámetros máximos en los que el empaque se puede ver alterado, tanto en las especificaciones técnicas como en las condiciones de operación en las que se ve afectado, si en algún momento las cargas dentro del empaque llegan a pasar alguno de estos dos puntos se concluye que el empaque obtendrá algún tipo de falla. Dentro de la figura se puede apreciar como la carga del empaque no se sale de los límites. En la **Ecuación 32** se ilustra la ecuación del factor de diseño triaxial:

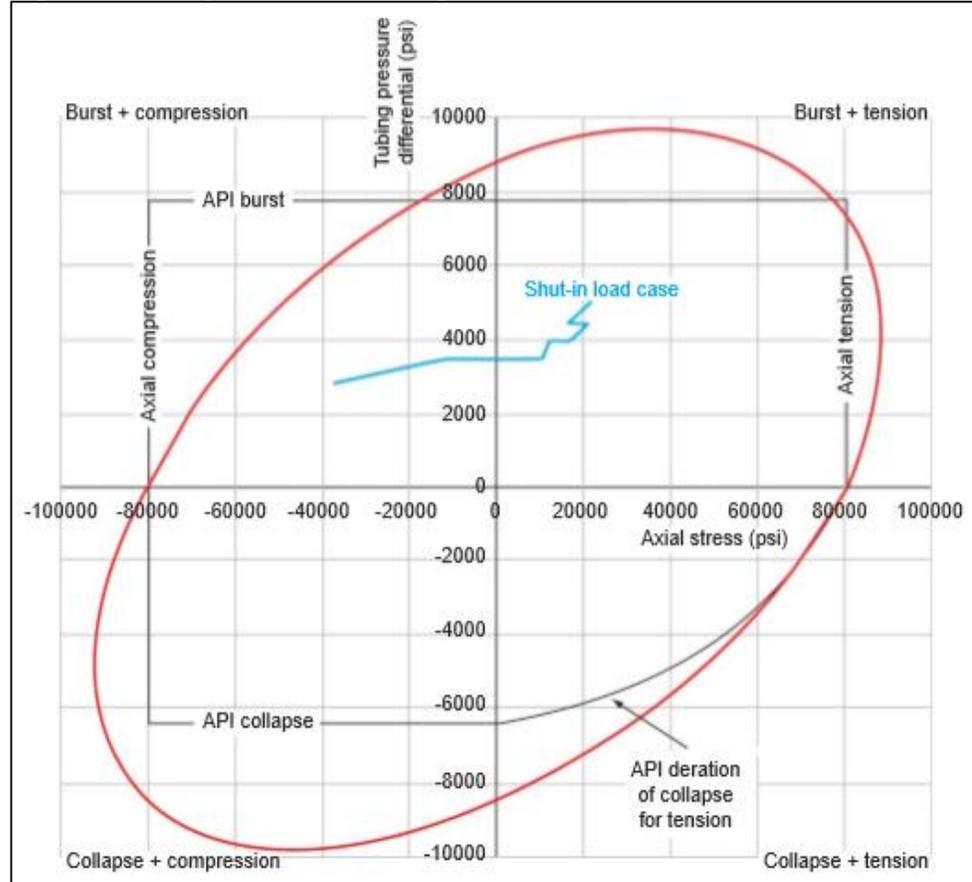
Ecuación 32. Factor de Diseño triaxial

$$FD_{vme} = \frac{\text{Cedencia Tuberia}}{\sigma_{vme}}$$

Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería de completamientos de sartas selectivas. Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017. p 58.

⁵⁷ Ibíd. p 519.

Figura 24. Capacidad de Cargas



Fuente: BELLARBY, J. Well completion Design. Aberdeen. UK. Elsevier. 2009. p 519.

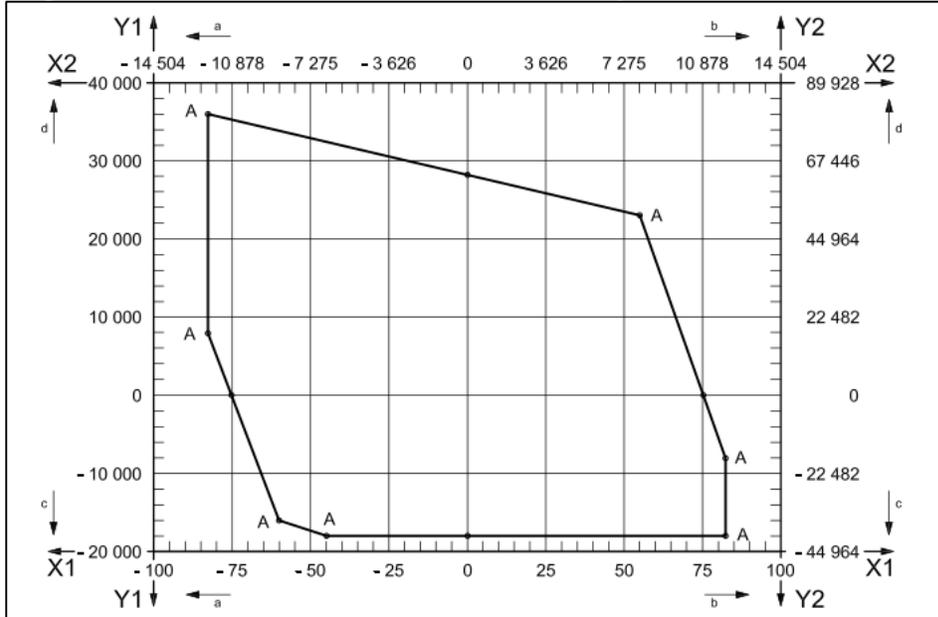
4.4 ENVOLVENTE OPERATIVA

“Es una representación gráfica de los límites máximos operacionales que posee un empaque ante el impacto de fuerzas compresivas y de tensión en conjunto con diferenciales de presión que conforman las cargas combinadas dentro del pozo”⁵⁸. La gráfica obtenida es una especie de polígono cuya área abarca los rangos operativos más adecuados para el desempeño de la herramienta dentro del pozo en cuestión⁵⁹ como se puede apreciar en la **Figura 25**.

⁵⁸ TRUJILLO y VALBUENA. Op. Cit., p 12

⁵⁹ *Ibid.* p 41

Figura 25. Elementos de la envolvente operativa.



Fuente: International Organization for Standardization. ISO 14310. 2008. Petroleum and natural gas industries downhole equipment packers and bridge plugs. Citado por TRUJILLO, Jaime y VALBUENA, María. Evaluación de la envolvente operacional de los empaques de completamiento; interpretación, implementación e impacto sobre el diseño de completamiento de un pozo, Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2018. p 41.

Donde:

X1: Presión [MPa]
 X2: Presión [psi]
 Y1: Fuerza [DecaNewtons (DaN)]
 Y2: Fuerza [lb]

a: Por encima (Above)
 b: Por debajo (Below)
 c: Compresión
 d: Tensión

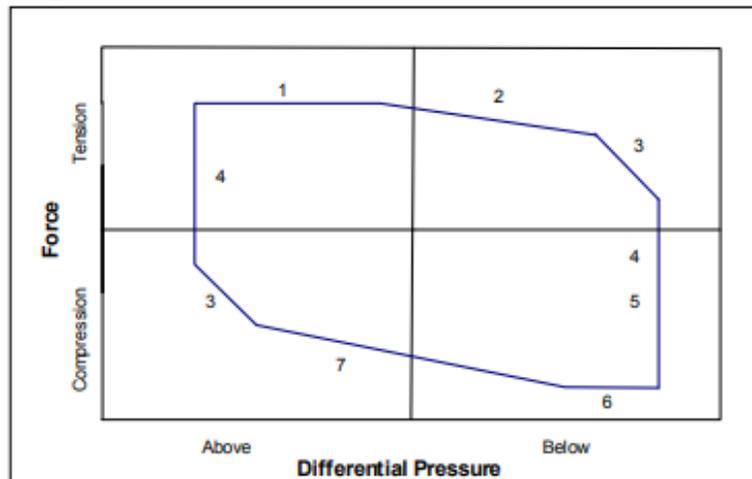
4.5 SISTEMAS DE FALLA

En el empaque se encuentran zonas de menor resistencia, las cuales están compuestas por conexiones o partes que tienden a fallar primero que otros elementos de la herramienta. Estos componentes son llamados críticos y los espacios donde estos se encuentran, sistemas de falla. Estos están representados en diferentes secciones de la envolvente operativa como se ve en la **Figura 26**⁶⁰.

⁶⁰ TRUJILLO y VALBUENA. Op. Cit., p 44.

Los empaques hidráulicos poseen los más tipos de fallas que los empaques hidráulicos al poseer cuñas. Mientras tanto, los empaques tipo tándem al no poseer cuñas, no poseen fallas encontradas en la sección 1 de la **Figura 26**. Esto quiere decir que en la siguiente envolvente operativa se debe hacer caso omiso de la primera sección ya que en este trabajo de grado no se contempla las fallas que puede poseer un empaque hidráulico convencional.

Figura 26. Zonas de falla.



Fuente: FOTHERGILL, Jhon. SPE 80945. Ratings Standarization for Production Packers. [en línea], 14 de febrero de 2019. Disponible en Internet: <https://www.onepetro.org/download/conference-paper/SPE-80945-MS?id=conference-paper%2FSPE-80945-MS>

4.5.1 Falla de conexión cuerpo principal – guía. Esta sucede cuando la resistencia del material del cual está hecho el mandril o la conexión de rosca son superados por las cargas de tensión. Esto suele ser a causa de fuerzas de presión y tensión que se adicionan, algo normal en procesos de estimulación.

Esta falla puede significar la falla total del completamiento, ya que al soltarse el mandril de la conexión este puede moverse libremente a través del empaque, provocando la caída de la guía al fondo del pozo. Esta falla se halla en la zona 2 de la envolvente⁶¹. Ver **Figura 26**.

4.5.2 Colapso del cuerpo principal (Mandril). “Esta falla ocurre como resultado de cargas excesivas las cuales sobrepasan la resistencia máxima del mandril. El estrés en la herramienta es causado por las presiones diferenciales por encima y por debajo del empaque y las cargas de la tubería a este, esas fuerzas se ejercen

⁶¹ Íbid. p 46.

sobre las áreas transversales tanto del mandril como del sistema de sellos. Está representada en la zona de falla 3 de la envolvente operativa”⁶². Ver **Figura 26**.

4.5.3 Falla del Sistema de elementos de Sello. Una protuberancia en la goma del anillo de respaldo o por la degradación del sello por temperatura, los fluidos del pozo o por problemas en el sistema de soporte en el anillo de respaldo, pueden causar una falla. La integridad del sistema de sellos es crucial, ya que su pérdida significa el colapso del sistema aislante de la herramienta, imposibilitando el control de la presión. Esta falla se encuentra en la zona 4 de la envolvente⁶³. Ver **Figura 26**.

4.5.4 Colapso en el cuerpo de la conexión pin-guía. Este tipo de falla se presentan cuando se hacen operaciones con un tapón fijo en el nipple inferior del empaque o cuando una extensión del *Seal/Bore* es ajustada al fono de este. Al igual que en el colapso del mandril, el exponer la rosca de la conexión a la presión, puede causar la desviación del pin del empaque, estancando la ensambladura del sello interno.

Esto también puede causar una gran cantidad de estrés a la tubería, pero no se considera un sistema de falla catastrófico. Este sistema de falla se encuentra en la zona 5 de la envolvente⁶⁴. Ver **Figura 26**.

4.5.5 Falla del tope del hombro-rodamiento. Esta falla es causada por fuerzas compresivas que se ejercen sobre el empaque, excediendo la resistencia del material en la zona donde hace contacto entre el ancla y el empaque.

Con cargas de compresión bastante altas la falla es potencial. Una falla pequeña en el rodamiento puede causar deformaciones no severas en las superficies de contacto, esto no afectaría a él completamiento. Esta falla está representada en la zona 6⁶⁵. Ver **Figura 26**.

4.5.6 Falla del sistema de candado del cuerpo principal. El candado pierde su resistencia cuando el esfuerzo aplicado sobre éste es mayor a la que soporta. Al fallar este sistema, el mandril queda flotando cuando actúan presiones por debajo de él. Aunque las cuñas son bloqueadas por los elastómeros del empaque, el movimiento del cuerpo principal genera un deterioro en el diámetro interno del sello, lo cual puede provocar una fuga. Esta falla se representa en la zona 7⁶⁶. Ver **Figura 26**.

⁶²Ibíd. p 45.

⁶³ Ibíd.

⁶⁴ Ibíd.

⁶⁵ Ibíd. p 46.

⁶⁶ Ibíd. p 47.

Habiendo explicado los factores que se evalúan en el análisis de esfuerzos, se pasa a ilustrar el modelo, explicando el principio por el cual este está regido, así como también su funcionamiento y características.

5. APLICACIÓN DEL MODELO PACKER TANDEM ANALYSIS

En el siguiente capítulo se explica como el análisis de esfuerzos sirve para poder predecir las cargas de un empaque teniendo en cuenta el modelo matemático de Lubinski, el cual ayuda a determinar cómo los empaques se ven esforzados tanto en el casing como en la tubería, es necesario tener claro que el modelo que se describe tiene premisas necesarias para la elaboración del programa, finalmente se tiene en cuenta como el modelo funciona teniendo en cuenta ciertos datos que son tomados del Wellcat™.

5.1 MODELO DE LUBINSKI

Es un modelo matemático creado por Arthur Lubinski con el fin de simular el estrés al que un empaque puede someter a una sarta de completamiento. Las cargas que fueron descritas en el capítulo anterior las cuales son transmitidas desde la tubería al empaque son transferidas al revestimiento a través de las cuñas como se muestra en la **Figura 27**. Estas fuerzas se denominan F_p y F_c respectivamente. La **Ecuación 33** es la que determina las características en la que el empaque se ve afectado por todas las fuerzas anteriormente descritas en el anterior capítulo:

Ecuación 33. Fuerza tubería a empaque.

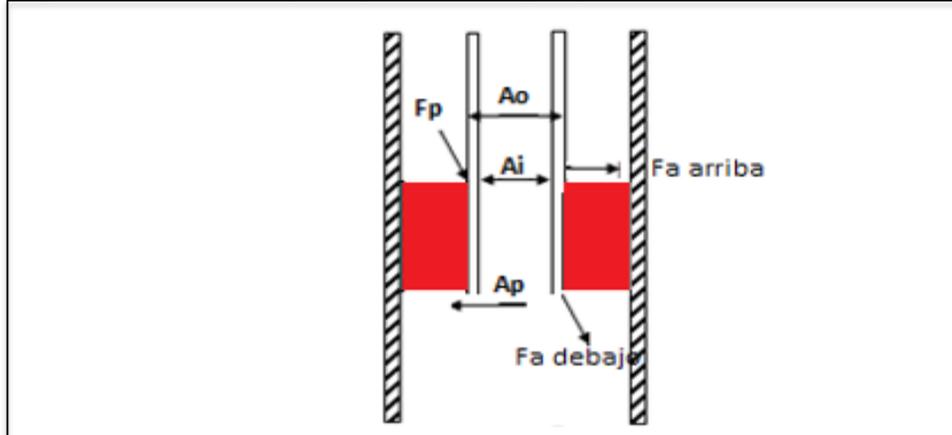
$$F_p = Fa^b - (Ai^b - Ap)P_i + (Ao^b - Ap)Po^b - Fa^a + (Ai^a - Ap)P_i - (Ao^a - Ap)Po^a$$

Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería de completamientos de sartas selectivas. Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017. p 59.

Donde:

F_p	= Fuerza de la tubería al empaque [lbf]
Fa^b	= Fuerza Axial por debajo del empaque [lbf]
Ai^b	= Área interna de la tubería en por debajo del empaque [in ²]
Ap	= Área del empaque [in ²]
P_i	= Presión interna e la tubería [psi]
Ao^b	= Área externa de la tubería [in ²]
Po^b	= Presión externa por debajo del empaque [psi]
Fa^a	= Fuerza axial por encima del empaque [lbf]
Ai^a	= Área interna de la tubería por encima del empaque [in ²]
Ao^a	= Área externa de la tubería por encima del empaque [in ²]
Po^a	= Presión por encima de la tubería [psi]

Figura 27. Fuerza que ejerce el empaque a la tubería



Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería de completamientos de sartas selectivas. Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017. p 61.

Los valores que tienen el índice “a” hacen alusión a los valores de las fuerzas que actúan por encima del empaque, mientras que los que tienen la “b” se refieren a las fuerzas que actúan por debajo de este, de aquí se ilustra que la fuerza ejercida de la tubería al empaque es una diferencia entre las fuerzas axiales generadas por el pozo que impactan por ambos lados a la herramienta.

Las fuerzas que van del empaque al revestimiento son, como anteriormente se mencionó, aquellas que se dirigen desde el empaque a través de las cuñas y de ahí hasta la tubería de revestimiento. La **Ecuación 34** que justifica estas fuerzas se encuentra a continuación:

Ecuación 34. Fuerzas empaque a revestimiento

$$F_c = F_p + \Delta P_{gomas} * (A_{icsg} - A_p)$$

Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería de completamientos de sartas selectivas. Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017. p 61.

Donde:

- F_c = Fuerza del empaque al revestimiento [lbf]
- F_p = Fuerza de la tubería al empaque [lbf]
- $\Delta P(gomas)$ = Cambio de presión en las gomas [psi]
- A_{icsg} = Área interna del revestimiento [in²]
- A_p = Área del empaque [in²]

Estas ecuaciones son sometidas a modificaciones dependiendo del tipo de anclaje, si esta está o no anclada al empaque y si está o no anclada a la tubería de revestimiento. La **Figura 28** lo ilustra para el caso anclado de tubería a empaque y de empaque a revestimiento:

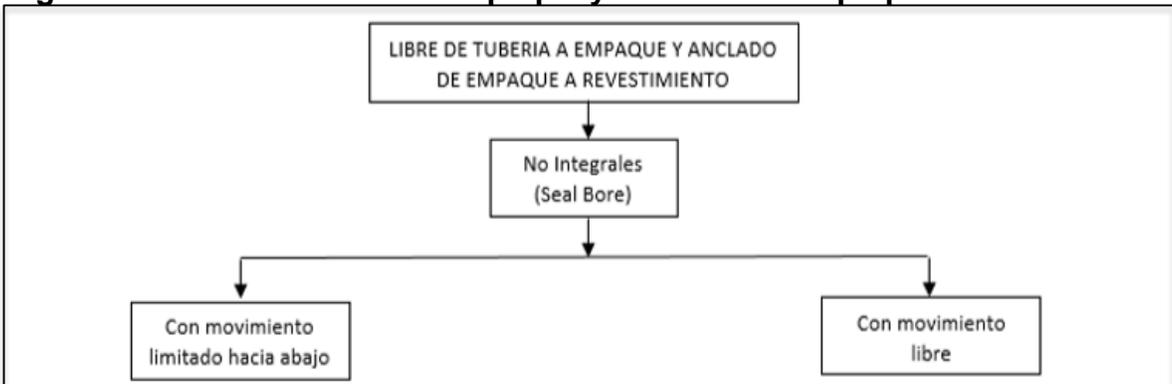
Figura 28. Anclado de tubería a empaque y de empaque a revestimiento



Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería de completamientos de sartas selectivas. Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017. p 62.

La **Figura 29**, muestra el caso libre de tubería a empaque y anclado de empaque a revestimiento:

Figura 29. Libre de tubería a empaque y anclado de empaque a revestimiento



Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería de completamientos de sartas selectivas. Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017. p 62

Finalmente, la **Figura 30**, expone el caso anclado de tubería a empaque y libre de empaque a revestimiento:

Figura 30. Anclado de tubería a empaque y libre de empaque a revestimiento



Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería de completamientos de sartas selectivas. Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017. p 62

5.2 PREMISAS MODELO PACKER TANDEM

Teniendo en cuenta las ecuaciones del modelo de Lubinski, se debe realizar unas afirmaciones que deben ser tenidas en cuenta para proceder a generar un modelo óptimo de empaques tipo tándem, el modelo de Lubinski tiene en cuenta todos los análisis de esfuerzos expuestos en el anterior capítulo, pero no determina con exactitud ciertos casos específicos que serán expuestos, algunos relacionados con correcciones para los empaques tipo tándem.

5.2.1 Modelo de Empaque Individual. El arreglo de completamiento para este tipo de empaque el cual puede ser hidráulico, mecánico o hidrostático desde que posea cuñas. Seguidamente se tienen las consideraciones a tener en cuenta:

- A_o y A_p tienen el mismo valor debido a su diseño, debido a que desde A_o hasta el A_i del revestimiento se encuentran las gomas.
- Como empaque individual no tiene equipos u otras herramientas por debajo.
- El ID de la tubería se mantiene constante a través de toda la sarta.

Teniendo en cuenta las siguientes consideraciones se tiene que la **Ecuación 33** posee las siguientes modificaciones.

Donde:

- $Fa^b = 0$, ya que debajo del empaque no hay equipos, tubería u otras herramientas.

- $(A_i^b - A_p)P_i$, considerando que A_o y A_p son iguales la fuerza afecta el empaque.
- $(A_o^b - A_p)P_o^b$ y $(A_o^a - A_p)P_o^a$, se eliminan, ya que A_o y A_p son iguales.
- $(A_i^a - A_p)P_i$, no existe esta área de aplicación ya que el ID se mantiene en toda la tubería.
- F_a^a , la fuerza se ejerce al estar conectada una tubería por encima.

De manera tal que al eliminar los factores expuestos anteriormente se tiene una modificación descrita en la **Ecuación 35**.

Ecuación 35. Fuerza tubería al empaque modificado a empaque individual

$F_p = -(A_i^b - A_p)P_i - F_a^a$

Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería de completamientos de sargas selectivas. Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017. p 64.

Las fuerzas de la tubería al revestimiento quedarían así representadas. Para el caso de las fuerzas del empaque al revestimiento (F_c), las cuales se hacen con la **Ecuación 34** se mantienen igual.

5.2.2 Modelo de empaque intermedio. Como su nombre lo indica aquí se evalúa el empaque intermedio para una sarga selectiva de mandril continuo. El ID se mantendrá a lo largo de la tubería. El modelo obedece a las siguientes consideraciones:

- A_o y A_p tienen el mismo valor debido a su diseño, debido a que desde A_o hasta el A_i del revestimiento se encuentran las gomas.
- Existen equipos u otras herramientas debajo del empaque.
- El ID de la tubería se mantiene constante a través de toda la sarga.

De la **Ecuación 33** se procede a realizar las siguientes consideraciones para así generar la fuerza de tubería con empaque intermedio.

- F_a^b = La fuerza proviene de la tubería que por abajo se encuentra conectada.
- $(A_i^b - A_p)P_i = 0$, dado a que A_o y A_p son iguales.
- $(A_o^b - A_p)P_o^b = (A_o^a - A_p)P_o^a$, se eliminan dado que A_o y A_p son iguales.
- F_a^a , la fuerza es ejercida por la tubería conectada por arriba.
- $(A_i^a - A_p)P_i$, el ID se mantiene en la totalidad de la sarga, por lo tanto, no se ejerce esta fuerza.

De estas identificaciones se logra determinar la **Ecuación 36**:

Ecuación 36. Fuerza tubería al empaque modificado a empaque individual resultante.

$$Fp = Fa^b - Fa^a$$

Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería de completamientos de sartas selectivas. Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017. p 65.

El Fp quedaría representado como lo denota la **Ecuación 36**. Fc, por otra parte, se calcula nuevamente el Fc con la **Ecuación 34**.

5.2.3 Empaque sin cuñas (Tándem). Como se puede apreciar en la **Figura 18**, en el arreglo de los empaques se observa al empaque tándem entre dos cuñas, esto se debe a que con esta disposición se evitan mayores impactos sobre la tubería.

Las consideraciones que se expondrán a continuación son aplicadas a la ecuación de Lubinski con la finalidad de ilustrar un modelo matemático que simule el comportamiento de un empaque intermedio sin cuñas.

- El empaque intermedio está anclado a la tubería y libre al revestimiento.
- Hay empaques, herramientas u otros equipos por debajo del empaque a evaluar.
- El ID de la tubería se mantiene constante a través de toda la sarta.

De la **Ecuación 33** y de la **Ecuación 34** se procede a realizar las siguientes modificaciones teniendo en cuenta las siguientes premisas

- $Fc = 0$, ya que no hay anclaje del empaque al revestimiento
- $\Delta P(gomas) * (Aicsg - Ap)$, se ejerce fuerza a través de las gomas y se transmite a la tubería Fp.
- Se introduce Fc en la ecuación de Fp, tomando Ap como el área interior del revestimiento $Aicsg$.

Con base a lo anterior la **Ecuación 37** quedaría:

Ecuación 37. Fuerza tubería al empaque modificado a tándem.

$$Fp = Fa^b - (Ai^b - Aicsg)Pi + (Ao^b - Aicsg)Po^b - Fa^a + (Ai^a - Aicsg)Pi - (Ao^a - Aicsg)Po^a$$

Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería de completamientos de sartas selectivas. Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017. p 69.

Al ser un empaque integral se toman las mismas consideraciones que se realizaron para los casos anteriores de empaques.

- Fa^b , la fuerza se ejerce debido a la tubería y equipos que se encuentran conectados debajo.
- $(Ai^b - Aicsg)Pi$ y $(Ai^a - Aicsg)Pi$, estas fuerzas no se ejercen dado que el empaque es integral y la tubería tiene siempre el mismo ID.
- $(Ao^b - Aicsg)Po^b$ y $(Ao^a - Aicsg)Po^a$, las fuerzas se ejercen sobre la sarta.
- Fa^a , al haber una tubería conectada por encima se ejerce la fuerza.

De la **Ecuación 33** se corrigen las fuerzas dando paso a la **Ecuación 38**:

Ecuación 38. Fuerza tubería al empaque tándem

$Fp = Fa_{correctada} - Fa_{correctada}$
--

Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería de completamientos de sargas selectivas. Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017. p 70.

Ap y $Aicsg$ se toman iguales, ya que al no tener cuñas el empaque puede desplazarse sin problemas por la tubería, el $Aicsg$ actúa como sistema de sellos.

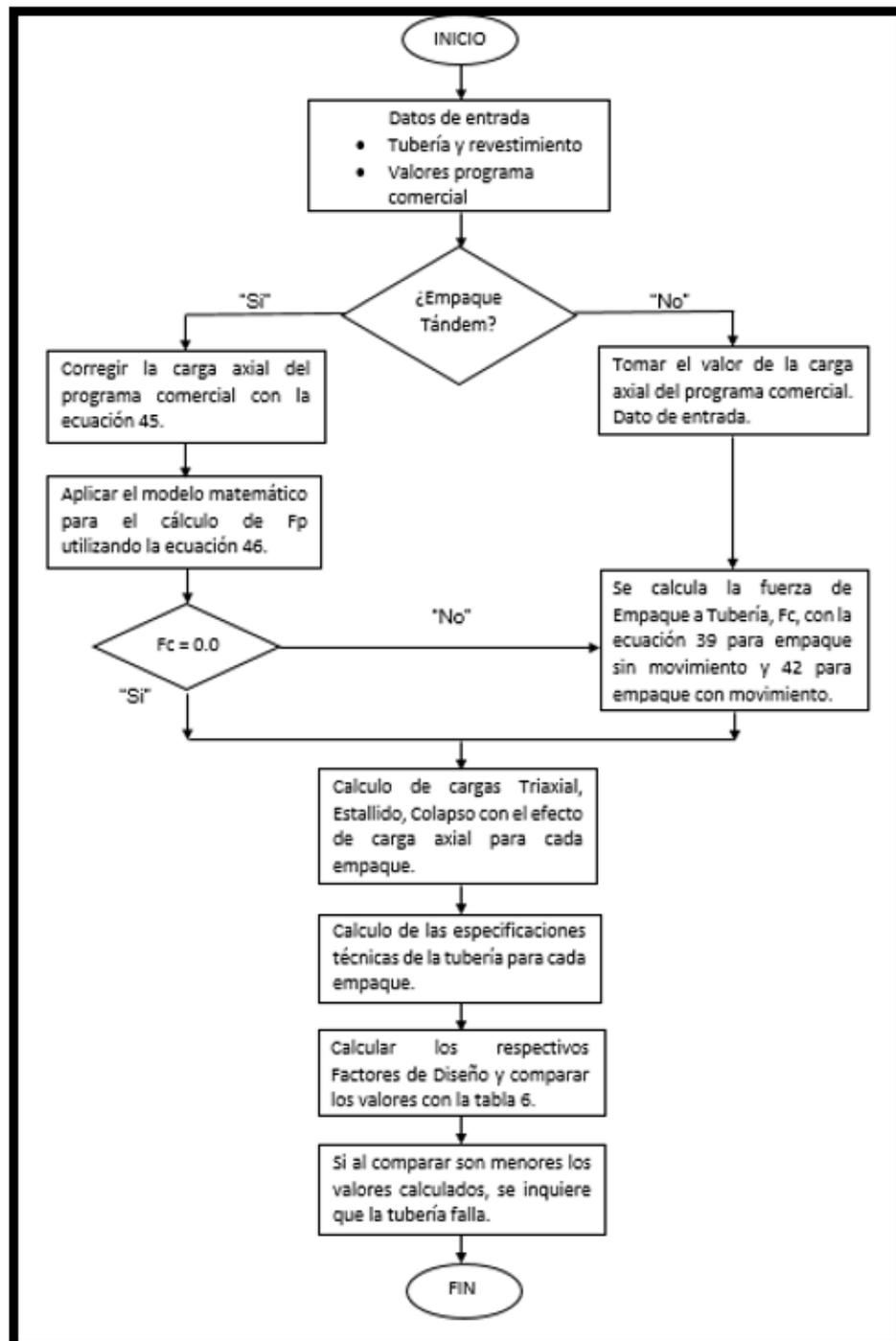
Para este tipo de empaques no se calcula el Fc , ya que al no tener cuñas no se transfiere la fuerza del empaque al revestimiento, ni el diferencial de las fuerzas a las gomas.

5.3 MODELO PACKER TANDEM ANALYSIS (PTA)

El modelo Packer Tandem Analysis fue un diseño realizado por estudiantes de la Surcolombiana que tiene como finalidad la correcciones necesarios para la determinación de nuevas cargas que sufren los empaques tipo tándem, para ello se tiene en cuenta que deben existir ciertas premisas al iniciar el programa como lo puede ser la determinación o métodos necesarios que deben ser tenidos en cuenta para que el programa lograr simular de manera efectiva los tipos de esfuerzos que pueden soportar los empaques. Cabe anotar que al modelo PTA original se le hicieron algunas modificaciones, como la corrección de fórmulas en el Visual Basic y la adición de una nueva sección donde se encuentran las variables y rangos de los diferentes grados de tubería, junto con la posibilidad de agregar nuevos grados, a fin de poder evaluar con mayor practicidad y de manera más concreta el desempeño de las herramientas en uso mediante los datos arrojados.

En la **Figura 31** se presenta un diagrama de flujo el cual explica los pasos para la aplicación del modelo PTA:

Figura 31. Diagrama de Flujo de la Aplicación del Modelo PTA



Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería de completamientos de sartas selectivas. Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017. p 72.

El programa PTA está comprendida por 8 secciones, cada uno con una función específica que permitirá llegar a calcular los factores de seguridad más adecuados para el caso a evaluar.

5.3.1 Primera sección. En esta sección se organizan los datos de entrada de la tubería y del revestimiento concernientes a los diámetros tanto interno como externo, así como la cantidad de empaques y número de casos a realizar. También se estipulan los ratings axiales de la tubería Y del empaque y el punto de cedencia. En la parte inferior se encuentra el grado de cada tubería y al extremo derecho se especifican los factores de diseño de referencia para las corridas como se puede detallar en la **Figura 32**.

Figura 32. Packer Tandem Analysis (PTA)

PACKER TANDEM ANALYSIS - PTA							
DATOS DE ENTRADA							
TUBERIA			REVESTIMIENTO			FACTORES DE DISEÑO	
Diametro externo de la tubería	2,875	in	Diametro externo del revestimiento	7	in	Tension	1,34
Diametro interno de la tubería	2,441	in	Diametro interno del revestimiento	6,276	in	Compresion	1,2
Yield Point	80000	psi	Diametro del sello del empaque	2,875	in	Triaxial SF	1,25
Rating axial de la tubería	144962	psi	Grado de Tubería	P-110	▼	Estallido SF	1,25
Rating axial del empaque	119200	psi				Colapso SF	1
Número de empaques	3						
Numero de Casos	3						
Grado de Tubería	L-N-80						

Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería de completamientos de sartas selectivas. Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017.

5.3.2 Segunda sección. Aquí se encuentran las variables aplicables y rangos de los tipos de colapso para los diferentes grados de tubería que normalmente se encuentran en el mercado y que pueden ser utilizados en distintas operaciones. Al final de la tabla de encuentra una casilla de grado particular para el establecimiento de un grado diferente específico denominado por el usuario como se puede observar en la **Figura 33**.

Figura 33. Variables para grados de tubería

GRADOS DE TUBERIA											
Grado	Colapso por Fluencia Dt/Rango	Colapso Plastico					Colapso Trasicional			Colapso Elastico	
		A	B	C	Dt/Rango		F	G	Dt/Rango		
H-40	16,4	2,95	0,0465	754	16,4	27,01	2,063	0,0325	27,01	42,64	42,64
50	15,24	2,976	0,0515	1056	15,24	25,63	2,003	0,0347	25,63	38,83	38,83
J-K-55	14,81	2,991	0,0541	1206	14,81	25,01	1,989	0,036	25,01	37,21	37,21
60	14,44	3,005	0,0566	1356	14,44	24,42	1,983	0,0373	24,42	35,73	35,73
70	13,85	3,037	0,0617	1656	13,85	23,38	1,984	0,0403	23,38	33,17	33,17
C-B-75	13,6	3,054	0,0642	1806	13,6	22,91	1,99	0,0418	22,91	32,05	32,05
L-N-80	13,38	3,071	0,0667	1955	13,38	22,47	1,998	0,0434	22,47	31,02	31,02
C-90	13,01	3,106	0,0718	2254	13,01	21,69	2,017	0,0466	21,69	29,18	29,18
C-T-X-95	12,85	3,124	0,0743	2404	12,85	21,33	2,029	0,0482	21,33	28,36	28,36
100	12,7	3,143	0,0768	2553	12,7	21	2,04	0,0499	21	27,6	27,6
P-G-105	12,57	3,162	0,0794	2702	12,57	20,7	2,053	0,0515	20,7	26,89	26,89
P-110	12,44	3,181	0,0819	2852	12,44	20,41	2,066	0,0532	20,41	26,22	26,22
120	12,21	3,219	0,087	3151	12,21	19,88	2,092	0,0565	19,88	25,01	25,01
Q-125	12,11	3,239	0,0895	3301	12,11	19,63	2,106	0,0582	19,63	24,66	24,66
130	12,02	3,258	0,092	3451	12,02	19,4	2,119	0,0599	19,4	23,94	23,94
S-135	11,92	3,278	0,0946	3601	11,92	19,18	2,133	0,0615	19,18	23,44	23,44
140	11,84	3,297	0,0971	3751	11,84	18,97	2,146	0,0632	18,97	22,98	22,98
150	11,67	3,336	0,1021	4053	11,67	18,57	2,174	0,0666	18,57	22,11	22,11
155	11,59	3,356	0,1047	4204	11,59	18,37	2,188	0,0683	18,37	21,7	21,7
160	11,52	3,385	0,1072	4356	11,52	18,19	2,202	0,07	18,19	21,32	21,32
170	11,37	3,412	0,1123	4660	11,37	17,82	2,231	0,0734	17,82	20,6	20,6
180	11,23	3,449	0,1173	4966	11,23	17,47	2,261	0,0769	17,47	19,93	19,93
Grado Particular											

Fuente: Elaboración propia. 2019.

5.3.3 Tercera sección. Se encuentran los datos de entrada del programa, estos provienen de un programa de diseño. Para esta tesis se utilizará el programa Wellcat™ de diseño de tuberías de Halliburton el cual es el normalmente utilizado por Ecopetrol S.A. en sus simulaciones. Los datos a colocar son la profundidad, la fuerza tubería-empaque, carga axial por encima y por debajo del empaque, presión anular de la misma manera, la fuerza empaque-revestimiento y la presión interna de la tubería. La casilla del final es para determinar si el empaque utilizado es de cuñas o tándem. Finalmente, al costado derecho se encuentra el botón de calcular el cual se presiona una vez los datos de entrada y de entrada comercial estén concretados para dar inicio a la corrida y el de limpiar, el cual una vez recopilados los datos reestablece el modelo. El modelo puede simular hasta 10 empaques por corrida. Por practicidad en este ejemplo solo se colocan 3. En la **Figura 33** se ilustra la tercera sección.

Figura 34. Datos de entrada programa comercial

DATOS DE ENTRADA PROGRAMA								
INYECCION COMPLETA								
Resultados Programa Comercial								
Profundidad	Fuerza Tubería a Empaque	Carga Axial		Presión Anular		Fuerza de Empaque a Revestimiento o Interna	Presión	Escribir "C" (Cuñas) o "T"
MD (ft)	(lbf)	Arriba (lbf)	Debajo (lbf)	Arriba (Psi)	Debajo(Psi)	(lbf)	(Psi)	
8502,5	6949	25613	32561	3689,21	6729,65	-28975	6728,85	C
9002,5	1618	30211	31829	6919,72	6919,8	1618	6919,8	T
9502,5	-36663	29479	-7184	7110,67	7110,75	-36663	7110,75	C

Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería de completamientos de sargas selectivas. Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017.

5.3.4 Cuarta sección. En esta sección se calculan las fuerzas axiales para las fuerzas tubería-empaques y tubería-revestimiento modificadas por el modelo. Se especifican las correcciones de cargas axiales en los empaques como se puede ver en la **Figura 35**.

Figura 35. Corrección cargas axiales.

CARGA AXIAL CORREGIDA					
Caso 1		INYECCION COMPLETA			
Fuerzas					
Nombre	Profundidad de Empaque (ft)	Fuerza Tubería a Empaque (lbf)	Fuerza de Empaque a Revestimiento (lbf)	Carga Axial Corregida (lbf)	
Empaque	4502,5	22272	33963	19208,756	22310,625
1	8502,5	6948,0	-28975,0	25613,0	32561,0
2	9002,5	-336670,4	0,0	199354,2	-137316,2
3	9502,5	-36663,0	-36663,0	29479,0	-7184,0

Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería de completamientos de sargas selectivas. Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017.

5.3.5 Quinta sección. Se tiene una tabla mostrando los resultados de las cargas de colapso, estallido, axiales y triaxiales para cada profundidad de estudio y los escenarios que hayan sido devengados. (ver **Figura 36**)

Figura 36. Cargas totales halladas

CARGAS TOTALES									
Caso 1		INYECCION COMPLETA							
Name	Packer MD (ft)	Carga Axial Corregida (lbf)		Carga Triaxial (lbf)		Carga Estallido (lbf)		Carga de Colapso (lbf)	
		Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo
1	8502,5	25613,0	32561,0	21336,54	24701,06	3039,64	-0,8	-2023,876	1016,564
2	9002,5	199354,2	-137316,2	116936,53	68860,46	0,08	0	1044,509	1044,589
3	9502,5	29479,0	-7184,0	23378,95	3146,14	0,08	0	1073,334	1073,414

Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería de completamientos de sargas selectivas. Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017.

5.3.6 Sexta sección. En la sexta sección se hallarán las especificaciones técnicas para cada profundidad encima y debajo del empaque. Estas son las especificaciones técnicas de estallido, colapso, axiales y triaxiales. Esto se puede ver en la **Figura 37**.

Figura 37. Especificaciones técnicas halladas

ESPECIFICACIONES TECNICAS							
Caso 1		INYECCION COMPLETA					
Name	Empaque MD (ft)	Especificacion tecnica Axial		Especificacion tecnica Triaxial		Especificacion tecnica estallido	
		Lbf	Psi	Encima	Debajo	Encima	Debajo
1	8502,5	144962,5	80000,0	10566,96	NO HAY	NO HAY	9697,806828
2	9002,5	144962,5	80000,0	10566,96	NO HAY	FALLA	FALLA
3	9502,5	144962,5	80000,0	10566,96	NO HAY	NO HAY	11165,00688

Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería de completamientos de sartas selectivas. Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017.

5.3.7 Séptima sección. Se ilustran los valores de factores de seguridad de estallido, colapso, axial y triaxial. Con estos resultados se determina si el empaque falla o no. El modelo arroja un resultado de “NO HAY” o de “FALLA”, donde el “no hay” indica que la tubería no fallara al estar muy por encima de los factores de diseño y “falla” cuando la relación fuerza axial-cedencia hecha por el programa da menor a 0, en dicho caso el programa indicara una falla automática del completamiento El modelo compara estos factores con los que se fijaron en la Primera Sección. Hecha esta comparación, el modelo resaltara en color rojo los factores que se encuentren por debajo de estos. El programa compara la tensión con los factores axiales, triaxial con triaxial, estallido con estallido y colapso con colapso, lo cual refleja que bajo las condiciones establecidas la tubería es propensa a falla. (ver **Figura 38**)

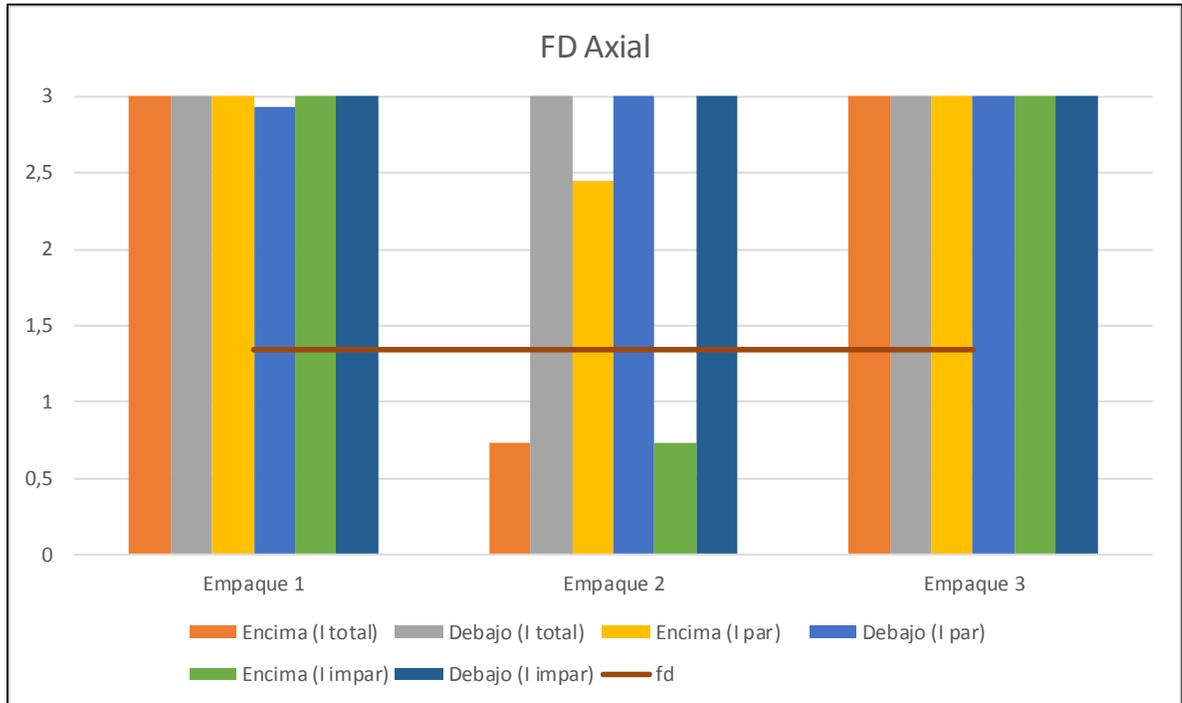
Figura 38. Factores de diseños establecidos con los datos

RESULTADOS - FACTORES DE DISEÑO									
Caso 1		INYECCION COMPLETA							
Name	Packer MD (ft)	FD Axial		FD Triaxial		FD estallido		FD colapso	
		Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo
1	8502,5	5,6597225	4,5	3,7	3,24	3,48	NO HAY	NO HAY	9,5397917
2	9002,5	0,7271603	100,0	0,7	1,16	132086,96	NO HAY	FALLA	FALLA
3	9502,5	4,9174827	100,0	3,4	25,43	132086,96	NO HAY	NO HAY	10,401398

Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería de completamientos de sartas selectivas. Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017

5.3.8 Octava sección. A continuación, se encuentran las gráficas que ilustran el comportamiento de cada uno de los factores de diseño evaluados. La grafica muestra la carga por encima y por debajo de cada empaque, para cada esquema de inyección (Inyección completa, par e impar). La línea negra representa el factor de diseño de referencia estipulado al inicio del proceso (Primera Sección, **Figura 31**). Como lo ilustran las **Gráfica1** para el factor axial.

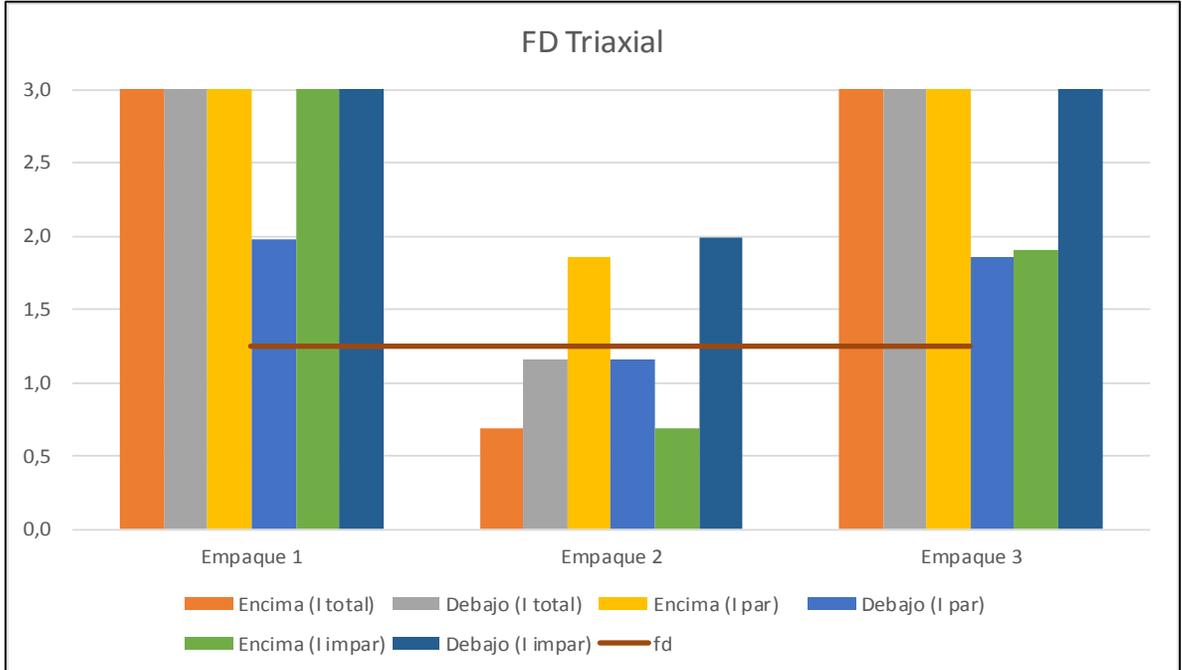
Gráfica 1. Graficas modelo PTA. FD Axial



Fuente: Elaboración propia. 2019

El factor triaxial, como lo muestra la **Gráfica 2**.

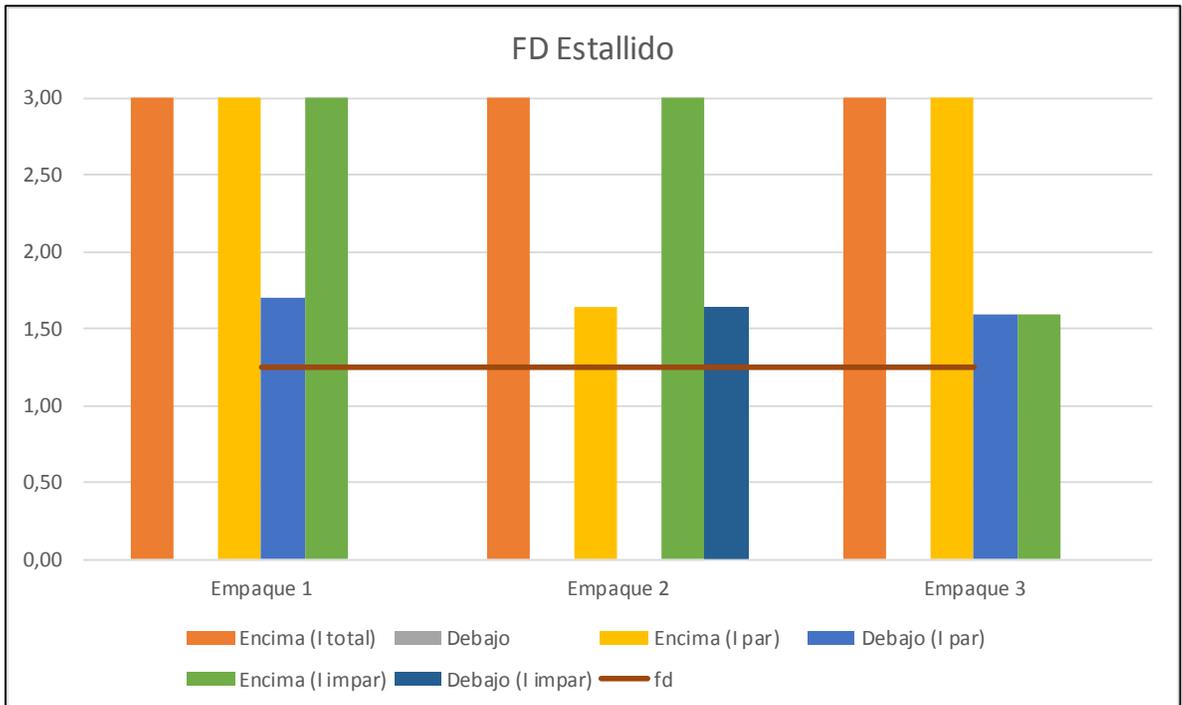
Gráfica 2. Modelo PTA. FD Triaxial.



Fuente: Elaboración propia. 2019

El factor de estallido, como lo ilustra la **Gráfica 3**.

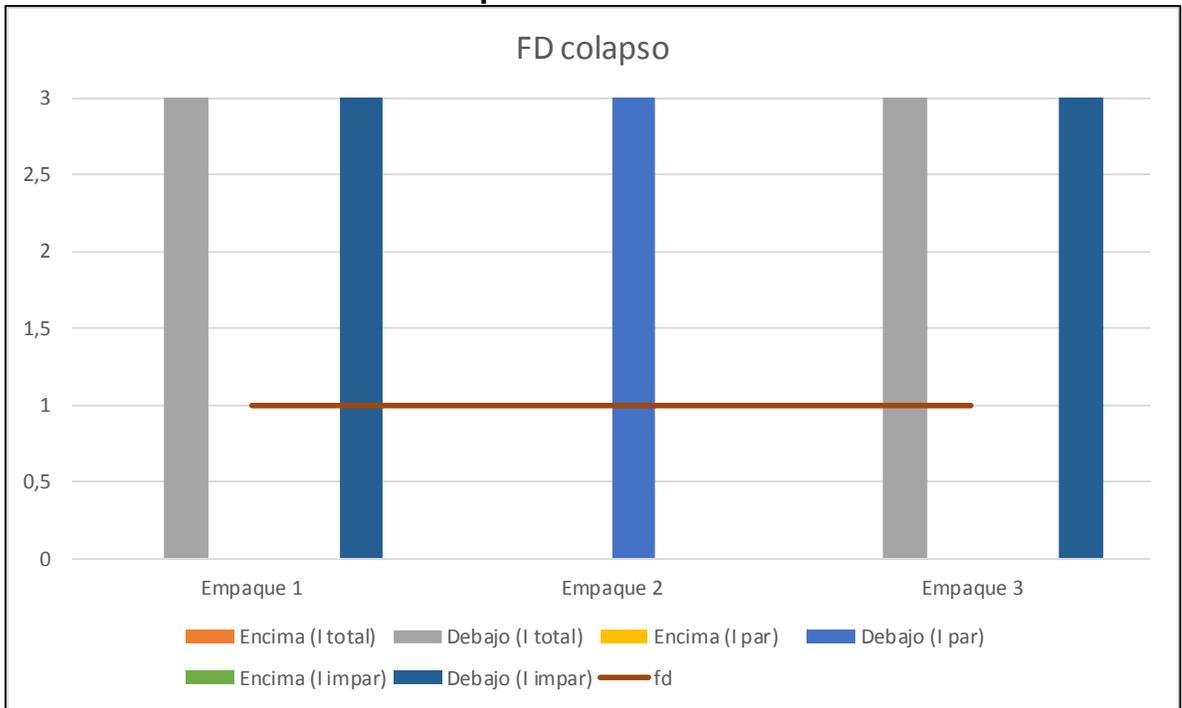
Gráfica 3. Modelo PTA. FD Estallido.



Fuente: Elaboración propia. 2019

El factor de colapso, como se ve en la **Gráfica 4**.

Gráfica 4. Modelo PTA. FD Colapso



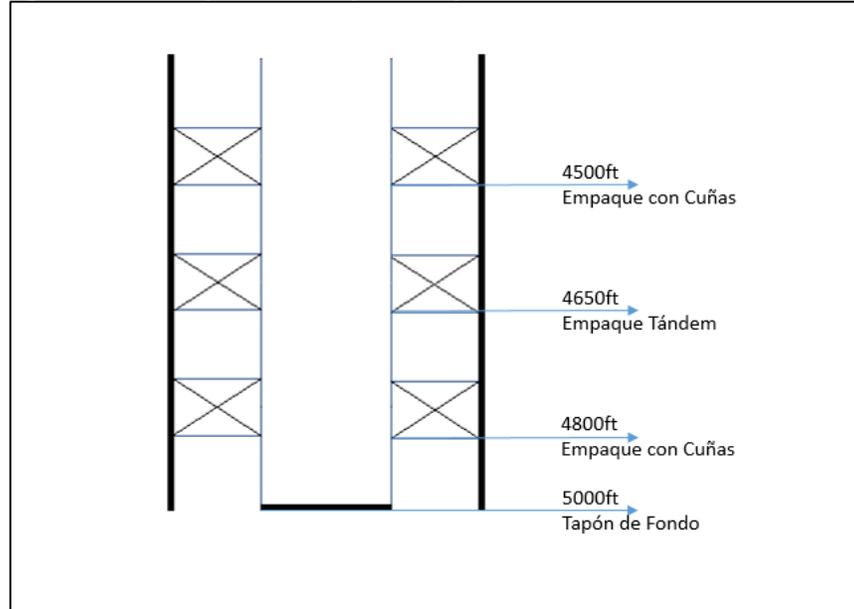
Fuente: Elaboración propia. 2019

Habiendo descrito la manera de operar del programa PTA y los principios por los cuales está regido, se pasará a su aplicación dentro de diferentes ejemplos.

5.4 EJEMPLO MODELO PTA

Para la demostración de todo lo anteriormente descrito por el programa, se tiene en cuenta la demostración del programa con un pozo tipo realizado por los mismos autores, para ello se tomaron inicialmente unas características iniciales en las que el pozo se ve involucrado. En la **Figura 39** se tiene el ejemplo del estado mecánico de un pozo tipo que será implementado posteriormente dentro del modelo.

Figura 39. Esquema de pozo tipo.



Fuente: Elaboración propia. 2019

Para la realización del pozo tipo se tuvo inicialmente unas profundidades de empaques con cuñas a profundidades de 4800 pies y 4500 pies. Posterior a este análisis se determina que debe estar anclado en medio de ambos empaques uno tipo tándem de manera que se pueda generar aquellas zonas de selectividad que se desea con la ilustración.

5.4.1 Datos de entrada WELLCAT. Para iniciar con el modelo es necesario determinar ciertos datos de entrada para el programa de la empresa Halliburton. Este sirve para determinar los tipos de cargas presentes junto con las solventes operativas en el programa. Se tiene en cuenta que el programa comercial no posee la capacidad de predecir las cargas en los empaques tipo tándem en las tuberías. Para ello se tiene en cuenta que el empaque tipo tándem se toma inicialmente como un empaque hidráulico con cuñas al igual que los otros dos.

Para seguir con la elaboración con el programa se debe tener en cuenta las siguientes características expuesta en la **Cuadro 3** para que el programa corra las cargas presentes en la tubería.

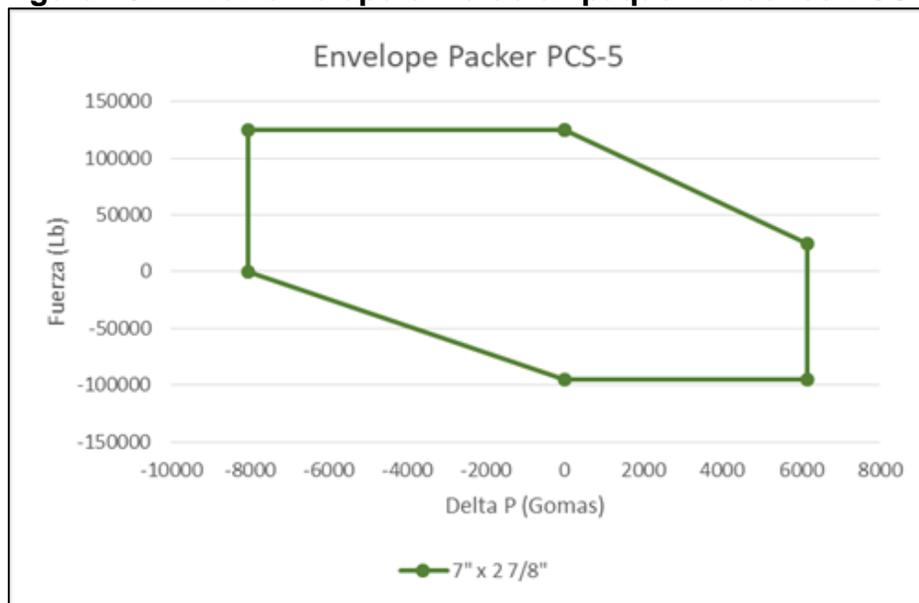
Cuadro 3. Datos de entrada para el programa.

Datos de entrada del programa
Temperatura de superficie
Gradiente de temperatura
Fluido de inyección (densidad)
Caudal de inyección
Condición actual del pozo
Cantidad de zonas si el pozo es selectivo
Presión de yacimiento
Presión de inyección en cabeza

Fuente: Elaboración propia. 2019.

Junto a los datos de entrada necesarios para la elaboración del análisis de tubería, se debe tener en cuenta que los empaques poseen una envolvente operativa dada por el fabricante. Para fines prácticos, se tiene en cuenta que los empaques son de tipo PCS-5. Empaques tipo hidráulico tándem generados por la empresa argentina Texproil SRL. A continuación, en la **Figura 40** se tiene en cuenta la envolvente operativa de los empaques tipo PCS-5, los datos de la envolvente operativa son necesarios para el desempeño de los resultados.

Figura 40. Envolvente operativa de empaque hidráulico PCS-5



Fuente: Texproil SRL. 2019

Junto con los datos de la envolvente operativa, se debe tener en cuenta las condiciones que debe poseer el empaque al momento de ser bajado dentro del completamiento. Estos datos son proporcionados por el fabricante, estos factores son presión interna, tensión, compresión. Finalmente, todos estos datos que se usaron para tomar las condiciones en el pozo están recopiladas en la **Cuadro 4**.

Cuadro 4. Datos tenidos en cuenta para el diseño del pozo.

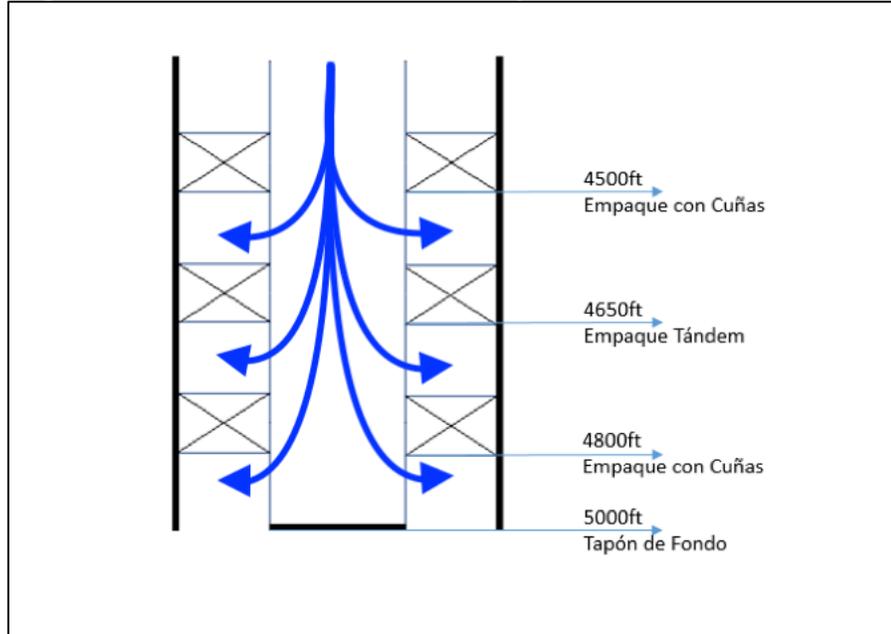
Datos		Valor
Casing		7"- 26 # P-110
Tubing		2 7/8" – 6.5 # N-80
Temperatura superficie		90 °F
Gradiente de temperatura		1.5 °F/100 ft
Densidad del fluido de inyección		8.33 ppg
Presión inyección		2000 psi
Caudal de inyección		3000 Bwp
Empaque PCS-5	Presión interna	11200 Psi
	Tensión	67000 Psi
	Compresión	67000 Psi

Fuente: Elaboración propia. 2019

Teniendo en cuenta los datos de entrada y simulando dentro del programa se puede obtener las cargas que logran sufrir las cargas. Sin embargo, es necesario tener en cuenta tres casos en donde se vean como los empaques se ven afectados dentro de este ejemplo de pozo tipo.

5.4.2 Ejemplo inyección total. En este tipo de ejemplo se va a tener en cuenta que el pozo posee la capacidad de inyectar el fluido a través de las tres oberturas dadas y que el fluido busca ejercer presión de manera que se vean afectadas las cargas. Como lo puede expresar la **Figura 41**.

Figura 41. Estado mecánico de inyección total.



Fuente: Elaborado propia. 2019.

Teniendo en cuenta las características del pozo junto con las características de inyección que se tuvieron inicialmente se procede a determinar los tipos de cargas de la **Tabla 1** que se encuentran dentro de los tres empaques según el tipo de inyección que se realizó.

Tabla 1. Cargas de los empaques en inyección total.

Name	Packer MD (ft)	Tubing-to-Packer Force (lbf)	Axial Load		Annulus Pressure		Packer-to-Casing Force (lbf)
			Above (lbf)	Below (lbf)	Above (psi)	Below (psi)	
Packer #3	4502.5	11693	22272	33963	1948.31	1948.40	11693
Packer #2	4652.5	714	32990	33702	2013.22	2013.31	714
Packer #1	4802.5	-40595	32728	-7868	2078.13	4964.62	-111151

Fuente: Elaborado por los autores. 2019.

Junto con los datos obtenidos del programa Wellcat™ se puede determinar si estos empaques son óptimos o no para desempeñarse teniendo en cuenta la envolvente operativa. A continuación, se evalúa la envolvente operativa expuesta por el programa en los puntos de los empaques.

Teniendo los datos obtenidos por el programa se procede ser analizados respecto al modelo PTA. Se debe tener en cuenta que al poseer un empaque tipo tandem la

envolvente operativa no expresa con exactitud el comportamiento de esfuerzos respecto a los empaques tipos tándem.

5.4.2.1 Resultados inyección completa con PTA. Al comparar los factores de diseño calculados por el modelo con los factores de diseño iniciales, establecidos por Ecopetrol S.A. (ver **Cuadro 5**) es evidente que bajo el esquema de inyección total el empaque tándem puede ser utilizado, al estar los valores de fuerza axial, triaxial y estallido por encima de lo requerido para la operación y el factor de colapso no presentar falla al ser la presión interna mayor a la anular. (Ver **Tabla 3**).

Cuadro 5. Factores de diseño de Ecopetrol S.A.

Parámetros	Factores de diseño
Axial	1.34
Triaxial	1.25
Estallido	1.1
Colapso	1

Fuente: Ecopetrol S.A. 2019

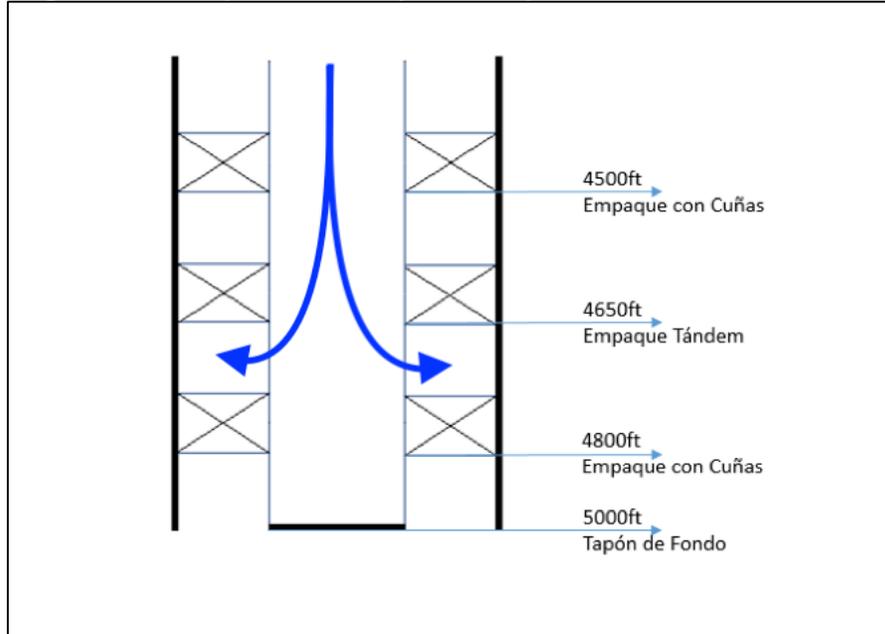
Tabla 2. Datos obtenidos modelo PTA inyección completa.

Caso 1		INYECCION COMPLETA							
Name	Packer	FD Axial		FD Triaxial		FD estallido		FD colapso	
	MD (ft)	Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo
1	4502.5	6.5087317	4.3	4.2	3.59	3.65	4	NO HAY	NO HAY
2	4652.5	1.7635241	100.0	1.8	3.41	3.65	4	NO HAY	NO HAY
3	4802.5	4.4293104	100.0	3.6	1.25	3.66	2	NO HAY	NO HAY

Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería de completamientos de sartas selectivas. Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017

5.4.3 Ejemplo inyección par. Este caso en particular toma en cuenta el objetivo específico de sarta selectiva. Para ello se tiene en cuenta que la inyección se genera solamente en el punto medio de las tres inyecciones. Como se puede demostrar en la **Figura 42**.

Figura 42. Esquema de inyección par



Fuente: Elaboración propia. 2019.

Teniendo en cuenta el modelo como se tomó la inyección se procede a determinar las cargas asociadas a este ejemplo. Como se puede apreciar en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Cargas de los empaques en inyección par

Name	Packer MD (ft)	Tubing-to-Packer	Axial Load		Annulus Pressure		Packer-to-Casing Force (lbf)
		Force (lbf)	Above (lbf)	Below (lbf)	Above (psi)	Below (psi)	
Packer #3	4502.5	17519	21816	39334	1950.09	500.00	52964
Packer #2	4652.5	-14427	38360	23932	500.00	4425.93	-110391
Packer #1	4802.5	-23109	22958	-152	4487.94	500.00	74371

Fuente: Elaborado propia. 2019

Al igual que en el otro caso se demuestra cómo se ve desempañado la envolvente operativa según los puntos más relevantes en la tubería.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos por el programa comercial junto con la envolvente operativa, se determinan las correcciones respecto al PTA.

5.4.3.1 Resultados inyección par con PTA. Al ser comparados con los valores en la tabla de factores de diseño, se puede apreciar que al igual que en el caso

anterior el empaque funciona bajo las exigencias de la operación de este esquema en específico (ver **Tabla 4**).

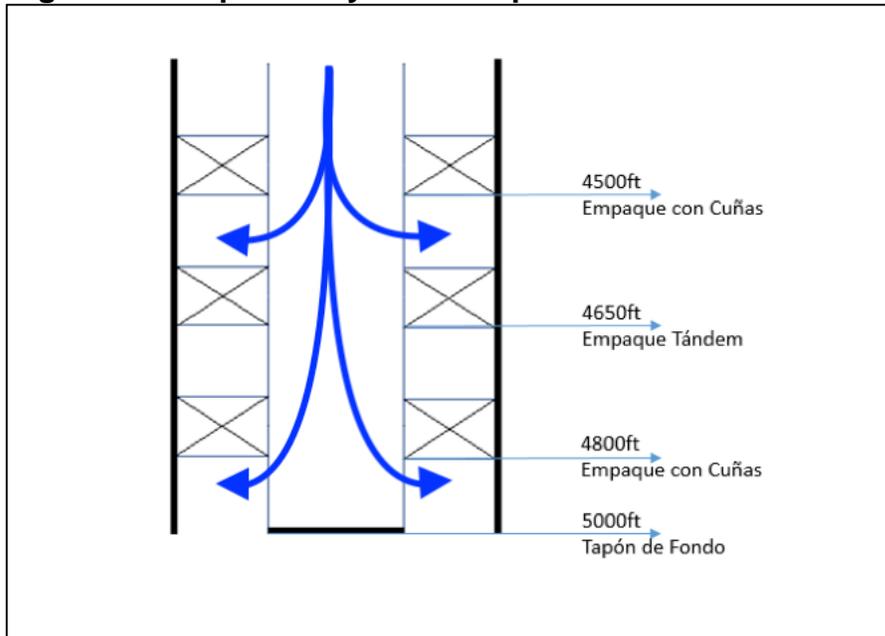
Tabla 4. Datos obtenidos modelo PTA inyección par

Caso 2		INYECCION PAR							
Name	Packer MD (ft)	FD Axial		FD Triaxial		FD estallido		FD colapso	
		Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo
1	4502.5	6.6	3.7	4.19	2.91	3.6488	NO HAY	NO HAY	9.475484
2	4652.5	2.9	100.0	2.48	1.84	2.3974	22	NO HAY	NO HAY
3	4802.5	6.3	100.0	4.94	2.68	21.961	2	NO HAY	NO HAY

Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería de completamientos de sartas selectivas. Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017

5.4.4 Ejemplo inyección impar. Finalmente se tiene en cuenta cuando se genera una inyección en el inicio y parte final del completamiento. Esto se puede ver contemplado en la **Figura 43**.

Figura 43. Esquema inyección impar.



Fuente: Elaboración propia. 2019.

Al igual que los otros casos, se procede a determinar cómo este tipo de inyección afecta los empaques según las condiciones en las que se ven afectados, en la **Tabla**

5 se puede apreciar los resultados del simulador teniendo en cuenta las cargas de los empaques.

Tabla 5. Cargas de los empaques en inyección impar.

Name	Packer MD (ft)	Tubing-to-Packer	Axial Load		Annulus Pressure		Packer-to-Casing
		Force (lbf)	Above (lbf)	Below (lbf)	Above (psi)	Below (psi)	Force (lbf)
Packer #3	4502.5	2348	21816	24163	1950.09	4363.83	-56652
Packer #2	4652.5	16156	23189	39344	4425	500.00	112118
Packer #1	4802.5	-45367	38371	-6998	500.00	4488.02	-142849

Fuente: Elaboración propia. 2019.

Como se ha tenido en cuenta en los anteriores casos, se tiene observa la envolvente operativa en este caso en particular. Sabiendo que la inyección es diferente a comparación de los dos anteriores casos.

Finalmente se observa como los datos finales de entrada son corregidos bajo el modelo PTA.

5.4.4.1 Resultados de inyección impar con PTA. Observando los resultados del modelo PTA, se puede entender que el factor de diseño triaxial para el empaque tándem por encima de este, incurre en una falla, cabe anotar que los factores de diseño no son una medida absoluta ya que se deja un factor con un margen más grande por seguridad. El hecho de que el valor este en rojo no significa una falla total en el completamiento, aun así, es recomendable reevaluar el escenario, para asegurarse más allá de la duda que la herramienta cumplirá con sus funciones a cabalidad. (Ver **Tabla 6**).

Tabla 6. Datos obtenidos modelo PTA inyección impar

Caso 3		INYECCION IMPAR							
Name	Packer MD (ft)	FD Axial		FD Triaxial		FD estallido		FD colapso	
		Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo
1	4502.5	6.6	6.0	4.19	4.78	3.6488	21.911	NO HAY	NO HAY
2	4652.5	1.1	5.4	1.06	2.89	21.896	2	NO HAY	NO HAY
3	4802.5	3.8	100.0	2.71	26.24	2.3644	21.965	NO HAY	NO HAY

Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería de completamientos de sartas selectivas. Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017

Como se puede apreciar en este caso, la inyección par afecta el segundo empaque de los instalados. Específicamente el empaque tipo tándem, los dos factores de seguridad que se vieron alterados son el axial encima y el triaxial encima. Por otra parte, se pudo observar que los factores de estallido y colapso no sufrieron daños significativos dentro del completamiento.

Concluyendo el caso expuesto, se puede aseverar que el completamiento bajo las características propuestas sufre problemas dentro de los empaques, por ende, no es recomendable bajar una tubería de producción con el diseño anterior.

Teniendo en cuenta todos los resultados expuestos en los tres casos del pozo tipo, se procede en el siguiente capítulo a determinar distintos tipos de ejemplos en donde se busca determinar bajo qué condiciones se puede obtener algún tipo de falla en los empaques tipo tándem. Para ello se toma distintos tipos de profundidades y espaciamientos de las herramientas entre otros factores.

6. EVALUACION DE SARTAS SELECTIVAS TENIENDO EN CUENTA EL MODELO PACKER TANDEM ANALYSIS

Teniendo en cuenta el concepto de funcionamiento del modelo PTA, es necesario realizar distintas corridas. Todo esto con el fin de poder determinar bajo qué aspectos una sarta selectiva puede funcionar de manera óptima. Para ello es necesario considerar ciertos parámetros que son cruciales al momento de diseñar un completamiento. El siguiente capítulo hace referencia a la toma de los datos simulados y que aspectos se tuvieron en cuenta para que el modelo PTA determinara si es funcional o no un empaque tándem en la tubería.

Para el inicio de este capítulo se requiere hablar de las condiciones y parámetros de diseño para su posterior evaluación. Por esto, se analiza cada variable y se describe el esquema bajo esa condición.

6.1 CONDICIONES DE EVALUACIÓN PARA EL DISEÑO DE COMPLETAMIENTO

A continuación, se tienen en cuenta los siguientes factores que se utilizaran para el desarrollo de los casos de simulación. Para ello es necesario caracterizarlos y explicar qué tipo de aspectos posee. Estos parámetros son: tamaños del casing y del tubing, grado de la tubería, profundidad a la que llega el completamiento, cantidad de empaques que se van a instalar, espaciamiento entre dichos empaques, presión de inyección y finalmente el tipo de operación a la cual serán sometidos los empaques.

6.1.1 Tamaño de Casing y tubing. Ecopetrol S.A., utiliza diferentes tipos de completamiento con diferentes diámetros, tanto de casing, como de tubing. A pesar de eso, y para practicidad de este trabajo de grado, se usaron los diámetros más comúnmente usados. En el primer caso se empleó un casing de 7" de diámetro externo con un tubing de 2 7/8", en el segundo se dispuso de un casing de 5 1/2" con tubing de 2 3/8". A continuación, se exponen las propiedades del primer caso expuesto en la **Cuadro 6**.

Cuadro 6. Propiedades primer caso de tamaño de tubería.

	Casing	Tubing
Diámetro externo	7"	2 7/8"
Diámetro interno	6.184"	2.441"
Conexión	BTC	EUE
Peso	29 lb/ft	6.5 lb/ft
Temperatura de superficie	90 °F	
Gradiente de temperatura	1.5 °F/100ft	
Tipo de pozo	Vertical	

Fuente: Elaboración propia. 2019.

De igual forma se tiene las condiciones del segundo caso, para ello se debe ver la **Cuadro 7** que expone dichos valores.

Cuadro 7. Propiedades segundo caso de tamaño de tubería.

	Casing	Tubing
Diámetro externo	5 1/2"	2 3/8"
Diámetro interno	4.77"	1.995"
Conexión	BTC	EUE
Peso	20 lb/ft	4.7 lb/ft
Temperatura de superficie	80 °F	
Gradiente de temperatura	1.5 °F/100ft	
Tipo de pozo	Vertical	

Fuente: Elaboración propia. 2019.

Como se puede apreciar, los tamaños de las tuberías varían en relación al tipo de completamiento que se haya hecho. Cabe mencionar que en muchas ocasiones se utilizaron pozos productores con completamientos predeterminados para hacer operaciones de inyección. Por ende, los diámetros de las tuberías son valores fijos y se debe maniobrar con ellos al momento de generar una inyección de agua. A pesar de esto se pasa por alto un factor primordial en el momento de evaluar el rendimiento de una tubería, el grado, factor que es analizado posteriormente.

6.1.2 Grado de la tubería. Como bien se había dicho, el grado de la tubería es un factor fundamental que debe ser tenido en cuenta ya que este describe la resistencia que posee el material. Generalmente los grados de tubería son del mismo material (acero), pero según su tratamiento térmico pueden o no soportar mejor las condiciones de operación. Para efectos prácticos, en este trabajo se utiliza tubería grado P110 con un peso de 29 lb/ft para el revestimiento y para la tubería de producción se usan los grados N80 y J55.

6.1.2.1 Grado N80. es un grado de tubería utilizado generalmente para procesos de inyección, suele usarse en profundidades altas (entre los 5000 a 10000 pies). Se reconoce con una banda roja en los extremos.

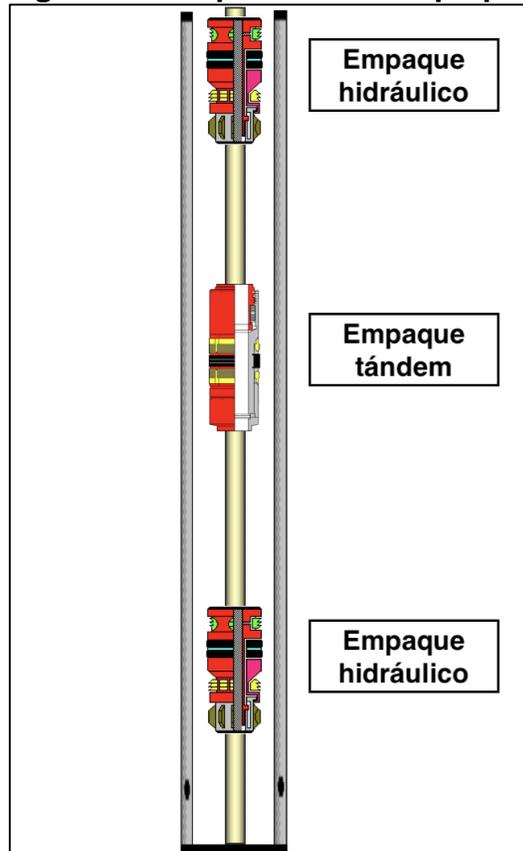
6.1.2.2 Grado J55. Este se utiliza en procesos de producción de pozos. Posee menores rangos operativos de elasticidad a comparación con el N80. De igual manera se emplea en procesos con profundidades someras.

Se utilizan estos dos tipos de tuberías ya que son las que se encuentran comúnmente en los completamientos de pozo. Posterior a la descripción de esta variable es necesario hablar de las profundidades que se consideraron para la elaboración de las corridas.

6.1.3 Profundidad. Para el caso de este trabajo de grado se toman las profundidades 5000ft, 8000ft y 10000ft respectivamente, todo esto con el fin de observar cómo influyen las cargas sobre los empaques.

6.1.4 Cantidad de empaques. El uso de empaques es proporcional las zonas en donde se desea inyectar. Como bien se sabe, los empaques tipo tándem sirven como empaques intermedios entre dos empaques hidráulicos con cuñas. Las simulaciones se hicieron utilizando 3 y 5 empaques dentro del completamiento. Para el caso de 3 empaques se posee la **Figura 44**.

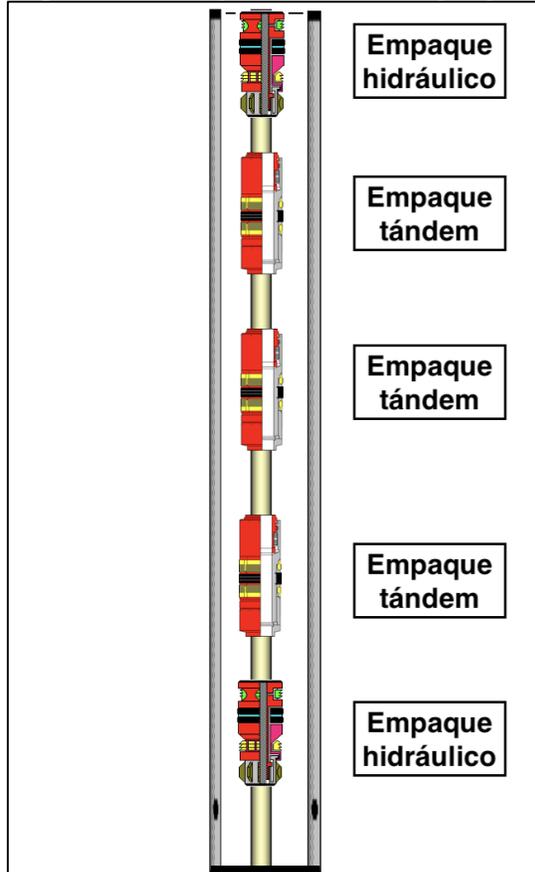
Figura 44. Esquema de 3 empaques.



Fuente: Elaboración propia. 2019.

Como se puede apreciar en la anterior figura. Se tiene como empaque intermedio el tipo tándem. A continuación, en la **Figura 45** se demuestra el tipo un completamiento con 5 empaques.

Figura 45. Esquema de 5 empaques



Fuente: Elaboración propia. 2019.

Para la realización con 5 empaques, se debe tener en cuenta que el primer y quinto empaque deben ser hidráulicos con cuñas, mientras que el segundo, tercero y cuarto empaque deben ser tipo tándem.

6.1.5 Espaciamiento entre empaques. Para ambos casos, tanto para 3, como para 5 empaques, se debe tener en cuenta la distancia entre herramientas, esto teniendo presentes todas las anteriores variables que se han expuesto. Para fines prácticos se establecieron los siguientes espaciamentos: 300 pies, 400 pies y finalmente 500 pies.

6.1.6 Presión de inyección. La presión de inyección en la tubería de producción es un factor totalmente imprescindible. No estipular este factor puede generar fallas en los empaques, al estos no ser capaces de soportar esfuerzos provenientes de cargas axiales o triaxiales. Por ende, es necesario fijar la presión de inyección junto con el caudal que se va a inyectar. Para mayor comodidad en este trabajo se seleccionaron presiones, de 1500 psi, 2500 psi y finalmente de 3500 psi. En la **Tabla 14** se tiene la relación de presión-caudal de inyección.

Cuadro 8. Relación de presión de inyección con caudal de inyección

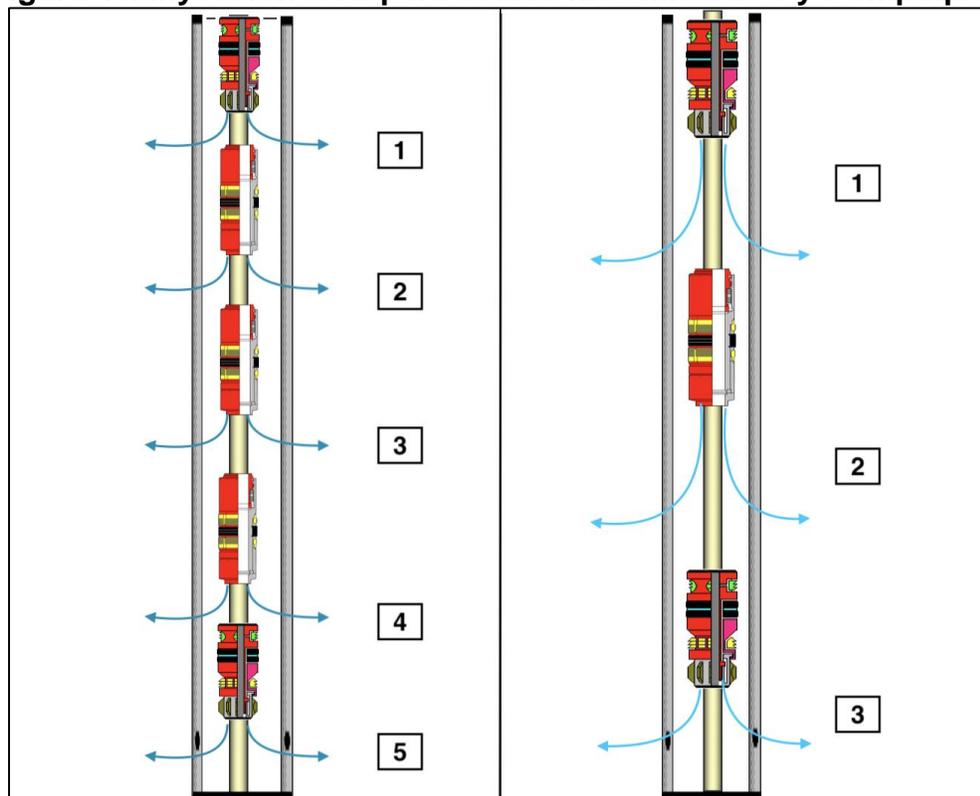
Operación	Presión	Caudal
Inyección de agua	1500 PSI	2000 BPD
Inyección de agua	2500 PSI	3000 BPD
Inyección de agua	3500 PSI	3000 BPD

Fuente: Elaboración propia. 2019

6.1.7 Tipo operación. Al igual que se hizo en el pozo tipo del capítulo 5, se debe establecer que tipos de operaciones se realizaran de manera que se logre ejecutar de manera eficaz el propósito de la sarta selectiva, inyectar a una zona en específico. Los tres esquemas de inyección que se emplearon fueron los siguientes: Inyección total, inyección par y finalmente inyección impar. Cada uno de ellos es especificado a continuación.

6.1.7.1 Inyección total. Hace referencia a una inyección mediante todas las zonas especificadas, la **Figura 46** tiene como objetivo aclarar las zonas en donde se desea realizar las inyecciones, tanto para 3 empaques, como para 5 empaques.

Figura 46. Inyección total para estado mecánico de 3 y 5 empaques

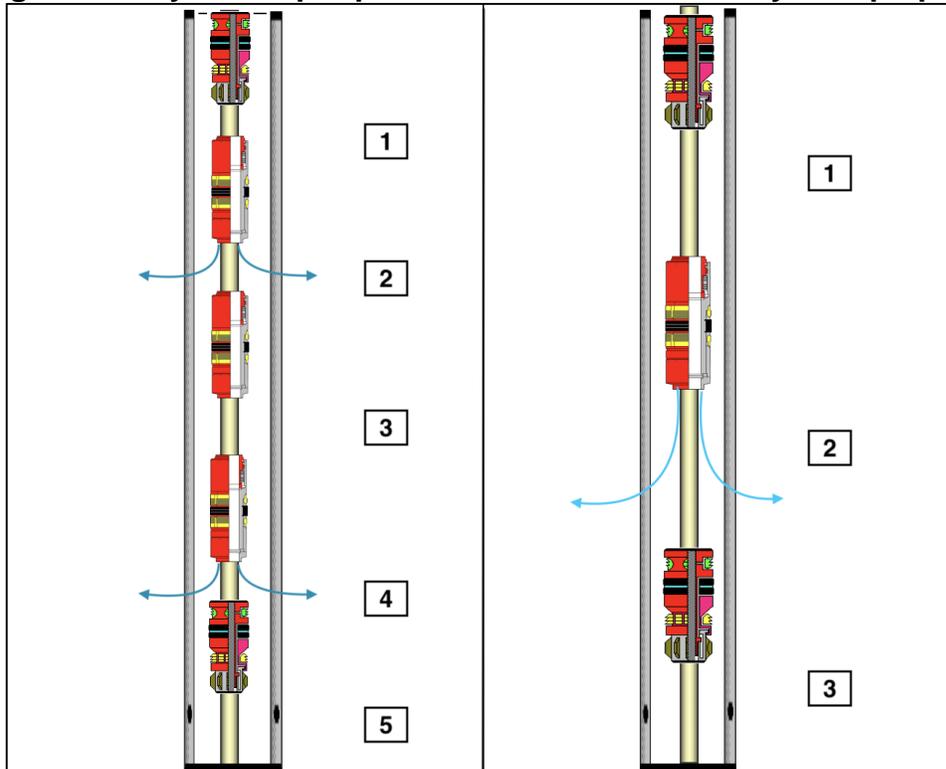


Fuente: Elaboración propia. 2019.

Como se puede apreciar, este tipo de operación no discrimina los sectores en los que se piensa inyectar a comparación de la operación impar.

6.1.7.2 Inyección par. En la inyección par se inyecta el fluido mediante las zonas pares del completamiento como se puede apreciar en la **Figura 47**, en la cual se contemplan inyectar tanto para 3 como para 5 empaques.

Figura 47. Inyección par para estado mecánico de 3 y 5 empaques

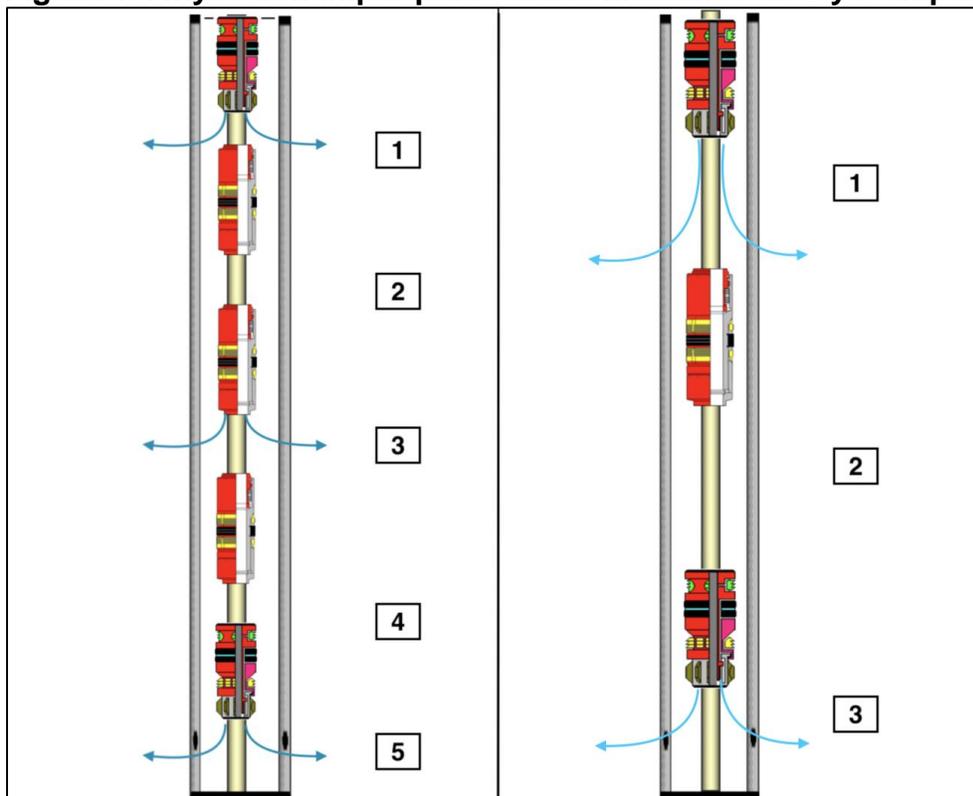


Fuente: Elaboración propia. 2019

Como se puede apreciar, en el caso de 5 empaques se seccionan las zonas a inyectar del 1 al 5, de mismo modo cuando se tienen 3 empaques, en ambos casos se puede apreciar como las zonas pares son las únicas en las que se piensa inyectar. Finalmente se muestra como es el concepto de inyección impar.

6.1.7.3 Inyección impar. Este último método consta de inyectar a las zonas impares, tanto para 3 como para 5 empaques, la **Figura 48** muestra las zonas en las que se inyecta para ambos casos.

Figura 48. Inyección impar para estado mecánico de 3 y 5 empaques



Fuente: Elaboración propia. 2019.

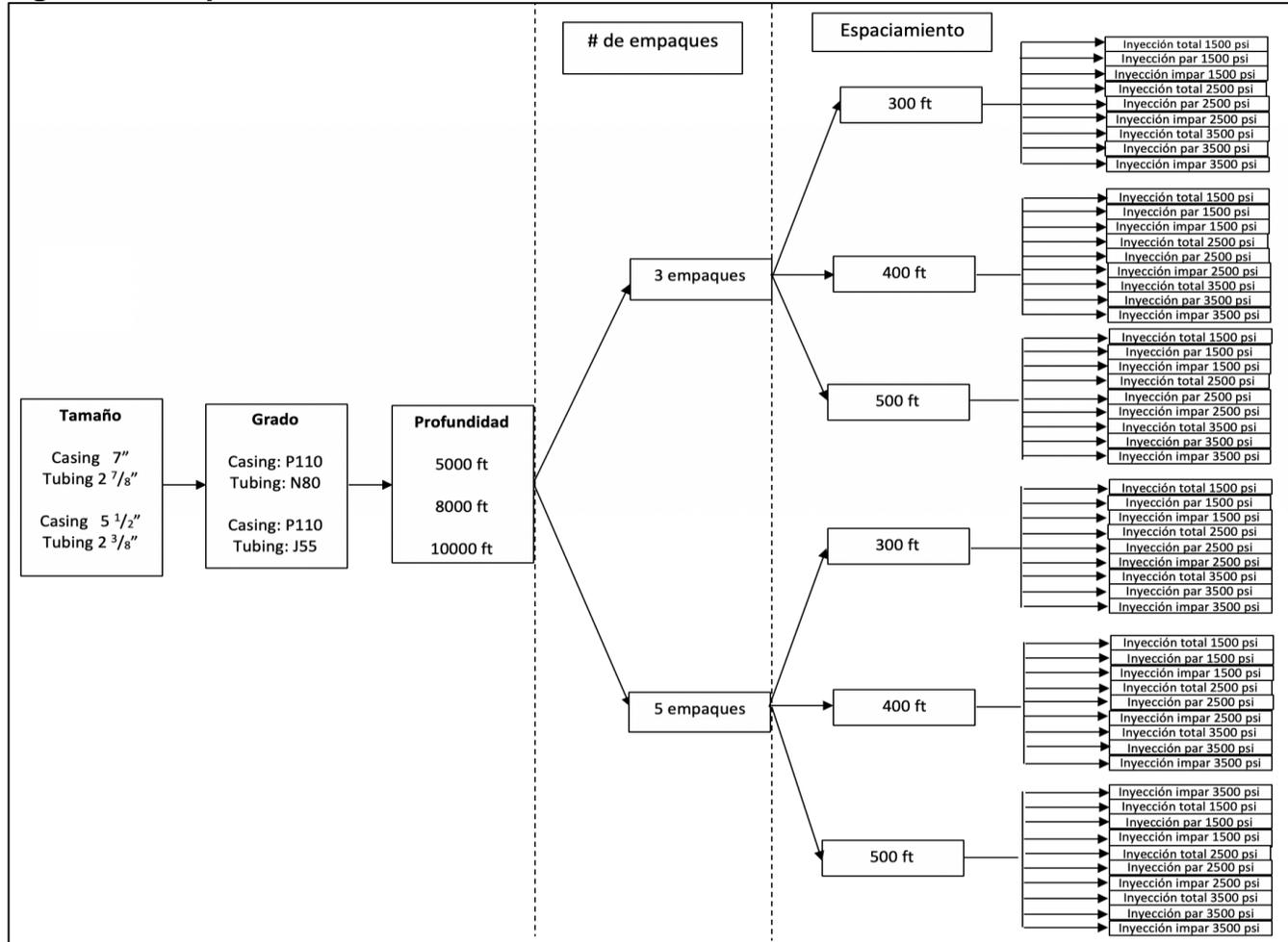
Como se puede apreciar, a comparación de la inyección total e inyección par, esta operación solo tiene en cuenta las zonas impares, las ultimas zonas tanto en 3 como 5 empaques poseen inyección cerca al tapón.

Finalmente, al haber explicado las 7 variables para definir todas las simulaciones, se hace el esquema de cómo se realizaron las simulaciones.

6.2 DIVISIÓN Y RESULTADOS DE LOS CASOS DE SIMULACIÓN

Al haber descrito todas las variables necesarias para elaborar los estados mecánicos de los pozos, se debe realizar una división esquemática de manera que se ilustre clara y organizadamente la información de los casos establecidos. Para ello se cambia una sola de las variables y las otras permanecen constantes, esto con el fin de no repetir los casos y así obtener una muestra representativa que logre brindar resultados óptimos. Para ello se fija un orden según el tamaño de las tuberías, grado de las tuberías, profundidad, numero de empaques, espaciamento y finalmente presión de inyección junto con el tipo de operación. En la **Figura 49** se puede observar detalladamente como se seccionaron todos los casos con las posibilidades de variables planteadas.

Figura 49. Esquema de simulaciones

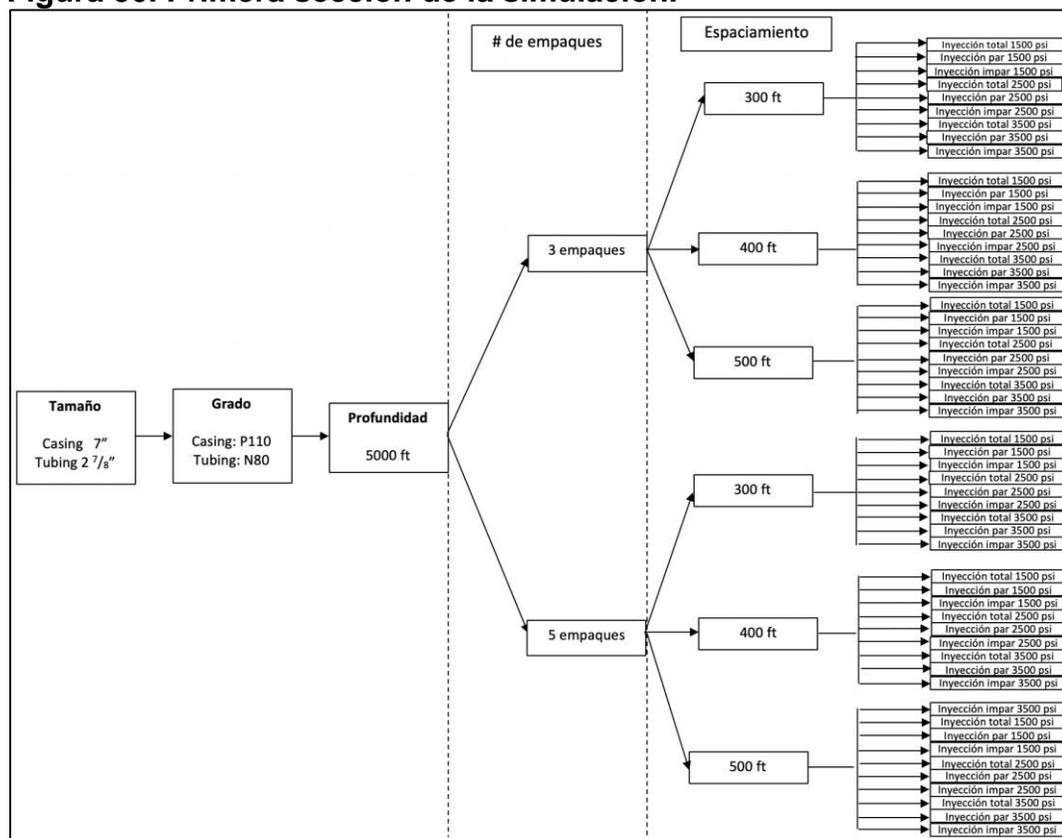


Fuente: Elaboración propia. 2019

Retomando la información de la **Figura 49**, se tienen un total de 648 casos los cuales se evaluarán más adelante. Como bien se hizo en el pozo tipo, se tendrán en cuenta los datos de salida del programa Wellcat™ de análisis de esfuerzos en los empaques. Posterior a estos datos se hace la debida corrección con el modelo PTA de tal manera que se pueda observar si los empaques tándem sirven o no dependiendo de las condiciones de operación a la que se aplicaron. Para ello se debe tener en cuenta que Ecopetrol S.A. maneja unos valores específicos de factores de diseño. Estos se pueden contemplar en la **Tabla 7**. Teniendo en cuenta esto, se organizan los casos de la siguiente manera:

6.2.1 Primera sección. Para la primera sección se tiene un OD de 7" en el casing, 2 7/8" de tubing, grado de tubería del casing P110, tubing N80, a una profundidad de 5000 ft. n la **Figura 50** se puede apreciar el esquema realizado.

Figura 50. Primera sección de la simulación.



Fuente: Elaboración propia. 2019

Como se puede apreciar, existen un total de 54 casos en esta sección, a continuación, se presentan los datos obtenidos en las simulaciones y posterior a esto serán corregidos con el modelo PTA. Los resultados obtenidos se dividen en 3 empaques y 5 empaques. en la **Tabla 7** se puede apreciar los resultados obtenidos.

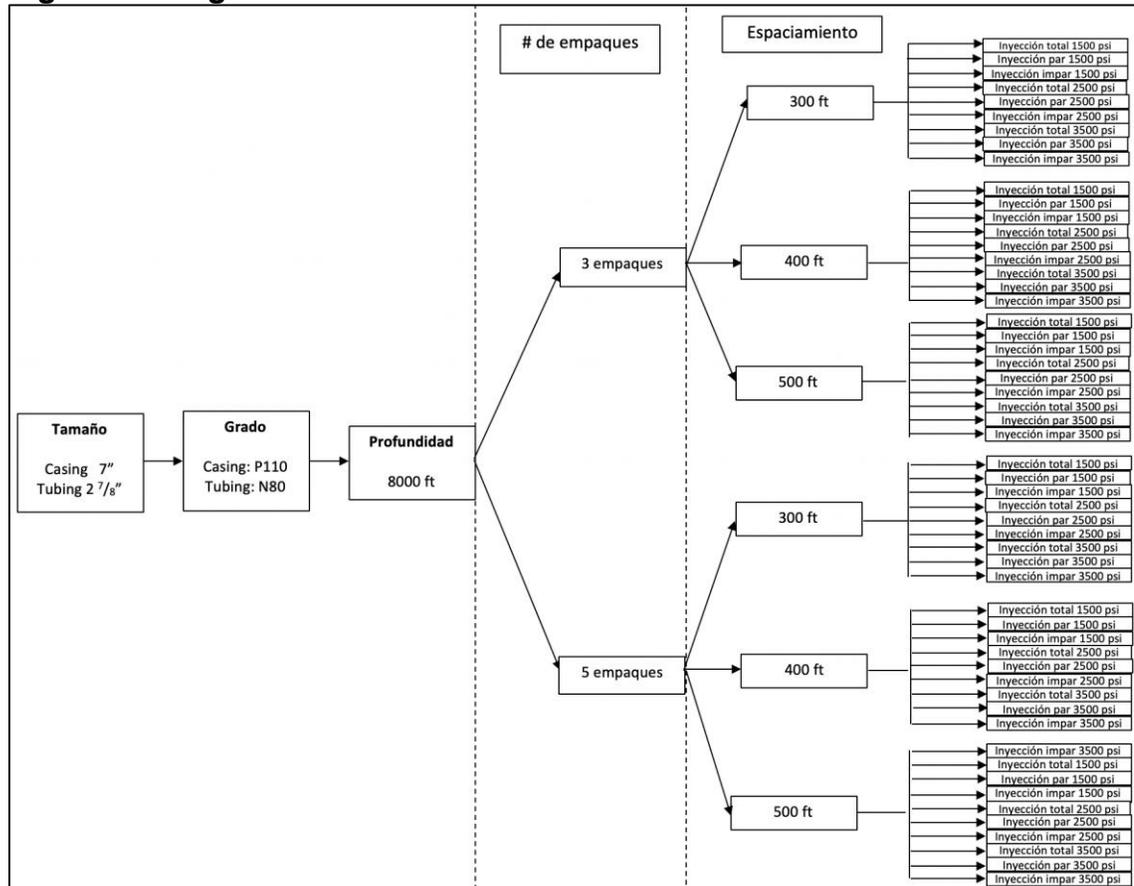
Tabla 7. Resultados primera sección

Tamaño	Grado	Profundidad	# de empaques	Espaciamiento	Operación	Carga axial		Triaxial		Estallido Encima		colapso Encima	
						Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo
Tubing 2 7/8"	N80	5000 ft	3	300 ft	Inyección total 1500 psi	1,37	100,00	1,29	2,84	117410,63	NO HAY	NO HAY	21,96
					Inyección par 1500 psi	3,09	100,00	3,08	2,84	3,69	NO HAY	NO HAY	21,96
					Inyección impar 1500 psi	2,97	115,68	2,99	3,68	3,69	3,22	NO HAY	NO HAY
					Inyección total 2500 psi	1,96	100,00	2,00	3,20	7,22	62,28	NO HAY	NO HAY
					Inyección par 2500 psi	3,11	100,00	3,12	3,20	3,80	62,28	NO HAY	NO HAY
					Inyección impar 2500 psi	1,96	5,88	2,00	4,30	7,22	3,80	NO HAY	NO HAY
					Inyección total 3500 psi	1,42	100,00	1,34	3,14	132086,96	NO HAY	NO HAY	23,13
					Inyección par 3500 psi	3,14	100,00	3,16	3,14	3,92	NO HAY	NO HAY	23,13
					Inyección impar 3500 psi	1,42	5,80	1,34	4,38	132086,96	3,92	NO HAY	NO HAY
					Inyección total 1500 psi	1,13	100,00	1,06	1,98	117410,63	NO HAY	NO HAY	17,11
					Inyección par 1500 psi	2,90	100,00	2,67	1,98	2,76	4594,33	NO HAY	NO HAY
					Inyección impar 1500 psi	1,13	5,26	1,06	3,27	117410,63	2,76	NO HAY	NO HAY
				Inyección total 2500 psi	1,14	100,00	1,08	2,05	117410,63	NO HAY	NO HAY	17,45	
				Inyección par 2500 psi	2,92	100,00	2,71	2,05	2,83	NO HAY	NO HAY	14,10	
				Inyección impar 2500 psi	1,14	5,20	1,08	3,33	117410,63	2,83	NO HAY	NO HAY	
				Inyección total 3500 psi	1,16	100,00	1,09	2,12	132086,96	NO HAY	NO HAY	17,79	
				Inyección par 3500 psi	2,94	100,00	2,75	2,12	2,89	NO HAY	NO HAY	17,79	
				Inyección impar 3500 psi	0,98	100,00	0,89	1,64	NO HAY	NO HAY	-0,33	6,84	
				Inyección total 1500 psi	0,95	100,00	0,90	1,49	132086,96	NO HAY	NO HAY	13,88	
				Inyección par 1500 psi	2,74	100,00	2,31	1,49	2,19	NO HAY	NO HAY	13,88	
				Inyección impar 1500 psi	0,95	4,77	0,90	2,64	132086,96	2,19	NO HAY	NO HAY	
				Inyección total 2500 psi	0,96	100,00	0,91	1,53	132086,96	NO HAY	NO HAY	14,10	
				Inyección par 2500 psi	2,76	100,00	2,34	1,53	2,23	NO HAY	NO HAY	14,10	
				Inyección impar 2500 psi	0,96	4,72	0,91	2,68	132086,96	2,23	NO HAY	NO HAY	
				Inyección total 3500 psi	0,98	100,00	0,92	1,57	117410,63	NO HAY	NO HAY	14,33	
				Inyección par 3500 psi	2,78	100,00	2,38	1,57	2,27	NO HAY	NO HAY	14,33	
				Inyección impar 3500 psi	0,98	100,00	0,92	1,57	117410,63	NO HAY	NO HAY	14,33	
				300 ft	Inyección total 1500 psi	1,44	100,00	1,36	3,28	132086,96	NO HAY	NO HAY	23,76
					Inyección par 1500 psi	1,40	100,00	1,33	3,04	132086,96	NO HAY	NO HAY	22,83
					Inyección impar 1500 psi	1,37	100,00	1,29	2,84	70446,38	NO HAY	NO HAY	21,96
					Inyección total 2500 psi	3,09	100,00	3,14	3,28	4,04	NO HAY	NO HAY	23,76
					Inyección par 2500 psi	1,40	5,95	1,33	4,36	132086,96	3,86	NO HAY	NO HAY
					Inyección impar 2500 psi	3,09	100,00	3,08	2,84	3,69	NO HAY	NO HAY	21,96
					Inyección total 3500 psi	1,44	5,94	1,36	4,51	132086,96	4,04	NO HAY	NO HAY
					Inyección par 3500 psi	3,09	100,00	3,11	3,04	3,86	NO HAY	NO HAY	22,83
					Inyección impar 3500 psi	1,37	5,96	1,29	4,22	70446,38	3,69	NO HAY	NO HAY
			Inyección total 1500 psi		1,17	100,00	1,11	2,18	150956,52	NO HAY	NO HAY	18,15	
			Inyección par 1500 psi		1,15	100,00	1,08	2,07	176115,94	NO HAY	NO HAY	17,62	
			Inyección impar 1500 psi		1,13	100,00	1,06	1,98	176115,94	150956,52	NO HAY	NO HAY	
			Inyección total 2500 psi		2,90	100,00	2,75	2,18	2,96	NO HAY	NO HAY	18,15	
			Inyección par 2500 psi		1,15	5,26	1,08	3,37	176115,94	2,86	NO HAY	NO HAY	
			Inyección impar 2500 psi		2,90	100,00	2,67	1,98	2,76	150956,52	2,23	NO HAY	
			Inyección total 3500 psi		1,17	5,27	1,11	3,46	150956,52	2,96	NO HAY	NO HAY	
			Inyección par 3500 psi		2,90	100,00	2,71	2,07	2,86	NO HAY	NO HAY	17,62	
			Inyección impar 3500 psi		1,13	5,26	1,06	3,27	176115,94	2,76	NO HAY	NO HAY	
			Inyección total 1500 psi		0,99	100,00	0,93	1,60	117410,63	NO HAY	NO HAY	14,56	
			Inyección par 1500 psi		0,97	100,00	0,91	1,55	132086,96	NO HAY	NO HAY	14,21	
			Inyección impar 1500 psi		0,95	100,00	0,89	1,49	132086,96	NO HAY	NO HAY	13,88	
			Inyección total 2500 psi		2,74	100,00	2,39	1,60	2,31	NO HAY	NO HAY	14,56	
			Inyección par 2500 psi		0,97	4,77	0,91	2,70	132086,96	2,25	NO HAY	NO HAY	
			Inyección impar 2500 psi		2,74	100,00	2,32	1,49	2,19	NO HAY	NO HAY	13,88	
			Inyección total 3500 psi		0,99	4,78	0,93	2,77	117410,63	2,31	NO HAY	NO HAY	
			Inyección par 3500 psi		2,74	100,00	2,35	1,55	2,25	NO HAY	NO HAY	14,21	
			Inyección impar 3500 psi		0,95	4,77	0,89	2,64	132086,96	2,19	NO HAY	NO HAY	
			400 ft		Inyección total 1500 psi	1,49	100,00	1,42	3,67	NO HAY	NO HAY	12,05	25,13
					Inyección par 1500 psi	1,44	100,00	1,36	3,29	117410,63	NO HAY	NO HAY	23,76
					Inyección impar 1500 psi	1,39	100,00	1,32	2,98	117410,63	NO HAY	NO HAY	22,53
					Inyección total 2500 psi	3,11	100,00	3,20	3,67	4,32	NO HAY	NO HAY	25,13
					Inyección par 2500 psi	1,44	5,87	1,36	4,49	117410,63	4,04	NO HAY	NO HAY
					Inyección impar 2500 psi	3,11	100,00	3,12	2,98	3,80	NO HAY	NO HAY	22,53
					Inyección total 3500 psi	1,49	5,86	1,42	4,69	NO HAY	4,32	12,05	NO HAY
					Inyección par 3500 psi	3,11	100,00	3,16	3,29	4,04	NO HAY	NO HAY	23,76
					Inyección impar 3500 psi	1,39	5,88	1,32	4,30	117410,63	3,80	NO HAY	NO HAY
				Inyección total 1500 psi	1,21	100,00	1,14	2,34	132086,96	NO HAY	NO HAY	18,92	
				Inyección par 1500 psi	1,17	100,00	1,11	2,18	132086,96	NO HAY	NO HAY	18,15	
				Inyección impar 1500 psi	1,14	100,00	1,08	2,05	117410,63	NO HAY	NO HAY	17,45	
				Inyección total 2500 psi	2,92	100,00	2,81	2,34	3,10	NO HAY	NO HAY	18,92	
				Inyección par 2500 psi	1,17	5,20	1,11	3,46	132086,96	2,96	NO HAY	NO HAY	
				Inyección impar 2500 psi	2,92	100,00	2,71	2,05	2,83	NO HAY	NO HAY	17,45	
				Inyección total 3500 psi	1,21	5,21	1,14	3,59	132086,96	3,10	NO HAY	NO HAY	
				Inyección par 3500 psi	2,92	100,00	2,76	2,18	2,96	NO HAY	NO HAY	18,15	
				Inyección impar 3500 psi	1,14	5,20	1,08	3,33	117410,63	2,83	NO HAY	NO HAY	
				Inyección total 1500 psi	1,01	100,00	0,95	1,69	132086,96	NO HAY	NO HAY	15,05	
				Inyección par 1500 psi	0,99	100,00	0,93	1,61	132086,96	NO HAY	NO HAY	14,56	
				Inyección impar 1500 psi	0,96	100,00	0,91	1,53	117410,63	NO HAY	NO HAY	14,10	
				Inyección total 2500 psi	2,77	100,00	2,44	1,69	2,39	NO HAY	NO HAY	15,05	
				Inyección par 2500 psi	0,99	4,72	0,93	2,76	132086,96	2,31	NO HAY	NO HAY	
				Inyección impar 2500 psi	2,76	100,00	2,34	1,53	2,23	NO HAY	NO HAY	14,10	
				Inyección total 3500 psi	1,01	4,73	0,95	2,85	132086,96	2,39	NO HAY	NO HAY	
				Inyección par 3500 psi	2,76	100,00	2,39	1,61	2,31	NO HAY	NO HAY	14,56	
				Inyección impar 3500 psi	0,96	4,72	0,91	2,68	117410,63	2,23	NO HAY	NO HAY	
				500 ft	Inyección total 1500 psi	1,55	100,00	1,47	4,17	117410,63	NO HAY	NO HAY	26,67
					Inyección par 1500 psi	1,48	100,00	1,41	3,58	132086,96	NO HAY	NO HAY	24,77
					Inyección impar 1500 psi	1,42	100,00	1,34	3,14	117410,63	NO HAY	NO HAY	23,13
					Inyección total 2500 psi	3,14	100,00	3,25	4,17	4,65	NO HAY	NO HAY	26,67
					Inyección par 2500 psi	1,48	5,79	1,41	4,62	132086,96	4,25	NO HAY	NO HAY
					Inyección impar 2500 psi	3,14	100,00	3,16	3,14	3,92	NO HAY	NO HAY	23,13
					Inyección total 3500 psi	1,55	5,79	1,47	4,87	117410,63	4,65	NO HAY	NO HAY
					Inyección par 3500 psi	3,14	100,00	3,21	3,58	4,25	NO HAY	NO HAY	24,77
					Inyección impar 3500 psi	1,42	5,81	1,34	4,38	117410,63	3,92	NO HAY	NO HAY
			Inyección total 1500 psi		1,25	100,00	1,13	2,68	NO HAY	NO HAY	2,57	8,04	
			Inyección par 1500 psi		1,20	100,00	1,09	2,44	NO HAY	NO HAY	2,19	7,89	
			Inyección impar 1500 psi		1,16	100,00	1,06	2,24	NO HAY	NO HAY	1,82	7,74	
			Inyección total 2500 psi		2,95	100,00	3,09	2,68	4,65	NO HAY	NO HAY	8,04	
			Inyección par 2500 psi		1,20	5,15	1,09	4,40	NO HAY	4,25	2,19	NO HAY	
			Inyección impar 2500 psi		2,94	100,00	3,00	2,24	3,92	NO HAY	NO HAY	7,74	
			Inyección total 3500 psi		1,25	5,16	1,13	4,61	NO HAY	4,65	2,57	NO HAY	
			Inyección par 3500 psi		2,94	100,00	3,05	2,44	4,25	NO HAY	NO HAY	7,89	
			Inyección impar 3500 psi		1,16	5,14	1,06	4,20	NO HAY	3,92	1,82	NO HAY	
			Inyección total 1500 psi		1,04	100,00	0,98	1,78	117410,63	NO HAY	NO HAY	15,58	
			Inyección par 1500 psi		1,01	100,00	0,95	1,67	117410,63	1056695,65	NO HAY	NO HAY	
			Inyección impar 1500 psi		0,98	100,00	0,92	1,57	132086,96	NO HAY	NO HAY	14,33	
			Inyección total 2500 psi		2,79	100,00	2,50	1,78	2,49	NO HAY	NO HAY	15,58	
			Inyección par 2500 psi		1,01	4,68	0,95	2,83	117410,63	2,37	NO HAY	NO HAY	
			Inyección impar 2500 psi		2,78	100,00	2,38	1,57	2,27	NO HAY	NO HAY	14,33	
			Inyección total 3500 psi		1,04	4,69	0,98	2,95	117410,63	2,49	NO HAY	NO HAY	
			Inyección par 3500 psi		2,78	100,00	2,44	1,67	2,37	1056695,65	NO HAY	NO HAY	
			Inyección impar 3500 psi		0,98	4,67	0,92	2,72	132086,96	2,27	NO HAY	NO HAY	

Fuente: Elaboración propia. 2019.

6.2.2 Segunda sección. Para la segunda sección se tiene un OD de 7" en el casing, 2 7/8" de tubing, grado de tubería del casing P110, tubing N80. En la **Figura 51** se puede apreciar el esquema realizado.

Figura 51. Segunda sección de la simulación



Fuente: Elaboración propia. 2019.

A continuación, se encuentran los datos obtenidos en la **Tabla 8**, estos hacen referencia a todas las cargas. A comparación de la anterior sección, se cambió la profundidad a 8000 ft.

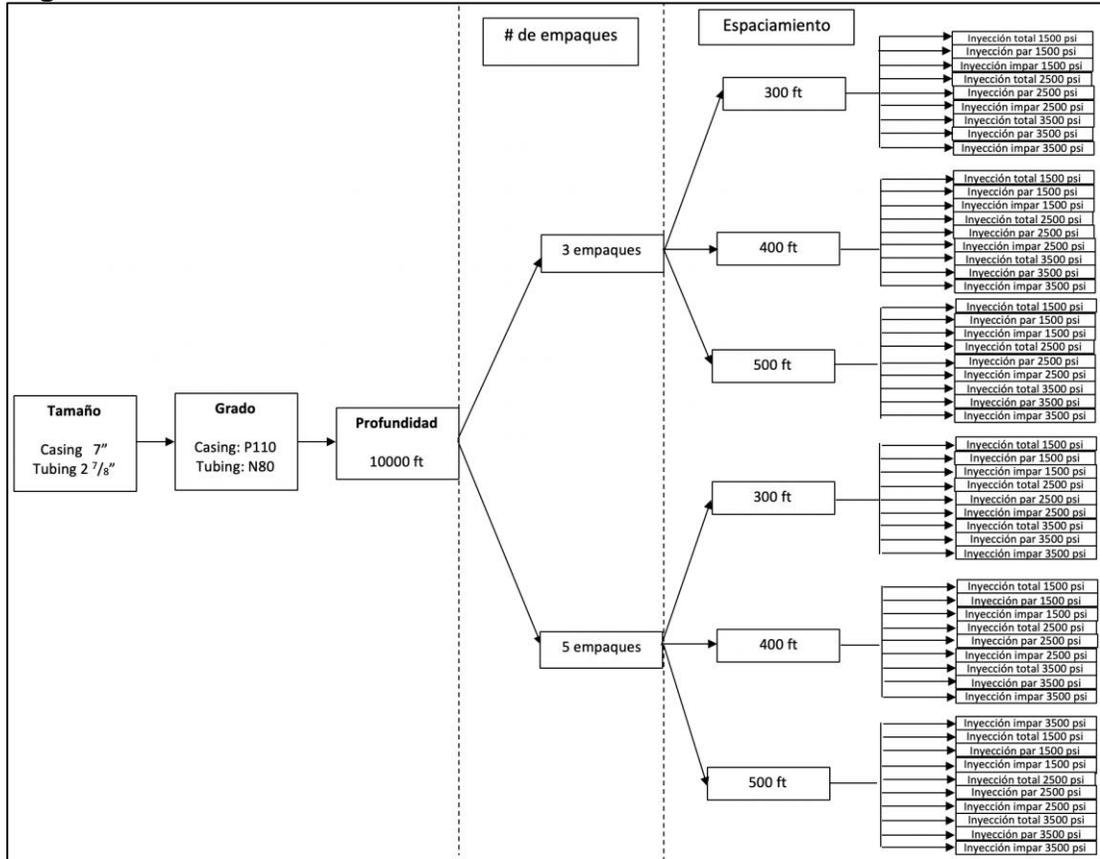
Tabla 8. Resultados segunda sección.

Tamaño	Grado	Profundidad	# de empaques	Espaciamiento	Operación	Carga axial		Triaxial		Estallido Encima		Colapso Encima	
						Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo
Tubing 2 7/8"	N80	8000 ft	3	300 ft	Inyección total 1500 psi	1.00	100.00	0.95	1.99	132086.96	NO HAY	NO HAY	15.92
					Inyección par 1500 psi	2.45	100.00	2.35	1.99	2.55	NO HAY	NO HAY	15.92
					Inyección impar 1500 psi	1.00	3.98	0.95	2.90	132086.96	2.55	NO HAY	NO HAY
					Inyección total 2500 psi	0.87	100.00	0.82	1.55	132086.96	NO HAY	FALLA	FALLA
					Inyección par 2500 psi	2.20	100.00	2.08	1.55	2.08	NO HAY	FALLA	FALLA
					Inyección impar 2500 psi	0.87	3.57	0.82	2.43	132086.96	2.08	FALLA	FALLA
					Inyección total 3500 psi	0.76	100.00	0.71	1.24	132086.96	NO HAY	FALLA	FALLA
					Inyección par 3500 psi	2.20	100.00	1.85	1.24	1.74	NO HAY	NO HAY	11.24
					Inyección impar 3500 psi	0.76	3.34	0.71	2.07	132086.96	1.74	FALLA	FALLA
					Inyección total 1500 psi	1.02	100.00	0.96	2.06	132086.96	NO HAY	NO HAY	16.22
				Inyección par 1500 psi	2.46	100.00	2.37	2.06	2.60	NO HAY	NO HAY	16.22	
				Inyección impar 1500 psi	1.02	3.94	0.96	2.94	132086.96	2.60	NO HAY	NO HAY	
				Inyección total 2500 psi	0.88	100.00	0.83	1.60	132086.96	NO HAY	NO HAY	13.48	
				Inyección par 2500 psi	2.31	100.00	2.10	1.60	2.12	NO HAY	NO HAY	13.48	
				Inyección impar 2500 psi	0.88	3.54	0.83	2.46	132086.96	2.12	NO HAY	NO HAY	
				Inyección total 3500 psi	0.77	100.00	0.72	1.26	117410.63	NO HAY	FALLA	FALLA	
				Inyección par 3500 psi	2.21	100.00	1.87	1.26	1.76	NO HAY	NO HAY	11.39	
				Inyección impar 3500 psi	0.77	3.31	0.72	2.09	117410.63	1.76	FALLA	FALLA	
				Inyección total 1500 psi	1.03	100.00	0.97	2.14	117410.63	NO HAY	NO HAY	16.53	
				Inyección par 1500 psi	2.47	100.00	2.39	2.14	2.66	NO HAY	NO HAY	16.53	
				Inyección impar 1500 psi	1.03	3.90	0.97	2.97	117410.63	2.66	NO HAY	NO HAY	
				Inyección total 2500 psi	0.89	100.00	0.84	1.64	132086.96	NO HAY	NO HAY	13.69	
				Inyección par 2500 psi	2.32	100.00	2.12	1.64	2.16	NO HAY	NO HAY	13.69	
				Inyección impar 2500 psi	0.89	3.51	0.84	2.48	132086.96	2.16	NO HAY	NO HAY	
				Inyección total 3500 psi	0.77	100.00	0.73	1.29	132086.96	NO HAY	FALLA	FALLA	
				Inyección par 3500 psi	2.22	100.00	1.89	1.29	1.79	NO HAY	NO HAY	11.54	
				Inyección impar 3500 psi	0.77	3.29	0.73	2.11	132086.96	1.79	FALLA	FALLA	
				Inyección total 1500 psi	1.00	100.00	0.95	2.10	132086.96	NO HAY	NO HAY	16.38	
				Inyección par 1500 psi	1.02	100.00	0.97	1.99	105.59	NO HAY	NO HAY	15.92	
				Inyección impar 1500 psi	1.00	3.96	0.95	2.96	132086.96	2.63	NO HAY	NO HAY	
			Inyección total 2500 psi	0.86	100.00	0.81	1.61	105.59	NO HAY	NO HAY	16.85		
			Inyección par 2500 psi	2.34	100.00	2.32	2.30	2.72	NO HAY	NO HAY	16.85		
			Inyección impar 2500 psi	1.00	3.96	0.95	2.96	132086.96	2.63	NO HAY	NO HAY		
			Inyección total 3500 psi	0.86	100.00	0.81	1.61	105.59	NO HAY	NO HAY	16.85		
			Inyección par 3500 psi	2.34	100.00	2.32	2.30	2.72	NO HAY	NO HAY	16.85		
			Inyección impar 3500 psi	1.00	3.96	0.95	2.96	132086.96	2.63	NO HAY	NO HAY		
			Inyección total 1500 psi	1.02	100.00	0.97	2.10	117410.63	2.22	NO HAY	NO HAY		
			Inyección par 1500 psi	1.02	3.68	0.97	2.96	117410.63	2.22	NO HAY	NO HAY		
			Inyección impar 1500 psi	1.02	3.98	0.97	2.90	105.59	2.55	NO HAY	NO HAY		
			Inyección total 2500 psi	0.88	100.00	0.83	1.73	117410.63	NO HAY	NO HAY	13.90		
			Inyección par 2500 psi	0.86	100.00	0.82	1.61	132086.96	NO HAY	FALLA	FALLA		
			Inyección impar 2500 psi	0.87	100.00	0.82	1.56	132086.96	NO HAY	FALLA	FALLA		
			Inyección total 3500 psi	2.20	100.00	2.07	1.73	2.19	NO HAY	NO HAY	13.90		
			Inyección par 3500 psi	0.86	3.56	0.82	2.48	132086.96	2.14	FALLA	FALLA		
			Inyección impar 3500 psi	2.30	100.00	2.08	1.56	2.08	NO HAY	NO HAY	13.28		
			Inyección total 1500 psi	0.88	3.35	0.83	2.48	117410.63	2.19	NO HAY	NO HAY		
			Inyección par 1500 psi	2.20	100.00	2.05	1.61	2.14	NO HAY	NO HAY	13.59		
			Inyección impar 1500 psi	0.87	3.57	0.82	2.43	132086.96	2.08	FALLA	FALLA		
			Inyección total 2500 psi	0.77	100.00	0.72	1.35	117410.63	NO HAY	FALLA	FALLA		
			Inyección par 2500 psi	0.76	100.00	0.71	1.27	117410.63	NO HAY	FALLA	FALLA		
			Inyección impar 2500 psi	0.76	100.00	0.71	1.24	117410.63	NO HAY	FALLA	FALLA		
			Inyección total 3500 psi	2.11	100.00	1.86	1.35	1.81	NO HAY	NO HAY	11.69		
			Inyección par 3500 psi	0.76	3.33	0.71	2.10	117410.63	1.77	FALLA	FALLA		
			Inyección impar 3500 psi	2.20	100.00	1.85	1.24	1.74	NO HAY	NO HAY	11.24		
			Inyección total 1500 psi	0.77	3.14	0.72	2.12	117410.63	1.81	FALLA	FALLA		
			Inyección par 1500 psi	2.11	100.00	1.84	1.27	1.77	NO HAY	NO HAY	11.46		
			Inyección impar 1500 psi	0.76	3.34	0.71	2.07	117410.63	1.74	FALLA	FALLA		
			Inyección total 2500 psi	1.04	100.00	0.99	2.49	352231.88	NO HAY	NO HAY	17.53		
			Inyección par 2500 psi	1.02	100.00	0.97	2.21	117410.63	NO HAY	NO HAY	16.85		
			Inyección impar 2500 psi	1.02	100.00	0.96	2.06	132086.96	NO HAY	NO HAY	16.22		
			Inyección total 3500 psi	2.34	100.00	2.32	2.21	2.72	NO HAY	NO HAY	16.85		
			Inyección par 3500 psi	1.02	3.94	0.96	2.94	132086.96	2.60	NO HAY	NO HAY		
			Inyección impar 3500 psi	0.90	100.00	0.85	1.83	132086.96	NO HAY	NO HAY	14.35		
			Inyección total 1500 psi	0.88	100.00	0.83	1.68	132086.96	NO HAY	NO HAY	13.90		
			Inyección par 1500 psi	0.88	100.00	0.83	1.60	132086.96	NO HAY	NO HAY	13.48		
			Inyección impar 1500 psi	2.21	100.00	2.10	1.83	2.27	NO HAY	NO HAY	14.35		
			Inyección total 2500 psi	0.88	3.53	0.83	2.52	132086.96	2.19	NO HAY	NO HAY		
			Inyección par 2500 psi	2.31	100.00	2.10	1.60	2.12	NO HAY	NO HAY	13.48		
			Inyección impar 2500 psi	0.90	3.31	0.85	2.54	132086.96	2.27	NO HAY	NO HAY		
			Inyección total 3500 psi	2.21	100.00	2.08	1.68	2.19	NO HAY	NO HAY	13.90		
			Inyección par 3500 psi	0.88	3.54	0.83	2.46	132086.96	2.12	NO HAY	NO HAY		
			Inyección impar 3500 psi	0.78	100.00	0.74	1.41	132086.96	NO HAY	FALLA	FALLA		
			Inyección total 1500 psi	0.77	100.00	0.72	1.32	132086.96	NO HAY	FALLA	FALLA		
			Inyección par 1500 psi	0.77	100.00	0.72	1.26	117410.63	NO HAY	FALLA	FALLA		
			Inyección impar 1500 psi	2.11	100.00	1.89	1.41	1.87	NO HAY	NO HAY	12.00		
			Inyección total 2500 psi	0.77	3.31	0.72	2.14	132086.96	1.81	FALLA	FALLA		
			Inyección par 2500 psi	2.21	100.00	1.87	1.26	1.76	NO HAY	NO HAY	11.39		
			Inyección impar 2500 psi	0.78	3.11	0.74	2.16	132086.96	1.87	FALLA	FALLA		
			Inyección total 3500 psi	2.12	100.00	1.86	1.32	1.81	NO HAY	NO HAY	11.69		
			Inyección par 3500 psi	0.77	3.31	0.72	2.09	117410.63	1.76	FALLA	FALLA		
			Inyección impar 3500 psi	1.07	100.00	1.02	2.73	132086.96	NO HAY	NO HAY	18.27		
			Inyección total 1500 psi	1.04	100.00	0.99	2.35	117410.63	NO HAY	NO HAY	17.36		
			Inyección par 1500 psi	1.03	100.00	0.97	2.14	132086.96	NO HAY	NO HAY	16.53		
			Inyección impar 1500 psi	2.34	100.00	2.37	2.73	2.98	NO HAY	NO HAY	18.27		
			Inyección total 2500 psi	1.04	3.87	0.99	3.08	117410.63	2.81	NO HAY	NO HAY		
			Inyección par 2500 psi	2.47	100.00	2.39	2.14	2.66	NO HAY	NO HAY	16.53		
			Inyección impar 2500 psi	1.07	3.57	1.02	3.08	132086.96	2.98	NO HAY	NO HAY		
			Inyección total 3500 psi	2.35	100.00	2.35	2.35	2.81	NO HAY	NO HAY	17.36		
			Inyección par 3500 psi	1.03	3.90	0.97	2.97	132086.96	2.66	NO HAY	NO HAY		
			Inyección impar 3500 psi	0.92	100.00	0.87	1.95	132086.96	NO HAY	NO HAY	14.83		
			Inyección total 1500 psi	0.89	100.00	0.84	1.75	132086.96	NO HAY	NO HAY	14.24		
			Inyección par 1500 psi	0.89	100.00	0.84	1.64	117410.63	NO HAY	NO HAY	13.69		
			Inyección impar 1500 psi	2.21	100.00	2.13	1.95	2.36	NO HAY	NO HAY	14.83		
			Inyección total 2500 psi	0.89	3.50	0.84	2.56	132086.96	2.25	NO HAY	NO HAY		
			Inyección par 2500 psi	2.32	100.00	2.12	1.64	2.16	NO HAY	NO HAY	13.69		
			Inyección impar 2500 psi	0.92	3.27	0.87	2.59	132086.96	2.36	NO HAY	NO HAY		
			Inyección total 3500 psi	2.21	100.00	2.10	1.75	2.25	NO HAY	NO HAY	14.24		
			Inyección par 3500 psi	0.89	3.51	0.84	2.48	117410.63	2.16	NO HAY	NO HAY		
			Inyección impar 3500 psi	0.80	100.00	0.75	1.48	132086.96	NO HAY	FALLA	FALLA		
			Inyección total 1500 psi	0.78	100.00	0.74	1.36	132086.96	NO HAY	FALLA	FALLA		
Inyección par 1500 psi	0.77	100.00	0.73	1.29	117410.63	NO HAY	FALLA	FALLA					
Inyección impar 1500 psi	2.12	100.00	1.92	1.48	1.92	NO HAY	NO HAY	12.34					
Inyección total 2500 psi	0.78	3.28	0.74	2.17	132086.96	1.85	FALLA	FALLA					
Inyección par 2500 psi	2.22	100.00	1.89	1.29	1.79	NO HAY	NO HAY	11.54					
Inyección impar 2500 psi	0.80	3.08	0.75	2.21	132086.96	1.92	FALLA	FALLA					
Inyección total 3500 psi	2.12	100.00	1.88	1.36	1.85	NO HAY	NO HAY	11.92					
Inyección par 3500 psi	0.77	3.29	0.73	2.11	117410.63	1.79	FALLA	FALLA					

Fuente: Elaboración propia. 2019.

6.2.3 Tercera sección. Para la tercera sección se tiene un OD de 7" en el casing, 2 7/8" de tubing, grado de tubería del casing P110, tubing N80, a una profundidad. En la **Figura 52** se puede apreciar el esquema realizado.

Figura 52. tercera sección de la simulación



Fuente: Elaboración propia. 2019.

A continuación, se tienen los datos obtenidos en la **Tabla 9**, estos hacen referencia a todas las cargas. A comparación de la anterior sección, se cambió la profundidad a 10000 ft.

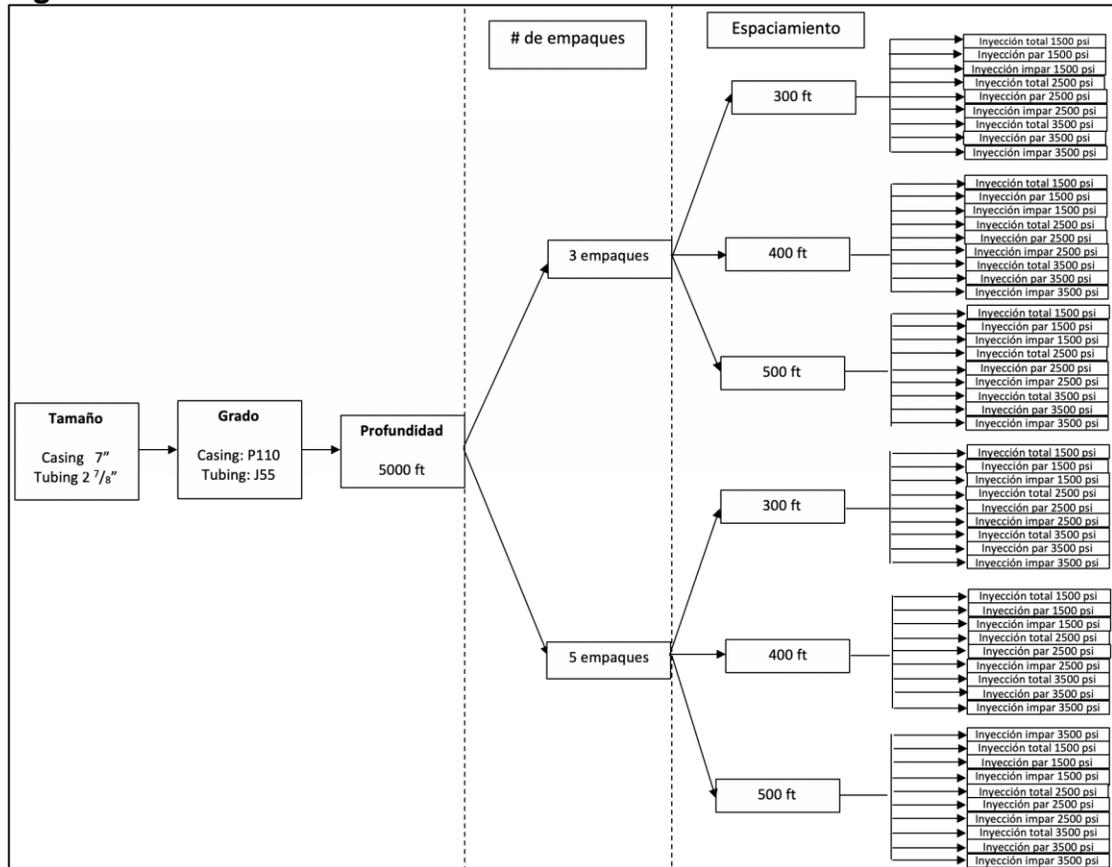
Tabla 9. Resultados tercera sección.

Tamaño	Grado	Profundidad	# de empaques	Espaciamiento	Operación	Carga axial		Triaxial		Estallido Encima		colapso Encima	
						Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo
Tubing 2 7/8"	N80	10000 ft	3	300 ft	Inyección total 1500 psi	0.84	100.00	0.80	1.69	117410.63	NO HAY	FALLA	FALLA
					Inyección par 1500 psi	2.10	100.00	1.99	1.69	2.11	NO HAY	NO HAY	13.45
					Inyección impar 1500 psi	0.84	3.14	0.80	2.38	117410.63	2.11	FALLA	FALLA
					Inyección total 2500 psi	0.74	100.00	0.70	1.38	132086.96	NO HAY	FALLA	FALLA
					Inyección par 2500 psi	1.96	100.00	1.78	1.38	1.79	1056695.65	NO HAY	NO HAY
					Inyección impar 2500 psi	0.74	2.83	0.70	2.05	132086.96	1.79	FALLA	FALLA
					Inyección total 3500 psi	0.66	100.00	0.62	1.13	132086.96	NO HAY	FALLA	FALLA
					Inyección par 3500 psi	1.89	100.00	1.61	1.13	1.53	NO HAY	NO HAY	9.97
					Inyección impar 3500 psi	0.66	2.68	0.62	1.79	132086.96	1.53	FALLA	FALLA
					Inyección total 1500 psi	0.83	100.00	0.79	1.83	132086.96	NO HAY	FALLA	FALLA
					Inyección par 1500 psi	2.00	100.00	1.94	1.83	2.15	NO HAY	NO HAY	13.67
					Inyección impar 1500 psi	0.83	2.88	0.79	2.34	132086.96	2.15	FALLA	FALLA
				Inyección total 2500 psi	0.74	100.00	0.69	1.83	132086.96	10.57	FALLA	FALLA	
				Inyección par 2500 psi	1.87	100.00	1.75	1.83	1.82	10.57	NO HAY	NO HAY	
				Inyección impar 2500 psi	0.74	2.62	0.69	2.03	132086.96	1.82	FALLA	FALLA	
				Inyección total 3500 psi	0.66	100.00	0.62	1.18	132086.96	NO HAY	FALLA	FALLA	
				Inyección par 3500 psi	1.81	100.00	1.59	1.18	1.55	NO HAY	NO HAY	10.09	
				Inyección impar 3500 psi	0.66	2.49	0.62	1.78	132086.96	1.55	FALLA	FALLA	
				Inyección total 1500 psi	0.84	100.00	0.80	1.89	117410.63	NO HAY	FALLA	FALLA	
				Inyección par 1500 psi	2.00	100.00	1.95	1.89	2.19	NO HAY	NO HAY	13.88	
				Inyección impar 1500 psi	0.84	2.85	0.80	2.35	117410.63	2.19	FALLA	FALLA	
				Inyección total 2500 psi	0.74	100.00	0.70	1.51	117410.63	NO HAY	FALLA	FALLA	
				Inyección par 2500 psi	1.88	100.00	1.76	1.51	1.84	NO HAY	NO HAY	11.86	
				Inyección impar 2500 psi	0.74	2.60	0.70	2.04	117410.63	1.84	FALLA	FALLA	
				Inyección total 3500 psi	0.66	100.00	0.62	1.21	2080.11	NO HAY	FALLA	FALLA	
				Inyección par 3500 psi	1.81	100.00	1.60	1.21	1.57	NO HAY	NO HAY	10.21	
				Inyección impar 3500 psi	0.66	2.48	0.62	1.79	2080.11	1.57	FALLA	FALLA	
				Inyección total 1500 psi	0.85	100.00	0.80	1.94	117410.63	NO HAY	FALLA	FALLA	
				Inyección par 1500 psi	0.84	100.00	0.79	1.85	132086.96	NO HAY	FALLA	FALLA	
				Inyección impar 1500 psi	0.83	100.00	0.78	1.77	132086.96	NO HAY	FALLA	FALLA	
				Inyección total 2500 psi	2.41	100.00	2.20	1.64	2.23	9694.46	NO HAY	NO HAY	
				Inyección par 2500 psi	0.91	3.99	0.86	2.56	6215.86	2.17	NO HAY	NO HAY	
				Inyección impar 2500 psi	2.46	100.00	2.17	1.51	2.11	4914.86	NO HAY	NO HAY	
				Inyección total 3500 psi	0.85	2.87	0.80	2.39	117410.63	2.23	FALLA	FALLA	
				Inyección par 3500 psi	1.99	100.00	1.94	1.85	2.17	NO HAY	NO HAY	13.77	
				Inyección impar 3500 psi	0.83	2.91	0.78	2.32	132086.96	2.11	FALLA	FALLA	
			Inyección total 2500 psi	0.75	100.00	0.71	1.54	132086.96	NO HAY	FALLA	FALLA		
			Inyección par 2500 psi	0.74	100.00	0.70	1.49	132086.96	NO HAY	FALLA	FALLA		
			Inyección impar 2500 psi	0.73	100.00	0.69	1.44	132086.96	NO HAY	FALLA	FALLA		
			Inyección total 3500 psi	2.33	100.00	1.98	1.32	1.87	7547.83	NO HAY	NO HAY		
			Inyección par 3500 psi	0.80	3.75	0.66	2.19	4984.41	1.83	FALLA	FALLA		
			Inyección impar 3500 psi	2.37	100.00	1.94	1.24	1.79	3957.66	NO HAY	NO HAY		
			Inyección total 1500 psi	0.75	2.63	0.71	2.07	132086.96	1.87	FALLA	FALLA		
			Inyección par 1500 psi	1.87	100.00	1.75	1.49	1.83	NO HAY	NO HAY	11.78		
			Inyección impar 1500 psi	0.73	2.64	0.69	2.01	132086.96	1.79	FALLA	FALLA		
			Inyección total 2500 psi	0.75	100.00	0.71	1.54	132086.96	NO HAY	FALLA	FALLA		
			Inyección par 2500 psi	0.74	100.00	0.70	1.49	132086.96	NO HAY	FALLA	FALLA		
			Inyección impar 2500 psi	0.73	100.00	0.69	1.44	132086.96	NO HAY	FALLA	FALLA		
			Inyección total 3500 psi	2.33	100.00	1.98	1.09	1.87	NO HAY	NO HAY	5.76		
			Inyección par 3500 psi	0.72	3.75	0.66	2.19	NO HAY	1.83	FALLA	FALLA		
			Inyección impar 3500 psi	2.37	100.00	1.94	1.03	1.79	NO HAY	NO HAY	5.65		
			Inyección total 1500 psi	0.67	2.50	0.61	2.03	NO HAY	1.87	FALLA	FALLA		
			Inyección par 1500 psi	1.80	100.00	1.71	1.24	1.83	NO HAY	NO HAY	5.70		
			Inyección impar 1500 psi	0.65	2.51	0.60	1.98	NO HAY	1.79	FALLA	FALLA		
			Inyección total 2500 psi	0.87	100.00	0.82	2.08	117410.63	NO HAY	FALLA	FALLA		
			Inyección par 2500 psi	0.85	100.00	0.80	1.95	117410.63	NO HAY	FALLA	FALLA		
			Inyección impar 2500 psi	0.83	100.00	0.79	1.83	117410.63	NO HAY	FALLA	FALLA		
			Inyección total 3500 psi	1.98	100.00	1.97	2.08	2.31	NO HAY	NO HAY	14.58		
			Inyección par 3500 psi	0.85	2.86	0.80	2.38	117410.63	2.23	FALLA	FALLA		
			Inyección impar 3500 psi	2.00	100.00	1.94	1.83	2.15	NO HAY	NO HAY	13.67		
			Inyección total 1500 psi	0.87	2.84	0.82	2.42	117410.63	2.31	FALLA	FALLA		
			Inyección par 1500 psi	1.99	100.00	1.95	1.95	2.23	NO HAY	NO HAY	14.11		
			Inyección impar 1500 psi	0.83	2.88	0.79	2.34	117410.63	2.15	FALLA	FALLA		
			Inyección total 2500 psi	0.76	100.00	0.72	1.62	117410.63	1056695.65	FALLA	FALLA		
			Inyección par 2500 psi	0.75	100.00	0.71	1.54	117410.63	NO HAY	FALLA	FALLA		
			Inyección impar 2500 psi	0.74	100.00	0.69	1.47	117410.63	1056695.65	FALLA	FALLA		
			Inyección total 3500 psi	1.87	100.00	1.78	1.62	1.93	1056695.65	NO HAY	NO HAY		
			Inyección par 3500 psi	0.75	2.61	0.71	2.06	117410.63	1.87	FALLA	FALLA		
			Inyección impar 3500 psi	1.87	100.00	1.76	1.47	1.82	1056695.65	NO HAY	NO HAY		
			Inyección total 1500 psi	0.76	2.60	0.72	2.10	117410.63	1.93	FALLA	FALLA		
			Inyección par 1500 psi	1.87	100.00	1.77	1.54	1.87	NO HAY	NO HAY	12.02		
			Inyección impar 1500 psi	0.74	2.62	0.69	2.03	117410.63	1.82	FALLA	FALLA		
			Inyección total 2500 psi	0.68	100.00	0.64	1.28	117410.63	NO HAY	FALLA	FALLA		
			Inyección par 2500 psi	0.67	100.00	0.63	1.23	117410.63	NO HAY	FALLA	FALLA		
			Inyección impar 2500 psi	0.66	100.00	0.62	1.18	117410.63	NO HAY	FALLA	FALLA		
			Inyección total 3500 psi	1.80	100.00	1.63	1.28	1.63	NO HAY	NO HAY	10.57		
			Inyección par 3500 psi	0.67	2.49	0.63	1.81	117410.63	1.59	FALLA	FALLA		
			Inyección impar 3500 psi	1.81	100.00	1.59	1.18	1.55	NO HAY	NO HAY	10.09		
			Inyección total 1500 psi	0.68	2.48	0.64	1.84	117410.63	1.63	FALLA	FALLA		
			Inyección par 1500 psi	1.80	100.00	1.61	1.23	1.59	NO HAY	NO HAY	10.32		
			Inyección impar 1500 psi	0.66	2.49	0.62	1.78	117410.63	1.55	FALLA	FALLA		
			Inyección total 2500 psi	0.88	100.00	0.84	2.24	117410.63	NO HAY	NO HAY	15.09		
			Inyección par 2500 psi	0.86	100.00	0.82	2.05	132086.96	NO HAY	FALLA	FALLA		
			Inyección impar 2500 psi	0.84	100.00	0.80	1.89	117410.63	528347.83	FALLA	FALLA		
			Inyección total 3500 psi	1.98	100.00	1.99	2.24	2.40	NO HAY	NO HAY	15.09		
			Inyección par 3500 psi	0.86	2.83	0.82	2.41	132086.96	2.29	FALLA	FALLA		
			Inyección impar 3500 psi	2.00	100.00	1.95	1.89	2.19	528347.83	NO HAY	NO HAY		
			Inyección total 1500 psi	0.88	2.81	0.84	2.46	117410.63	2.40	NO HAY	NO HAY		
			Inyección par 1500 psi	1.99	100.00	1.97	2.05	2.29	NO HAY	NO HAY	14.46		
			Inyección impar 1500 psi	0.84	2.85	0.80	2.35	117410.63	2.19	FALLA	FALLA		
			Inyección total 2500 psi	0.77	100.00	0.73	1.72	117410.63	NO HAY	FALLA	FALLA		
			Inyección par 2500 psi	0.76	100.00	0.72	1.61	117410.63	NO HAY	FALLA	FALLA		
			Inyección impar 2500 psi	0.74	100.00	0.70	1.51	132086.96	NO HAY	FALLA	FALLA		
			Inyección total 3500 psi	1.87	100.00	1.81	1.72	1.99	NO HAY	NO HAY	12.71		
			Inyección par 3500 psi	0.76	2.59	0.72	2.09	117410.63	1.91	FALLA	FALLA		
			Inyección impar 3500 psi	1.88	100.00	1.76	1.51	1.84	NO HAY	NO HAY	11.86		
			Inyección total 1500 psi	0.77	2.58	0.73	2.14	117410.63	1.99	FALLA	FALLA		
			Inyección par 1500 psi	1.88	100.00	1.78	1.61	1.91	NO HAY	NO HAY	12.27		
			Inyección impar 1500 psi	0.74	2.60	0.70	2.04	132086.96	1.84	FALLA	FALLA		
			Inyección total 2500 psi	0.69	100.00	0.65	1.32	132086.96	NO HAY	FALLA	FALLA		
			Inyección par 2500 psi	0.68	100.00	0.64	1.27	117410.63	NO HAY	FALLA	FALLA		
			Inyección impar 2500 psi	0.66	100.00	0.62	1.21	132086.96	NO HAY	FALLA	FALLA		
			Inyección total 3500 psi	1.80	100.00	1.65	1.32	1.67	NO HAY	NO HAY	9.97		
			Inyección par 3500 psi	0.68	2.47	0.64	1.83	117410.63	1.62	FALLA	FALLA		
			Inyección impar 3500 psi	1.81	100.00	1.60	1.21	1.57	NO HAY	NO HAY	10.21		
			Inyección total 1500 psi	0.69	2.46	0.65	1.87	132086.96	1.67	FALLA	FALLA		
			Inyección par 1500 psi	1.81	100.00	1.63	1.27	1.62	NO HAY	NO HAY	10.51		
			Inyección impar 1500 psi	0.66	2.48	0.62	1.79	132086.96	1.57	FALLA	FALLA		

Fuente: Elaboración propia. 2019.

6.2.4 Cuarta sección. Para la cuarta sección se tiene un OD de 7" en el casing, 2 7/8" de tubing, grado de tubería del casing P110, tubing J55, a una profundidad de 5000 ft. En la **Figura 53** se puede apreciar el esquema realizado.

Figura 53. Cuarta sección de la simulación



Fuente: Elaboración propia. 2019.

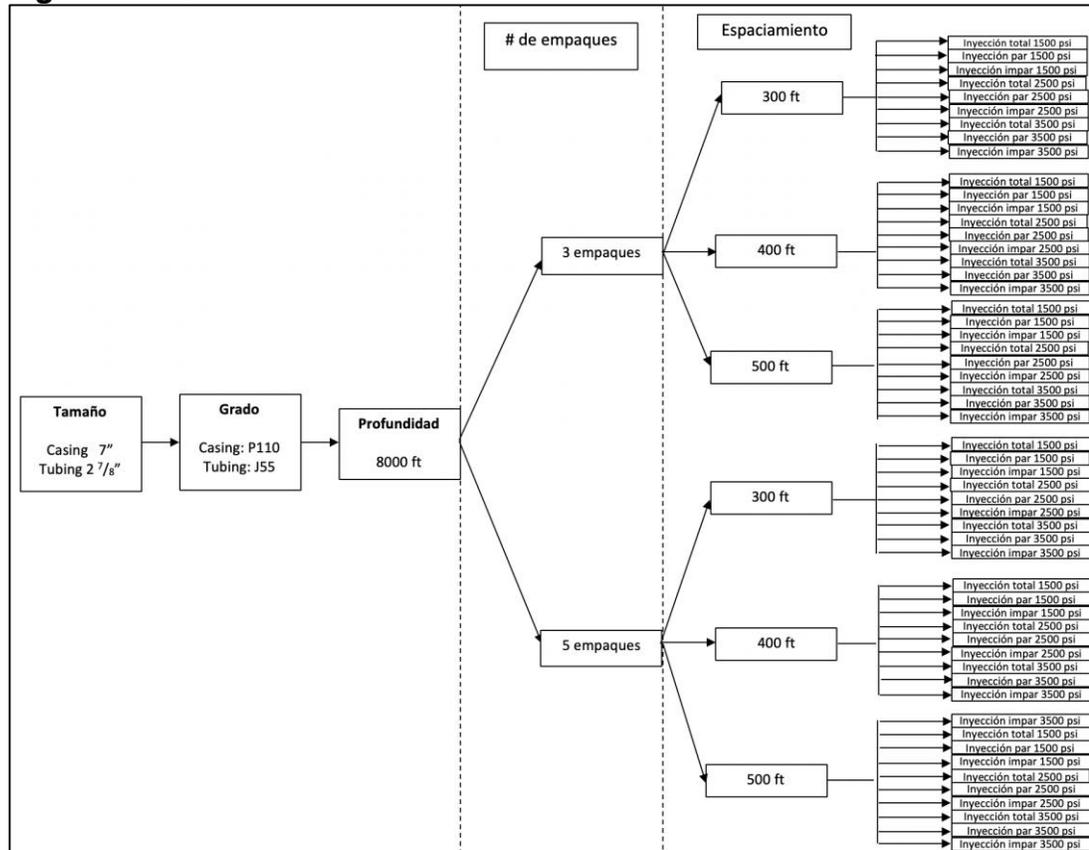
En esta parte se tiene en cuenta todos los valores de la primera sección a diferencia del grado de la tubería. Que en este caso es el J55. A continuación en la **Tabla 10** se tienen los resultados obtenidos para este caso.

Tabla 10. Resultados cuarta sección.

Tamaño	Grado	Profundidad	# de empaques	Espaciamiento	Operación	Carga axial		Triaxial		Estallido Encima		colapso Encima																									
						Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo																								
Tubing 2 7/8"	J55	5000 ft	3	300 ft	Inyección total 1500 psi	1.37	100.00	1.29	2.84	117410.63	NO HAY	NO HAY	21.96																								
					Inyección par 1500 psi	3.09	100.00	3.08	2.84	3.69	NO HAY	NO HAY	21.96																								
					Inyección impar 1500 psi	1.37	5.96	1.29	4.22	117410.63	NO HAY	NO HAY	21.96																								
					Inyección total 2500 psi	1.13	100.00	1.06	1.98	117410.63	NO HAY	NO HAY	17.11																								
					Inyección par 2500 psi	2.90	100.00	2.67	1.98	2.76	4594.33	NO HAY	NO HAY	17.11																							
					Inyección impar 2500 psi	1.13	5.26	1.06	3.27	117410.63	NO HAY	NO HAY	17.11																								
					Inyección total 3500 psi	0.95	100.00	0.89	1.49	132086.96	NO HAY	NO HAY	13.88																								
					Inyección par 3500 psi	2.74	100.00	2.31	1.49	2.19	NO HAY	NO HAY	13.88																								
					Inyección impar 3500 psi	0.95	4.77	0.89	2.64	132086.96	2.19	NO HAY	NO HAY	13.88																							
					Inyección total 1500 psi	1.39	100.00	1.32	2.98	117410.63	NO HAY	NO HAY	22.53																								
				Inyección par 1500 psi	3.11	100.00	3.12	2.98	3.80	NO HAY	NO HAY	22.53																									
				Inyección impar 1500 psi	1.39	5.88	1.32	4.30	117410.63	3.80	NO HAY	NO HAY	22.53																								
				Inyección total 2500 psi	1.14	100.00	1.08	2.05	117410.63	10566.96	NO HAY	NO HAY	17.79																								
				Inyección par 2500 psi	2.92	100.00	2.71	2.05	2.83	10673.69	NO HAY	NO HAY	17.79																								
				Inyección impar 2500 psi	1.14	5.20	1.08	3.33	117410.63	2.83	NO HAY	NO HAY	17.79																								
				Inyección total 3500 psi	0.96	100.00	0.91	1.52	96063.24	NO HAY	NO HAY	14.10																									
				Inyección par 3500 psi	2.76	100.00	2.34	1.53	2.23	NO HAY	NO HAY	14.10																									
				Inyección impar 3500 psi	0.96	4.72	0.91	2.68	96063.24	2.23	NO HAY	NO HAY	14.10																								
				Inyección total 1500 psi	1.42	100.00	1.34	3.14	132086.96	NO HAY	NO HAY	23.13																									
				Inyección par 1500 psi	3.14	100.00	3.16	3.14	3.92	NO HAY	NO HAY	23.13																									
				Inyección impar 1500 psi	1.42	5.80	1.34	4.38	132086.96	3.92	NO HAY	NO HAY	23.13																								
				Inyección total 2500 psi	1.16	100.00	1.09	2.12	132086.96	NO HAY	NO HAY	17.79																									
				Inyección par 2500 psi	2.94	100.00	2.75	2.12	2.89	NO HAY	NO HAY	17.79																									
				Inyección impar 2500 psi	1.16	5.14	1.09	3.38	132086.96	3.89	NO HAY	NO HAY	17.79																								
				Inyección total 3500 psi	1.86	100.00	1.92	3.43	3.08	NO HAY	NO HAY	14.10																									
				Inyección par 3500 psi	2.78	100.00	2.38	3.43	2.27	3.08	NO HAY	NO HAY	14.10																								
				Inyección impar 3500 psi	1.86	4.67	1.92	2.72	3.08	2.27	NO HAY	NO HAY	14.10																								
				Tubing 2 7/8"	J55	5000 ft	3	300 ft	Inyección total 1500 psi	1.44	100.00	1.36	3.27	117410.63	NO HAY	NO HAY	23.76																				
									Inyección par 1500 psi	1.40	100.00	1.33	3.04	117410.63	NO HAY	NO HAY	22.83																				
									Inyección impar 1500 psi	1.37	100.00	1.29	2.84	132086.96	NO HAY	NO HAY	21.96																				
			Inyección total 2500 psi						3.09	100.00	3.14	3.27	4.04	NO HAY	NO HAY	23.76																					
			Inyección par 2500 psi						1.40	5.95	1.33	4.36	117410.63	3.86	NO HAY	NO HAY	23.76																				
			Inyección impar 2500 psi						1.44	5.94	1.36	4.51	117410.63	4.04	NO HAY	NO HAY	23.76																				
			Inyección total 3500 psi						3.09	100.00	3.11	3.04	3.86	NO HAY	NO HAY	22.83																					
			Inyección par 3500 psi						1.37	5.96	1.29	4.22	132086.96	3.69	NO HAY	NO HAY	22.83																				
			Inyección impar 3500 psi						1.42	100.00	1.40	3.09	10.99	11.00	NO HAY	NO HAY	23.76																				
			Inyección total 2500 psi						1.36	100.00	1.34	2.89	11.03	11.03	NO HAY	NO HAY	23.76																				
			Inyección par 2500 psi					1.33	100.00	1.30	2.71	11.06	11.07	NO HAY	NO HAY	23.76																					
			Inyección impar 2500 psi					2.90	100.00	2.75	3.09	2.96	11.00	NO HAY	NO HAY	23.76																					
			Inyección total 3500 psi					1.36	5.26	1.34	3.37	11.03	2.86	NO HAY	NO HAY	23.76																					
			Inyección par 3500 psi					2.90	100.00	2.67	3.71	2.76	11.07	NO HAY	NO HAY	23.76																					
			Inyección impar 3500 psi					1.42	5.27	1.40	3.46	10.99	2.96	NO HAY	NO HAY	23.76																					
			Inyección total 1500 psi					2.90	100.00	2.71	2.89	2.86	11.03	NO HAY	NO HAY	23.76																					
			Inyección par 1500 psi					1.33	5.26	1.30	3.27	11.06	2.76	NO HAY	NO HAY	23.76																					
			Inyección impar 1500 psi					0.99	100.00	0.93	1.60	132086.96	NO HAY	NO HAY	14.56																						
			Inyección total 3500 psi					0.95	100.00	0.89	1.51	NO HAY	NO HAY	-1.33	12.62																						
			Inyección par 3500 psi					0.95	100.00	0.90	1.49	132086.96	NO HAY	NO HAY	13.88																						
			Inyección impar 3500 psi					2.74	100.00	2.39	1.60	2.31	NO HAY	NO HAY	14.56																						
			Tubing 2 7/8"					J55	5000 ft	5	300 ft	Inyección total 1500 psi	0.95	4.77	0.89	2.70	NO HAY	2.25	-1.33	NO HAY																	
												Inyección par 1500 psi	2.74	100.00	2.32	1.49	2.19	NO HAY	NO HAY	13.88																	
												Inyección impar 1500 psi	0.99	4.78	0.93	2.77	132086.96	2.31	NO HAY	NO HAY	13.88																
												Inyección total 2500 psi	2.74	100.00	2.35	1.51	2.25	NO HAY	NO HAY	12.62																	
												Inyección par 2500 psi	0.95	4.77	0.90	2.64	132086.96	2.19	NO HAY	NO HAY	12.62																
												Inyección impar 2500 psi	1.49	100.00	1.42	3.67	132086.96	NO HAY	NO HAY	25.13																	
												Inyección total 3500 psi	1.44	100.00	1.36	3.29	117410.63	105669.65	NO HAY	NO HAY	25.13																
												Inyección par 3500 psi	1.39	100.00	1.32	2.98	117410.63	NO HAY	NO HAY	22.53																	
												Inyección impar 3500 psi	3.11	100.00	3.20	3.67	4.32	NO HAY	NO HAY	25.13																	
							Tubing 2 7/8"					J55	5000 ft	5	400 ft	Inyección total 1500 psi	1.44	5.87	1.36	4.49	117410.63	4.04	NO HAY	NO HAY													
											Inyección par 1500 psi					3.11	100.00	3.12	2.98	3.80	NO HAY	NO HAY	22.53														
											Inyección impar 1500 psi					1.49	5.86	1.42	4.69	132086.96	4.32	NO HAY	NO HAY	22.53													
											Inyección total 2500 psi					3.11	100.00	3.16	3.29	4.04	105669.65	NO HAY	NO HAY	17.44													
											Inyección par 2500 psi					1.39	5.88	1.32	4.30	117410.63	3.80	NO HAY	NO HAY	17.44													
											Inyección impar 2500 psi					1.21	100.00	1.14	2.34	132086.96	NO HAY	NO HAY	18.92														
											Inyección total 3500 psi					1.17	100.00	1.11	2.18	132086.96	NO HAY	NO HAY	18.15														
											Inyección par 3500 psi					1.14	100.00	1.08	2.05	132086.96	NO HAY	NO HAY	17.44														
											Inyección impar 3500 psi					2.92	100.00	2.81	2.34	3.10	NO HAY	NO HAY	18.92														
											Tubing 2 7/8"					J55	5000 ft	5	500 ft	Inyección total 1500 psi	1.17	5.20	1.11	3.46	132086.96	2.96	NO HAY	NO HAY									
															Inyección par 1500 psi					2.92	100.00	2.71	2.05	2.83	NO HAY	NO HAY	17.79										
															Inyección impar 1500 psi					1.21	5.21	1.14	3.59	132086.96	3.10	NO HAY	NO HAY	17.79									
															Inyección total 2500 psi					2.92	100.00	2.76	2.18	2.96	NO HAY	NO HAY	18.15										
															Inyección par 2500 psi					1.14	5.20	1.08	3.33	132086.96	2.83	NO HAY	NO HAY	18.15									
															Inyección impar 2500 psi					1.01	100.00	0.95	1.69	132086.96	NO HAY	NO HAY	15.05										
															Inyección total 3500 psi					0.99	100.00	0.93	1.61	132086.96	NO HAY	NO HAY	14.56										
															Inyección par 3500 psi					0.96	100.00	0.91	1.53	117410.63	NO HAY	NO HAY	14.10										
															Inyección impar 3500 psi					1.01	100.00	0.95	1.69	132086.96	NO HAY	NO HAY	15.05										
															Tubing 2 7/8"					J55	5000 ft	5	500 ft	Inyección total 1500 psi	0.99	100.00	0.93	1.61	132086.96	NO HAY	NO HAY	14.56					
																			Inyección par 1500 psi					0.96	100.00	0.91	1.53	117410.63	NO HAY	NO HAY	14.10						
																			Inyección impar 1500 psi					1.01	4.73	0.95	2.85	132086.96	2.39	NO HAY	NO HAY	14.10					
										Inyección total 2500 psi									2.76					100.00	2.39	1.61	2.31	NO HAY	NO HAY	14.56							
										Inyección par 2500 psi									0.96					4.72	0.91	2.68	117410.63	2.23	NO HAY	NO HAY	14.56						
										Inyección impar 2500 psi									1.55					100.00	1.47	4.17	117410.63	NO HAY	NO HAY	26.67							
										Inyección total 3500 psi									1.48					100.00	1.41	3.59	132086.96	NO HAY	NO HAY	24.77							
										Inyección par 3500 psi									1.42					100.00	1.34	3.14	117410.63	NO HAY	NO HAY	23.13							
										Inyección impar 3500 psi									3.14					100.00	3.25	4.17	4.65	NO HAY	NO HAY	26.67							
										Tubing 2 7/8"									J55					5000 ft	5	500 ft	Inyección total 1500 psi	1.48	5.79	1.41	4.62	132086.96	4.25	NO HAY	NO HAY		
																							Inyección par 1500 psi				3.14	100.00	3.16	3.14	3.92	NO HAY	NO HAY	23.13			
																							Inyección impar 1500 psi				1.55	5.79	1.47	4.87	117410.63	4.65	NO HAY	NO HAY	23.13		
														Inyección total 2500 psi									3.14				100.00	3.21	3.59	4.25	NO HAY	NO HAY	24.77				
														Inyección par 2500 psi									1.42				5.81	1.34	4.38	117410.63	3.92	NO HAY	NO HAY	24.77			
														Inyección impar 2500 psi									1.25				100.00	1.18	2.52	132086.96	NO HAY	NO HAY	19.76				
														Inyección total 3500 psi									1.20				100.00	1.14	2.31	132086.96	NO HAY	NO HAY	18.73				
														Inyección par 3500 psi									1.16				100.00	1.09	2.12	132086.96	NO HAY	NO HAY	17.79				
														Inyección impar 3500 psi									2.95				100.00	2.87	2.52	3.26	NO HAY	NO HAY	19.76				
														Tubing 2 7/8"									J55				5000 ft	5	500 ft	Inyección total 1500 psi	1.20	5.15	1.14	3.55	132086.96	3.06	NO HAY
																										Inyección par 1500 psi				2.94	100.00	2.75	2.12	2.89	NO HAY	NO HAY	17.79
																										Inyección impar 1500 psi				1.25	5.16	1.18	3.72	132086.96	3.26	NO HAY	NO HAY
																		Inyección total 2500 psi								2.94				100.00	2.81	2.31	3.06	NO HAY	NO HAY	18.73	
																		Inyección par 2500 psi								1.16				5.14	1.09	3.38	132086.96	2.89	NO HAY	NO HAY	18.73
																		Inyección impar 2500 psi								1.25				100.00	1.22	2.29	10.52	10.52	NO HAY	NO HAY	18.73
																		Inyección total 3500 psi								1.20				100.00	1.17	2.12	10.52	10.52	NO HAY	NO HAY	18.73
Inyección par 3500 psi	1.16	100.00																1.13								1.96				10.51	10.51	NO HAY	NO HAY	18.73			
Inyección impar 3500 psi	2.79	100.00																2.50								1.78				2.49	NO HAY	NO HAY	15.58				
Tubing 2 7/8"	J55	5000 ft																5								500 ft				Inyección total 1500 psi	1.01	4.68	0.95	2.83	117410.63	2.37	NO HAY
																													Inyección par 1500 psi	2.78	100.00	2.38	1.57	2.27	NO HAY	NO HAY	14.33

6.2.5 Quinta sección. Para la quinta sección se tiene un OD de 7" en el casing, 2 7/8" de tubing, grado de tubería del casing P110, tubing J55. En la **Figura 54** se puede apreciar el esquema realizado

Figura 54. Quinta sección de la simulación



Fuente: Elaboración propia. 2019.

Para este caso se tiene las mismas condiciones que el anterior caso, solamente vario la profundidad al aumentarse a 8000 ft. A continuación, en la **Tabla 11** se tienen los resultados obtenidos por los casos, tanto para 3 como para 5 empaques.

Tabla 11. Resultados quinta sección.

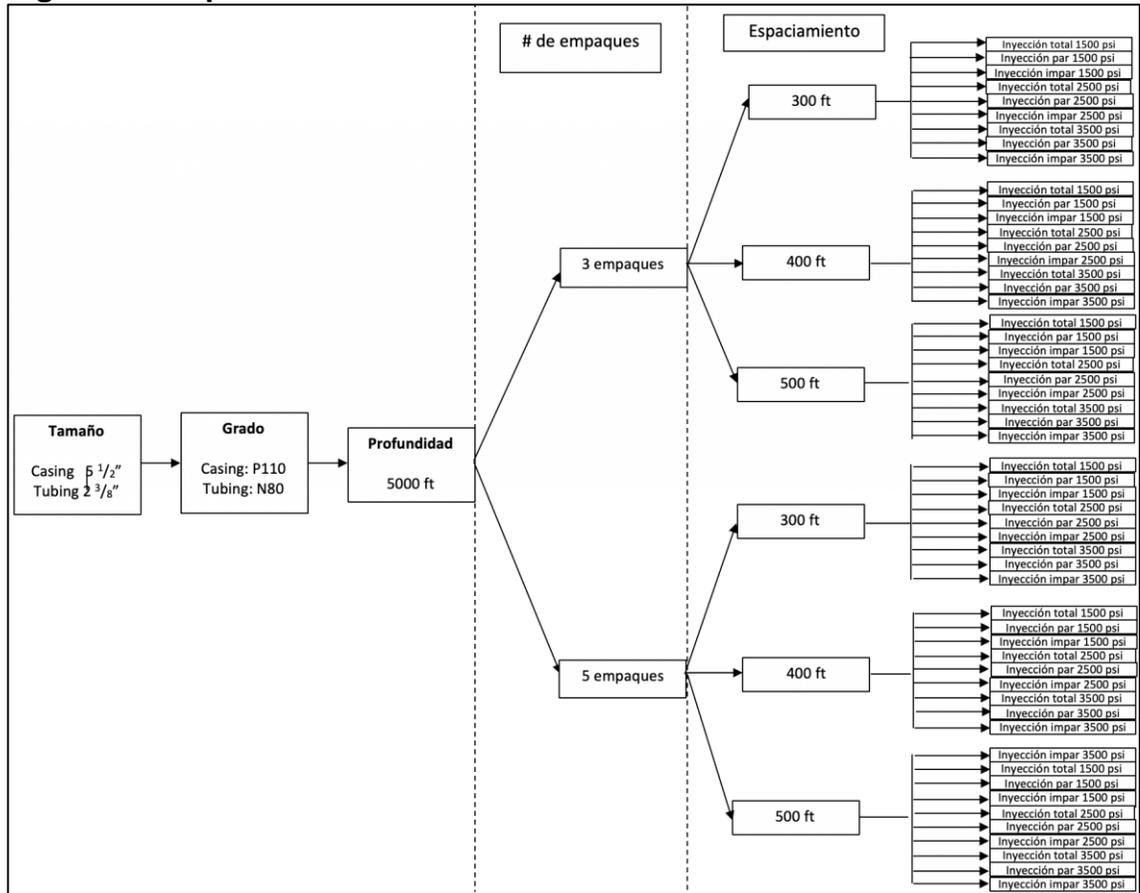
Tamaño	Grado	Profundidad	# de empaques	Espaciamiento	Operación	Carga axial		Triaxial		Estallido Encima		colapso Encima	
						Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo
Tubing 2 7/8"	J55	8000 ft	3	300 ft	Inyección total 1500 psi	0.98	100,00	0.93	2,10	132086,96	NO HAY	NO HAY	15,92
					Inyección par 1500 psi	2,31	100,00	2,25	2,10	2,55	NO HAY	NO HAY	15,92
					Inyección impar 1500 psi	0.98	3,61	0.93	2,82	132086,96	2,55	NO HAY	NO HAY
					Inyección total 2500 psi	0.85	100,00	0.80	1,62	132086,96	NO HAY	FALLA	FALLA
					Inyección par 2500 psi	2,17	100,00	2,01	1,62	2,08	NO HAY	NO HAY	13,28
					Inyección impar 2500 psi	0.85	3,27	0.80	2,38	132086,96	2,08	FALLA	FALLA
					Inyección total 3500 psi	0.85	100,00	0.82	1,53	10,47	10,47	FALLA	FALLA
					Inyección par 3500 psi	2,17	100,00	1,84	1,53	1,74	10,47	NO HAY	NO HAY
					Inyección impar 3500 psi	0.85	3,27	0.82	2,06	10,47	1,74	FALLA	FALLA
					Inyección total 1500 psi	1.24	100,00	1.24	2,18	7,36	NO HAY	NO HAY	16,22
				Inyección par 1500 psi	2,31	100,00	2,27	2,18	2,60	NO HAY	NO HAY	16,22	
				Inyección impar 1500 psi	1.24	3,58	1.24	2,85	7,36	2,60	NO HAY	NO HAY	
				Inyección total 2500 psi	0.86	100,00	0.81	1,67	132086,96	NO HAY	FALLA	FALLA	
				Inyección par 2500 psi	2,18	100,00	2,03	1,67	2,12	NO HAY	NO HAY	13,48	
				Inyección impar 2500 psi	0.86	3,25	0.81	2,40	132086,96	2,12	FALLA	FALLA	
				Inyección total 3500 psi	0.86	100,00	0.83	1,57	10,47	10,47	FALLA	FALLA	
				Inyección par 3500 psi	2,18	100,00	1,86	1,57	1,76	10,47	NO HAY	NO HAY	
				Inyección impar 3500 psi	0.86	3,25	0.83	2,08	10,47	1,76	FALLA	FALLA	
				Inyección total 1500 psi	1.00	100,00	0.95	2,26	117410,63	NO HAY	NO HAY	16,53	
				Inyección par 1500 psi	2,32	100,00	2,29	2,26	2,66	NO HAY	NO HAY	16,53	
				Inyección impar 1500 psi	1.00	3,54	0.95	2,88	117410,63	2,66	NO HAY	NO HAY	
				Inyección total 2500 psi	0.87	100,00	0.82	1,71	132086,96	NO HAY	FALLA	FALLA	
				Inyección par 2500 psi	2,19	100,00	2,05	1,71	2,16	NO HAY	NO HAY	13,69	
				Inyección impar 2500 psi	0.87	3,22	0.82	2,43	132086,96	2,16	FALLA	FALLA	
				Inyección total 3500 psi	0.76	100,00	0.72	1,34	132086,96	NO HAY	FALLA	FALLA	
				Inyección par 3500 psi	2,10	100,00	1,84	1,34	1,79	NO HAY	NO HAY	11,54	
				Inyección impar 3500 psi	0.76	3,03	0.72	2,08	132086,96	1,79	FALLA	FALLA	
				300 ft	Inyección total 1500 psi	1.01	100,00	0.96	2,34	117410,63	NO HAY	NO HAY	16,85
					Inyección par 1500 psi	0.99	100,00	0.94	2,21	117410,63	NO HAY	NO HAY	16,38
					Inyección impar 1500 psi	0.98	100,00	0.93	2,10	117410,63	NO HAY	NO HAY	15,92
			Inyección total 2500 psi		2,30	100,00	2,29	2,34	2,72	NO HAY	NO HAY	16,85	
			Inyección par 2500 psi		0.99	3,60	0.94	2,87	117410,63	2,63	NO HAY	NO HAY	
			Inyección impar 2500 psi		2,31	100,00	2,25	2,10	2,55	NO HAY	NO HAY	15,92	
			Inyección total 3500 psi		1.01	3,58	0.96	2,93	117410,63	2,72	NO HAY	NO HAY	
			Inyección par 3500 psi		2,30	100,00	2,27	2,21	2,63	NO HAY	NO HAY	16,38	
			Inyección impar 3500 psi		0.98	3,61	0.93	2,82	117410,63	2,55	NO HAY	NO HAY	
			Inyección total 1500 psi		0.87	100,00	0.82	1,75	132086,96	NO HAY	NO HAY	13,90	
			Inyección par 1500 psi		0.86	100,00	0.81	1,68	117410,63	NO HAY	FALLA	FALLA	
			Inyección impar 1500 psi		0.85	100,00	0.80	1,62	117410,63	NO HAY	FALLA	FALLA	
			Inyección total 2500 psi		2,16	100,00	2,05	1,75	2,15	NO HAY	NO HAY	13,90	
			Inyección par 2500 psi		0.86	3,27	0.81	2,42	117410,63	2,14	FALLA	FALLA	
			Inyección impar 2500 psi		2,17	100,00	2,01	1,62	2,08	NO HAY	NO HAY	13,28	
			Inyección total 3500 psi		0.87	3,26	0.82	2,47	132086,96	2,19	NO HAY	NO HAY	
			Inyección par 3500 psi		2,16	100,00	2,03	1,68	2,14	NO HAY	NO HAY	13,59	
			Inyección impar 3500 psi		0.85	3,27	0.80	2,38	117410,63	2,08	FALLA	FALLA	
			Inyección total 1500 psi		0.76	100,00	0.72	1,36	117410,63	NO HAY	FALLA	FALLA	
			Inyección par 1500 psi		0.75	100,00	0.71	1,32	117410,63	NO HAY	FALLA	FALLA	
			Inyección impar 1500 psi		0.74	100,00	0.70	1,28	132086,96	NO HAY	FALLA	FALLA	
			Inyección total 2500 psi		2,08	100,00	1,84	1,36	1,81	NO HAY	NO HAY	11,68	
			Inyección par 2500 psi		0.75	3,07	0.71	2,07	117410,63	1,77	FALLA	FALLA	
			Inyección impar 2500 psi		2,08	100,00	1,81	1,28	1,74	NO HAY	NO HAY	11,24	
			Inyección total 3500 psi		0.76	3,06	0.72	2,11	117410,63	1,81	FALLA	FALLA	
			Inyección par 3500 psi		2,08	100,00	1,82	1,32	1,77	NO HAY	NO HAY	11,46	
			Inyección impar 3500 psi		0.74	3,08	0.70	2,04	132086,96	1,74	FALLA	FALLA	
			Inyección total 1500 psi		1.04	100,00	0.98	2,54	117410,63	NO HAY	NO HAY	17,53	
			Inyección par 1500 psi		1.01	100,00	0.96	2,35	117410,63	NO HAY	NO HAY	16,85	
			Inyección impar 1500 psi		0.99	100,00	0.94	2,18	132086,96	NO HAY	NO HAY	16,22	
			Inyección total 2500 psi	2,30	100,00	2,32	2,54	2,84	NO HAY	NO HAY	17,53		
			Inyección par 2500 psi	1.01	3,56	0.96	2,92	117410,63	2,72	NO HAY	NO HAY		
			Inyección impar 2500 psi	2,31	100,00	2,27	2,18	2,60	NO HAY	NO HAY	16,22		
			Inyección total 3500 psi	1.04	3,54	0.98	2,99	117410,63	2,84	NO HAY	NO HAY		
			Inyección par 3500 psi	2,31	100,00	2,30	2,35	2,72	NO HAY	NO HAY	16,85		
			Inyección impar 3500 psi	0.99	3,58	0.94	2,85	132086,96	2,60	NO HAY	NO HAY		
			Inyección total 1500 psi	0.89	100,00	0.84	1,86	132086,96	NO HAY	NO HAY	14,35		
			Inyección par 1500 psi	0.87	100,00	0.83	1,76	132086,96	NO HAY	NO HAY	13,90		
			Inyección impar 1500 psi	0.86	100,00	0.81	1,67	132086,96	NO HAY	FALLA	FALLA		
			Inyección total 2500 psi	2,17	100,00	2,08	1,86	2,27	NO HAY	NO HAY	14,35		
			Inyección par 2500 psi	0.87	3,24	0.83	2,46	132086,96	2,19	NO HAY	NO HAY		
			Inyección impar 2500 psi	2,18	100,00	2,03	1,67	2,12	NO HAY	NO HAY	13,48		
			Inyección total 3500 psi	0.89	3,23	0.84	2,52	132086,96	2,27	NO HAY	NO HAY		
			Inyección par 3500 psi	2,17	100,00	2,06	1,76	2,19	NO HAY	NO HAY	13,90		
			Inyección impar 3500 psi	0.86	3,25	0.81	2,40	132086,96	2,12	FALLA	FALLA		
			Inyección total 1500 psi	0.78	100,00	0.73	1,42	132086,96	NO HAY	FALLA	FALLA		
			Inyección par 1500 psi	0.76	100,00	0.72	1,36	132086,96	NO HAY	FALLA	FALLA		
			Inyección impar 1500 psi	0.75	100,00	0.71	1,31	117410,63	1056695,65	FALLA	FALLA		
			Inyección total 2500 psi	2,08	100,00	1,87	1,42	1,87	NO HAY	NO HAY	12,00		
			Inyección par 2500 psi	0.76	3,05	0.72	2,10	132086,96	1,81	FALLA	FALLA		
			Inyección impar 2500 psi	2,09	100,00	1,82	1,31	1,76	1056695,65	NO HAY	NO HAY		
			Inyección total 3500 psi	0.78	3,04	0.73	2,15	132086,96	1,87	FALLA	FALLA		
			Inyección par 3500 psi	2,09	100,00	1,85	1,36	1,81	NO HAY	NO HAY	11,69		
			Inyección impar 3500 psi	0.75	3,05	0.71	2,06	117410,63	1,76	FALLA	FALLA		
			Inyección total 1500 psi	1.06	100,00	1.01	2,78	132086,96	NO HAY	NO HAY	18,27		
			Inyección par 1500 psi	1.03	100,00	0.98	2,50	NO HAY	NO HAY	1,05	17,36		
			Inyección impar 1500 psi	1.00	100,00	0.95	2,26	132086,96	NO HAY	NO HAY	16,53		
			Inyección total 2500 psi	1.06	3,49	1.01	3,05	132086,96	2,98	NO HAY	NO HAY		
			Inyección par 2500 psi	2,31	100,00	2,32	2,50	2,81	NO HAY	NO HAY	17,36		
			Inyección impar 2500 psi	1.00	3,54	0.95	2,88	132086,96	2,66	NO HAY	NO HAY		
			Inyección total 3500 psi	0.78	3,04	0.69	2,84	NO HAY	2,98	FALLA	FALLA		
			Inyección par 3500 psi	2,09	100,00	2,14	1,46	2,81	NO HAY	NO HAY	4,12		
			Inyección impar 3500 psi	0.75	3,05	0.67	2,70	NO HAY	2,66	FALLA	FALLA		
			Inyección total 1500 psi	0.91	100,00	0.86	1,98	132086,96	NO HAY	NO HAY	14,83		
			Inyección par 1500 psi	0.89	100,00	0.84	1,84	132086,96	NO HAY	NO HAY	14,24		
			Inyección impar 1500 psi	0.87	100,00	0.82	1,71	117410,63	NO HAY	FALLA	FALLA		
			Inyección total 2500 psi	2,18	100,00	2,11	1,98	2,36	NO HAY	NO HAY	14,83		
			Inyección par 2500 psi	0.89	3,21	0.84	2,50	132086,96	2,25	NO HAY	NO HAY		
			Inyección impar 2500 psi	2,19	100,00	2,05	1,71	2,16	NO HAY	NO HAY	13,69		
			Inyección total 3500 psi	0.91	3,21	0.86	2,57	132086,96	2,36	NO HAY	NO HAY		
			Inyección par 3500 psi	2,18	100,00	2,08	1,84	2,25	NO HAY	NO HAY	14,24		
			Inyección impar 3500 psi	0.87	3,22	0.82	2,43	117410,63	2,16	FALLA	FALLA		
			Inyección total 1500 psi	0.79	100,00	0.75	1,49	132086,96	NO HAY	FALLA	FALLA		
Inyección par 1500 psi	0.78	100,00	0.73	1,41	132086,96	NO HAY	FALLA	FALLA					
Inyección impar 1500 psi	0.76	100,00	0.72	1,34	117410,63	NO HAY	FALLA	FALLA					
Inyección total 2500 psi	2,09	100,00	1,90	1,49	1,92	NO HAY	NO HAY	12,34					
Inyección par 2500 psi	0.78	3,02	0.73	2,14	132086,96	1,85	FALLA	FALLA					
Inyección impar 2500 psi	2,10	100,00	1,84	1,34	1,79	NO HAY	NO HAY	11,54					
Inyección total 3500 psi	0.79	3,02	0.75	2,20	132086,96	1,92	FALLA	FALLA					
Inyección par 3500 psi	2,09	100,00	1,87	1,41	1,85	NO HAY	NO HAY	11,92					
Inyección impar 3500 psi	0.76	3,03	0.72	2,08	117410,63	1,79	FALLA	FALLA					

Fuente: Elaboración propia. 2019.

6.2.6 Sexta sección. Para la sexta sección se tiene un OD de 7" en el casing, 2 7/8" de tubing, grado de tubería del casing P110, tubing J55, a una profundidad de 10000 ft. A pesar de esto, no se realizaron la totalidad de las corridas ya que en la envolvente operativa de Wellcat™ se salen de los límites de falla, teniendo en cuenta este riesgo, no se realizó la corrección con el modelo PTA.

6.2.7 Séptima sección. Para la séptima sección se tiene un OD de 5 1/2" en el casing, 2 3/8" de tubing, grado de tubería del casing P110, tubing N80, a una profundidad de 5000 ft. En la **Figura 55** se puede apreciar el esquema realizado.

Figura 55. Séptima sección de la simulación



Fuente: Elaboración propia. 2019.

Para este caso, se tienen los mismos factores que la primera sección, únicamente varía el tamaño de las tuberías. Con un casing de 5 1/2" y un tubing de 2 3/8". A continuación, en la **Tabla 12** se tienen los resultados obtenidos por las simulaciones con sus debidas correcciones en el PTA.

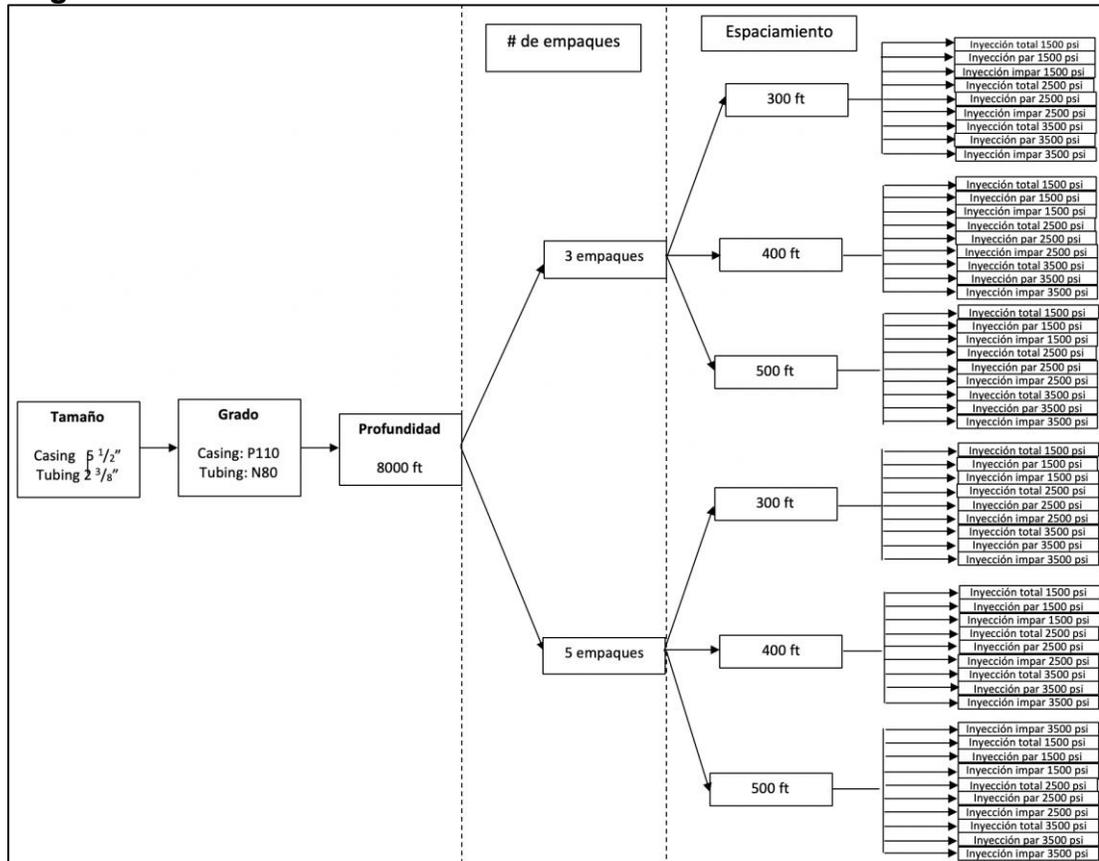
Tabla 12. Resultados séptima sección.

Tamaño	Grado	Profundidad	# de paquetes	Espaciamiento	Operación	Carga axial		Triaxial		Estallido Encima		Colapso Encima						
						Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo					
Tubing 2 3/8"	N80	5000 ft	3	300 ft	Inyección total 1500 psi	1.49	100.00	1.40	2.57	132086.96	NO HAY	NO HAY	22.49					
					Inyección par 1500 psi	3.98	100.00	3.65	2.57	3.79	NO HAY	NO HAY	22.49					
					inyección impar 1500 psi	1.49	10.86	1.40	4.62	132086.96	3.79	NO HAY	NO HAY					
					Inyección total 2500 psi	1.23	100.00	1.15	1.90	132086.96	NO HAY	NO HAY	17.78					
					Inyección par 2500 psi	3.78	100.00	3.10	1.90	2.89	NO HAY	NO HAY	17.78					
					inyección impar 2500 psi	1.23	9.46	1.15	3.52	132086.96	2.89	NO HAY	NO HAY					
					Inyección total 3500 psi	1.02	100.00	0.96	1.45	132086.96	NO HAY	NO HAY	14.32					
					Inyección par 3500 psi	3.60	100.00	2.59	1.45	2.26	NO HAY	NO HAY	14.32					
					inyección impar 3500 psi	1.02	8.42	0.96	2.76	132086.96	2.26	NO HAY	NO HAY					
					Inyección total 400 ft	1.52	100.00	1.43	2.68	132086.96	NO HAY	NO HAY	23.06					
					Inyección par 400 ft	4.00	100.00	3.71	2.68	3.90	NO HAY	NO HAY	23.06					
					inyección impar 400 ft	1.52	10.65	1.43	4.75	132086.96	3.90	NO HAY	NO HAY					
					Inyección total 2500 psi	1.24	100.00	1.17	1.95	11241.44	NO HAY	NO HAY	18.11					
					Inyección par 2500 psi	3.80	100.00	3.15	1.95	2.95	NO HAY	NO HAY	18.11					
					inyección impar 2500 psi	1.24	9.31	1.17	3.60	11241.44	2.95	NO HAY	NO HAY					
					Inyección total 3500 psi	1.03	100.00	0.97	1.48	132086.96	NO HAY	NO HAY	14.51					
					Inyección par 3500 psi	3.62	100.00	2.63	1.48	2.30	NO HAY	NO HAY	14.51					
					inyección impar 3500 psi	1.03	8.30	0.97	2.80	132086.96	2.30	NO HAY	NO HAY					
					Inyección total 1500 psi	1.55	100.00	1.46	2.79	10359.76	NO HAY	NO HAY	23.66					
					Inyección par 1500 psi	4.02	100.00	3.77	2.79	4.02	NO HAY	NO HAY	23.66					
					inyección impar 1500 psi	1.55	10.45	1.46	4.89	10359.76	4.02	NO HAY	NO HAY					
					Inyección total 2500 psi	1.26	100.00	1.19	2.01	NO HAY	NO HAY	6.15	18.42					
					Inyección par 2500 psi	3.82	100.00	3.19	2.01	3.01	NO HAY	NO HAY	18.42					
					inyección impar 2500 psi	1.26	9.17	1.19	3.67	NO HAY	3.01	6.15	NO HAY					
					Inyección total 3500 psi	1.05	100.00	0.98	1.51	132086.96	NO HAY	NO HAY	14.75					
					Inyección par 3500 psi	3.64	100.00	2.66	1.51	2.34	NO HAY	NO HAY	14.75					
					inyección impar 3500 psi	1.05	8.19	0.98	2.85	132086.96	2.34	NO HAY	NO HAY					
					Tubing 2 3/8"	N80	5000 ft	5	300 ft	Inyección total 1500 psi	2.39	100.00	2.44	5.73	8.01	NO HAY	NO HAY	24.17
										Inyección par 1500 psi	1.74	100.00	1.63	5.21	140000.00	NO HAY	NO HAY	23.24
										inyección impar 1500 psi	1.71	100.00	1.59	4.76	140000.00	NO HAY	NO HAY	22.38
			Inyección total 2500 psi	3.36						100.00	3.39	5.73	4.40	NO HAY	NO HAY	24.17		
			Inyección par 2500 psi	1.74						5.51	1.63	4.47	140000.00	4.20	NO HAY	NO HAY		
			inyección impar 2500 psi	3.37						100.00	3.33	4.76	4.02	NO HAY	NO HAY	22.38		
			Inyección total 3500 psi	2.39						5.59	2.44	4.59	8.01	4.40	NO HAY	NO HAY		
			inyección impar 3500 psi	3.37						100.00	3.36	5.21	4.20	NO HAY	NO HAY	23.24		
			Inyección total 1500 psi	1.71						5.54	1.59	4.35	140000.00	4.02	NO HAY	NO HAY		
			Inyección par 1500 psi	1.49						100.00	1.39	3.55	140000.00	NO HAY	NO HAY	18.71		
			inyección impar 1500 psi	1.46						100.00	1.36	3.35	140000.00	NO HAY	NO HAY	18.19		
			Inyección total 2500 psi	1.44						100.00	1.34	3.18	140000.00	NO HAY	NO HAY	17.69		
			Inyección par 2500 psi	3.17						100.00	2.99	3.55	3.26	NO HAY	NO HAY	18.71		
			inyección impar 2500 psi	1.46						5.00	1.36	3.58	140000.00	3.16	NO HAY	NO HAY		
			Inyección total 3500 psi	3.17						100.00	2.92	3.18	3.06	NO HAY	NO HAY	17.69		
			inyección impar 3500 psi	1.49						5.00	1.39	3.66	140000.00	3.26	NO HAY	NO HAY		
			Inyección total 1500 psi	3.17						100.00	2.96	3.35	3.16	NO HAY	NO HAY	18.19		
			Inyección par 1500 psi	1.44						5.01	1.34	3.50	140000.00	3.06	NO HAY	NO HAY		
			inyección impar 1500 psi	1.26						100.00	1.17	2.46	140000.00	1120000.00	NO HAY	NO HAY		
			Inyección total 2500 psi	1.24						100.00	1.15	2.37	140000.00	NO HAY	NO HAY	14.57		
			inyección impar 2500 psi	1.22						100.00	1.13	2.28	140000.00	1120000.00	NO HAY	NO HAY		
			Inyección total 3500 psi	3.00						100.00	2.59	2.46	2.52	1120000.00	NO HAY	NO HAY		
			Inyección par 3500 psi	1.24						4.59	1.15	2.89	140000.00	2.46	NO HAY	NO HAY		
			inyección impar 3500 psi	3.00						100.00	2.52	2.28	2.40	1120000.00	NO HAY	NO HAY		
			Inyección total 1500 psi	1.26						4.58	1.17	2.95	140000.00	2.52	NO HAY	NO HAY		
			Inyección par 1500 psi	3.00						100.00	2.55	2.37	2.46	NO HAY	NO HAY	14.57		
			inyección impar 1500 psi	1.22						4.59	1.13	2.83	140000.00	2.40	NO HAY	NO HAY		
			Inyección total 2500 psi	1.84						100.00	1.73	6.62	183.16	183.40	NO HAY	NO HAY		
			Inyección par 2500 psi	1.79						100.00	1.68	5.71	163.89	164.08	NO HAY	NO HAY		
			inyección impar 2500 psi	1.73						100.00	1.63	5.03	148.31	148.46	NO HAY	NO HAY		
			Inyección total 3500 psi	3.38				100.00	3.44	6.62	4.58	183.40	NO HAY	NO HAY				
			Inyección par 3500 psi	1.79				5.44	1.68	4.50	163.89	4.29	NO HAY	NO HAY				
			inyección impar 3500 psi	3.39				100.00	3.35	5.03	4.02	148.46	NO HAY	NO HAY				
			Inyección total 1500 psi	1.84				5.42	1.73	4.66	183.16	4.58	NO HAY	NO HAY				
			Inyección par 1500 psi	3.39				100.00	3.40	5.71	4.29	164.08	NO HAY	NO HAY				
			inyección impar 1500 psi	1.73				5.46	1.63	4.34	148.31	4.02	NO HAY	NO HAY				
			Inyección total 2500 psi	1.53				100.00	1.43	3.81	89.11	89.16	NO HAY	NO HAY				
			Inyección par 2500 psi	1.49				100.00	1.40	3.51	79.78	80.28	NO HAY	NO HAY				
			inyección impar 2500 psi	1.46				100.00	1.37	3.26	72.15	72.18	NO HAY	NO HAY				
			Inyección total 3500 psi	3.19				100.00	3.01	3.81	3.29	89.16	NO HAY	NO HAY				
			Inyección par 3500 psi	1.49				4.94	1.40	3.55	79.78	3.13	NO HAY	NO HAY				
			inyección impar 3500 psi	3.19				100.00	2.90	3.26	2.99	72.18	NO HAY	NO HAY				
			Inyección total 1500 psi	1.53				4.94	1.43	3.67	89.11	3.29	NO HAY	NO HAY				
			Inyección par 1500 psi	3.19				100.00	2.96	3.51	3.13	80.28	NO HAY	NO HAY				
			inyección impar 1500 psi	1.46				4.95	1.37	3.43	72.15	2.99	NO HAY	NO HAY				
			Inyección total 2500 psi	1.29				100.00	1.15	2.76	NO HAY	NO HAY	2.74	7.83				
			Inyección par 2500 psi	1.26				100.00	1.13	2.60	NO HAY	NO HAY	2.57	7.76				
			inyección impar 2500 psi	1.24				100.00	1.11	2.46	NO HAY	NO HAY	2.40	7.70				
			Inyección total 3500 psi	3.02				100.00	2.91	2.76	3.29	NO HAY	NO HAY	7.83				
			Inyección par 3500 psi	1.26				4.54	1.13	3.46	NO HAY	3.13	2.57	NO HAY				
			inyección impar 3500 psi	3.02				100.00	2.81	2.46	2.99	NO HAY	NO HAY	7.70				
			Inyección total 1500 psi	1.29				4.53	1.15	3.57	NO HAY	3.29	2.74	NO HAY				
			Inyección par 1500 psi	3.02				100.00	2.86	2.60	3.13	NO HAY	NO HAY	7.76				
			inyección impar 1500 psi	1.24				4.54	1.11	3.36	NO HAY	2.99	2.40	NO HAY				
			Inyección total 2500 psi	1.90				100.00	1.79	8.06	140000.00	NO HAY	NO HAY	27.06				
			Inyección par 2500 psi	1.83				100.00	1.72	6.51	124444.44	NO HAY	NO HAY	25.18				
			inyección impar 2500 psi	1.77				100.00	1.65	5.46	140000.00	NO HAY	NO HAY	23.55				
			Inyección total 3500 psi	3.41				100.00	3.51	8.06	5.05	NO HAY	NO HAY	27.06				
			Inyección par 3500 psi	1.83				5.37	1.72	4.65	124444.44	4.62	NO HAY	NO HAY				
			inyección impar 3500 psi	3.42				100.00	3.41	5.46	4.27	NO HAY	NO HAY	23.55				
			Inyección total 1500 psi	1.90				5.35	1.79	4.84	140000.00	5.05	NO HAY	NO HAY				
			Inyección par 1500 psi	3.41				100.00	3.47	6.51	4.62	NO HAY	NO HAY	25.18				
			inyección impar 1500 psi	1.77				5.39	1.65	4.47	140000.00	4.27	NO HAY	NO HAY				
			Inyección total 2500 psi	1.57				100.00	1.47	4.25	140000.00	160000.00	NO HAY	NO HAY				
			Inyección par 2500 psi	1.52				100.00	1.42	3.81	160000.00	NO HAY	NO HAY	19.26				
			inyección impar 2500 psi	1.48				100.00	1.38	3.46	140000.00	NO HAY	NO HAY	18.36				
			Inyección total 3500 psi	3.22				100.00	3.12	4.25	3.58	160000.00	NO HAY	NO HAY				
			Inyección par 3500 psi	1.52				4.89	1.42	3.73	160000.00	3.37	NO HAY	NO HAY				
			inyección impar 3500 psi	3.22				100.00	2.99	3.46	3.19	NO HAY	NO HAY	18.36				
			Inyección total 1500 psi	1.57				4.88	1.47	3.87	140000.00	3.58	NO HAY	NO HAY				
			Inyección par 1500 psi	3.21				100.00	3.06	3.81	3.27	NO HAY	NO HAY	19.26				
			inyección impar 1500 psi	1.48				4.90	1.38	3.59	140000.00	3.19	NO HAY	NO HAY				
			Inyección total 2500 psi	1.32				100.00	1.22	2.78	160000.00	NO HAY	NO HAY	15.87				
Inyección par 2500 psi	1.28	100.00	1.19	2.90				140000.00	NO HAY	NO HAY	15.25							
inyección impar 2500 psi	1.19	100.00	1.11	2.42				NO HAY	NO HAY	3.91	14.67							
Inyección total 3500 psi	3.04	100.00	2.70	2.78				2.71	NO HAY	NO HAY	15.87							
Inyección par 3500 psi	1.28	4.49	1.19	3.00				140000.00	2.59	NO HAY	NO HAY							
inyección impar 3500 psi	3.04	100.00	2.58	2.42				2.48	NO HAY	NO HAY	14.67							
Inyección total 1500 psi	1.32	4.49	1.22	3.11				160000.00	2.71	NO HAY	NO HAY							
Inyección par 1500 psi	3.04	100.00	2.64	2.90				3.19	NO HAY	NO HAY	15.25							
inyección impar 1500 psi	1.19	4.50	1.11	2.90				NO HAY	2.48	3.91	NO HAY							

Fuente: Elaboración propia. 2019.

6.2.8 Octava sección. Para la octava sección se tiene un OD de 5 1/2” en el casing, 2 3/8” de tubing, grado de tubería del casing P110, tubing N80, a una profundidad de 8000 ft. En la **Figura 56** se puede apreciar el esquema realizado

Figura 56. Octava sección de la simulación



Fuente: Elaboración propia. 2019.

Esta sección tiene las mismas condiciones que la anterior, solamente que varía la profundidad a un valor de 8000 ft. A continuación, en la **Tabla 13**, se tiene los resultados obtenidos por los casos de simulación, tanto para 3, como para 5 empaques.

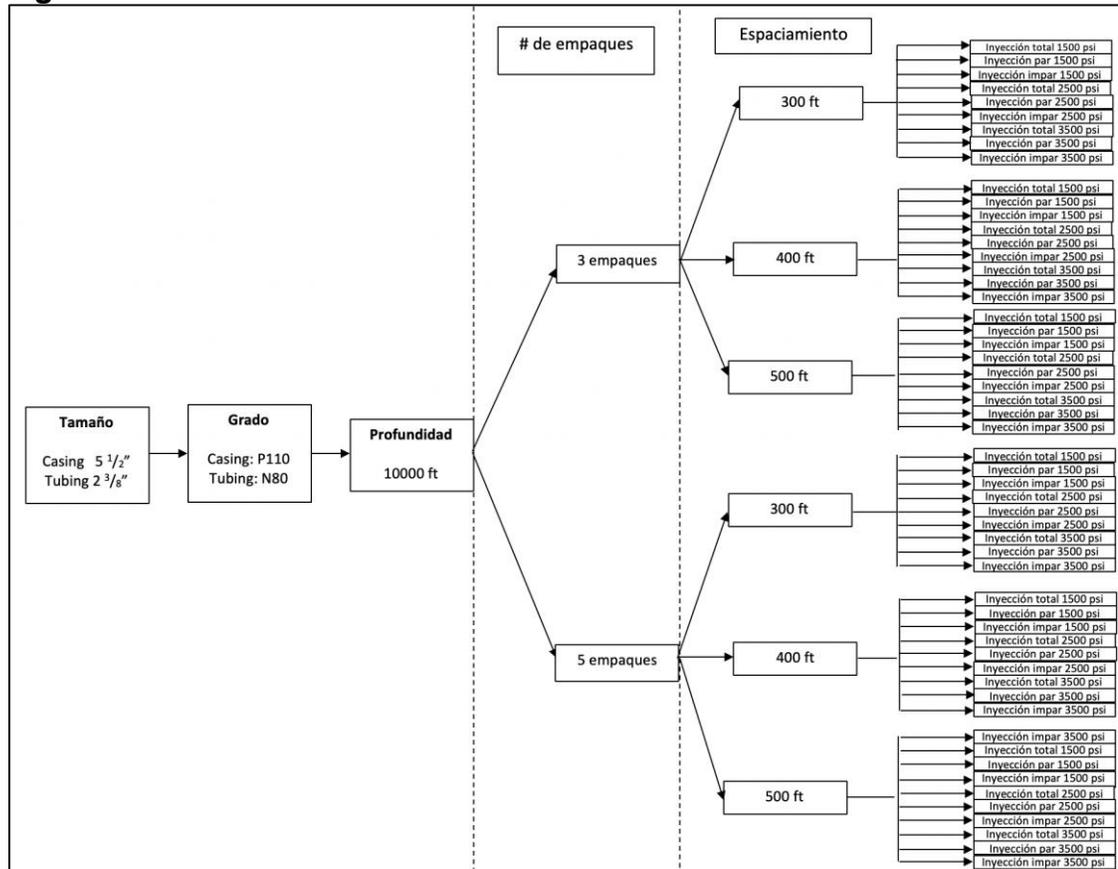
Tabla 13- Resultados octava sección.

Tamaño	Grado	Profundidad	# de empaques	Espaciamiento	Operación	Carga axial		Triaxial		Estallido Encima		colapso Encima	
						Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo
Tubing 2 3/8"	N80	8000 ft	3	300 ft	Inyección total 1500 psi	1.07	100,00	1.01	1.90	132086,96	NO HAY	NO HAY	16,39
					Inyección par 1500 psi	3,03	100,00	2,68	1,90	2,63	NO HAY	NO HAY	16,39
					Inyección impar 1500 psi	1,07	5,90	1,01	3,18	132086,96	2,63	NO HAY	NO HAY
					Inyección total 2500 psi	0,94	100,00	0,88	1,55	150956,52	NO HAY	NO HAY	13,96
					Inyección par 2500 psi	2,89	100,00	2,37	1,55	2,20	NO HAY	NO HAY	13,96
					Inyección impar 2500 psi	2,89	100,00	2,37	1,55	2,20	NO HAY	NO HAY	13,96
					Inyección total 3500 psi	0,81	100,00	0,76	1,24	NO HAY	NO HAY	FALLA	FALLA
					Inyección par 3500 psi	2,79	100,00	2,06	1,24	1,82	NO HAY	NO HAY	11,72
					Inyección impar 3500 psi	0,81	5,01	0,76	2,22	NO HAY	1,82	FALLA	FALLA
					Inyección total 1500 psi	1,09	100,00	1,02	1,96	132086,96	NO HAY	NO HAY	16,69
				Inyección par 1500 psi	3,04	100,00	2,71	1,96	2,69	NO HAY	NO HAY	16,69	
				Inyección impar 1500 psi	1,09	5,83	1,02	3,23	132086,96	2,69	NO HAY	NO HAY	
				Inyección total 2500 psi	0,95	100,00	0,89	1,59	150956,52	NO HAY	NO HAY	14,16	
				Inyección par 2500 psi	2,90	100,00	2,40	1,59	2,24	NO HAY	NO HAY	14,16	
				Inyección impar 2500 psi	0,95	5,31	0,89	2,71	150956,52	2,24	NO HAY	NO HAY	
				Inyección total 3500 psi	0,82	100,00	0,77	1,26	150956,52	NO HAY	FALLA	FALLA	
				Inyección par 3500 psi	2,79	100,00	2,09	1,26	1,84	NO HAY	NO HAY	11,87	
				Inyección impar 3500 psi	0,82	4,97	0,77	2,25	150956,52	1,84	FALLA	FALLA	
				Inyección total 1500 psi	1,10	100,00	1,04	2,01	84,98	85,03	NO HAY	NO HAY	
				Inyección par 1500 psi	3,05	100,00	2,70	2,01	2,66	85,03	NO HAY	NO HAY	
				Inyección impar 1500 psi	1,10	5,76	1,04	3,20	84,98	2,66	NO HAY	NO HAY	
				Inyección total 2500 psi	0,96	100,00	0,91	1,60	41,13	41,15	NO HAY	NO HAY	
				Inyección par 2500 psi	2,91	100,00	2,35	1,60	2,16	41,15	NO HAY	NO HAY	
				Inyección impar 2500 psi	0,96	5,26	0,91	2,62	41,13	2,16	NO HAY	NO HAY	
				Inyección total 3500 psi	0,83	100,00	0,78	1,27	41,25	41,27	FALLA	FALLA	
				Inyección par 3500 psi	2,80	100,00	2,04	1,27	1,79	41,27	NO HAY	NO HAY	
				Inyección impar 3500 psi	0,83	4,92	0,78	2,18	41,25	1,79	FALLA	FALLA	
				Inyección total 1500 psi	1,25	100,00	1,17	4,37	140000,00	112,00	NO HAY	NO HAY	
				Inyección par 1500 psi	1,22	100,00	1,15	3,89	140000,00	NO HAY	NO HAY	16,76	
				Inyección impar 1500 psi	1,22	100,00	1,14	3,62	140000,00	NO HAY	NO HAY	16,31	
			Inyección total 2500 psi	2,45	100,00	2,44	4,37	2,97	112,00	NO HAY	NO HAY		
			Inyección par 2500 psi	1,23	3,45	1,15	2,96	140000,00	2,88	NO HAY	NO HAY		
			Inyección impar 2500 psi	1,23	100,00	2,41	3,62	2,79	NO HAY	NO HAY	16,31		
			Inyección total 3500 psi	1,25	3,43	1,17	3,00	140000,00	2,97	NO HAY	NO HAY		
			Inyección par 3500 psi	2,46	100,00	2,43	3,89	2,88	NO HAY	NO HAY	16,76		
			Inyección impar 3500 psi	1,22	3,47	1,14	2,92	140000,00	2,79	NO HAY	NO HAY		
			Inyección total 1500 psi	1,11	100,00	1,03	3,03	140000,00	NO HAY	NO HAY	14,52		
			Inyección par 1500 psi	1,09	100,00	1,02	2,88	160000,00	NO HAY	NO HAY	14,20		
			Inyección impar 1500 psi	1,08	100,00	1,01	2,75	160000,00	NO HAY	NO HAY	13,89		
			Inyección total 2500 psi	2,33	100,00	2,22	3,03	2,45	NO HAY	NO HAY	14,52		
			Inyección par 2500 psi	1,09	3,20	1,02	2,58	160000,00	2,39	NO HAY	NO HAY		
			Inyección impar 2500 psi	2,34	100,00	2,19	2,75	2,33	NO HAY	NO HAY	13,89		
			Inyección total 3500 psi	1,11	3,19	1,03	2,61	140000,00	2,45	NO HAY	NO HAY		
			Inyección par 3500 psi	2,33	100,00	2,21	2,88	2,39	NO HAY	NO HAY	14,20		
			Inyección impar 3500 psi	1,08	3,21	1,01	2,54	160000,00	2,33	NO HAY	NO HAY		
			Inyección total 1500 psi	0,97	100,00	0,91	2,20	160000,00	NO HAY	NO HAY	12,11		
			Inyección par 1500 psi	0,96	100,00	0,90	2,12	160000,00	NO HAY	NO HAY	11,88		
			Inyección impar 1500 psi	0,95	100,00	0,89	2,05	160000,00	NO HAY	NO HAY	11,67		
			Inyección total 2500 psi	2,23	100,00	2,00	2,20	2,01	NO HAY	NO HAY	12,11		
			Inyección par 2500 psi	0,96	3,02	0,90	2,22	160000,00	1,97	NO HAY	NO HAY		
			Inyección impar 2500 psi	2,24	100,00	1,96	2,05	1,93	NO HAY	NO HAY	11,67		
			Inyección total 3500 psi	0,97	3,01	0,91	2,25	160000,00	2,01	NO HAY	NO HAY		
			Inyección par 3500 psi	2,24	100,00	1,98	2,12	1,97	NO HAY	NO HAY	11,88		
			Inyección impar 3500 psi	0,95	3,03	0,89	2,19	160000,00	1,93	NO HAY	NO HAY		
			Inyección total 1500 psi	1,28	100,00	1,20	4,72	140000,00	NO HAY	NO HAY	17,93		
			Inyección par 1500 psi	1,25	100,00	1,18	4,27	140000,00	NO HAY	NO HAY	17,24		
			Inyección impar 1500 psi	1,27	100,00	1,20	4,12	55,98	56,00	NO HAY	NO HAY		
			Inyección total 2500 psi	2,45	100,00	2,47	4,72	3,11	NO HAY	NO HAY	17,93		
			Inyección par 2500 psi	1,25	3,41	1,18	2,99	140000,00	2,97	NO HAY	NO HAY		
			Inyección impar 2500 psi	2,48	100,00	2,43	4,12	2,85	56,00	NO HAY	NO HAY		
			Inyección total 3500 psi	1,28	3,39	1,20	3,05	140000,00	3,11	NO HAY	NO HAY		
			Inyección par 3500 psi	2,46	100,00	2,45	4,27	2,97	NO HAY	NO HAY	17,24		
			Inyección impar 3500 psi	1,27	3,44	1,20	2,94	55,98	2,85	NO HAY	NO HAY		
			Inyección total 1500 psi	1,13	100,00	1,05	3,27	160000,00	NO HAY	NO HAY	14,96		
			Inyección par 1500 psi	1,11	100,00	1,04	3,05	160000,00	NO HAY	NO HAY	14,52		
			Inyección impar 1500 psi	1,09	100,00	1,02	2,85	140000,00	NO HAY	NO HAY	14,10		
			Inyección total 2500 psi	2,33	100,00	2,25	3,27	2,54	NO HAY	NO HAY	14,96		
			Inyección par 2500 psi	1,11	3,17	1,04	2,61	160000,00	2,45	NO HAY	NO HAY		
			Inyección impar 2500 psi	2,35	100,00	2,21	2,85	2,37	NO HAY	NO HAY	14,10		
			Inyección total 3500 psi	1,13	3,16	1,05	2,66	160000,00	2,54	NO HAY	NO HAY		
			Inyección par 3500 psi	2,34	100,00	2,23	3,05	2,45	NO HAY	NO HAY	14,52		
			Inyección impar 3500 psi	1,09	3,18	1,02	2,56	140000,00	2,37	NO HAY	NO HAY		
			Inyección total 1500 psi	0,99	100,00	0,92	2,32	140000,00	NO HAY	NO HAY	12,42		
			Inyección par 1500 psi	0,98	100,00	0,91	2,21	160000,00	NO HAY	NO HAY	12,11		
			Inyección impar 1500 psi	0,96	100,00	0,90	2,10	NO HAY	NO HAY	-0,98	11,80		
			Inyección total 2500 psi	2,24	100,00	2,03	2,32	2,06	NO HAY	NO HAY	12,42		
			Inyección par 2500 psi	0,98	3,00	0,91	2,25	160000,00	2,01	NO HAY	NO HAY		
			Inyección impar 2500 psi	2,25	100,00	1,98	2,10	1,95	NO HAY	NO HAY	11,80		
			Inyección total 3500 psi	0,99	2,99	0,92	2,29	140000,00	2,06	NO HAY	NO HAY		
			Inyección par 3500 psi	0,96	3,01	0,90	2,21	NO HAY	1,95	-0,98	NO HAY		
			Inyección impar 3500 psi	1,31	100,00	1,23	5,38	140000,00	NO HAY	NO HAY	18,67		
			Inyección total 1500 psi	1,28	100,00	1,20	4,61	140000,00	NO HAY	NO HAY	17,75		
			Inyección par 1500 psi	1,25	100,00	1,17	4,03	140000,00	NO HAY	NO HAY	16,92		
			Inyección impar 1500 psi	2,46	100,00	2,50	5,38	3,25	NO HAY	NO HAY	18,67		
			Inyección total 2500 psi	1,28	3,37	1,20	3,02	140000,00	3,07	NO HAY	NO HAY		
			Inyección par 2500 psi	2,48	100,00	2,45	4,03	2,91	NO HAY	NO HAY	16,92		
			Inyección impar 2500 psi	1,31	3,35	1,23	3,09	140000,00	3,25	NO HAY	NO HAY		
			Inyección total 3500 psi	2,47	100,00	2,48	4,61	3,07	NO HAY	NO HAY	17,75		
			Inyección par 3500 psi	1,25	3,40	1,17	2,96	140000,00	2,91	NO HAY	NO HAY		
			Inyección impar 3500 psi	1,15	100,00	1,08	3,55	160000,00	NO HAY	NO HAY	15,44		
			Inyección total 1500 psi	1,13	100,00	1,05	3,23	140000,00	NO HAY	NO HAY	14,85		
			Inyección par 1500 psi	1,10	100,00	1,03	2,96	140000,00	NO HAY	NO HAY	14,30		
			Inyección impar 1500 psi	2,34	100,00	2,28	3,55	2,63	NO HAY	NO HAY	15,44		
			Inyección total 2500 psi	1,13	3,14	1,05	2,64	140000,00	2,51	NO HAY	NO HAY		
			Inyección par 2500 psi	2,36	100,00	2,23	2,96	2,41	NO HAY	NO HAY	14,30		
			Inyección impar 2500 psi	1,31	3,35	1,23	3,09	140000,00	3,25	NO HAY	NO HAY		
			Inyección total 3500 psi	2,47	100,00	2,48	4,61	3,07	NO HAY	NO HAY	17,75		
			Inyección par 3500 psi	1,25	3,40	1,17	2,96	140000,00	2,91	NO HAY	NO HAY		
			Inyección impar 3500 psi	0,94	100,00	0,88	2,07	140000,00	NO HAY	NO HAY	12,75		
			Inyección total 1500 psi	0,92	100,00	0,86	1,95	160000,00	NO HAY	NO HAY	12,34		
Inyección par 1500 psi	0,90	100,00	0,84	1,84	160000,00	NO HAY	NO HAY	11,96					
Inyección impar 1500 psi	2,21	100,00	2,04	2,07	2,12	NO HAY	NO HAY	12,75					
Inyección total 2500 psi	0,92	3,03	0,86	2,29	160000,00	2,05	NO HAY	NO HAY					
Inyección par 2500 psi	2,23	100,00	1,98	1,84	1,98	NO HAY	NO HAY	11,96					
Inyección impar 2500 psi	0,94	3,02	0,88	2,34	140000,00	2,12	NO HAY	NO HAY					
Inyección total 3500 psi	2,22	100,00	2,01	1,95	2,05	NO HAY	NO HAY	12,34					
Inyección par 3500 psi	0,90	3,04	0,84	2,23	160000,00	1,98	NO HAY	NO HAY					

Fuente: Elaboración propia. 2019.

6.2.9 Novena sección. Para la novena sección se tiene un OD de 5 1/2” en el casing, 2 3/8” de tubing, grado de tubería del casing P110, tubing N80, a una profundidad de 10000 ft. En la **Figura 57** se puede apreciar el esquema realizado.

Figura 57. Novena sección de la simulación



Fuente: Elaboración propia. 2019.

Para este caso se tiene una profundidad de 10000ft, por lo que los factores de seguridad se ven disminuidos considerablemente, en la **Tabla 14** se pueden ver los resultados obtenidos por las simulaciones.

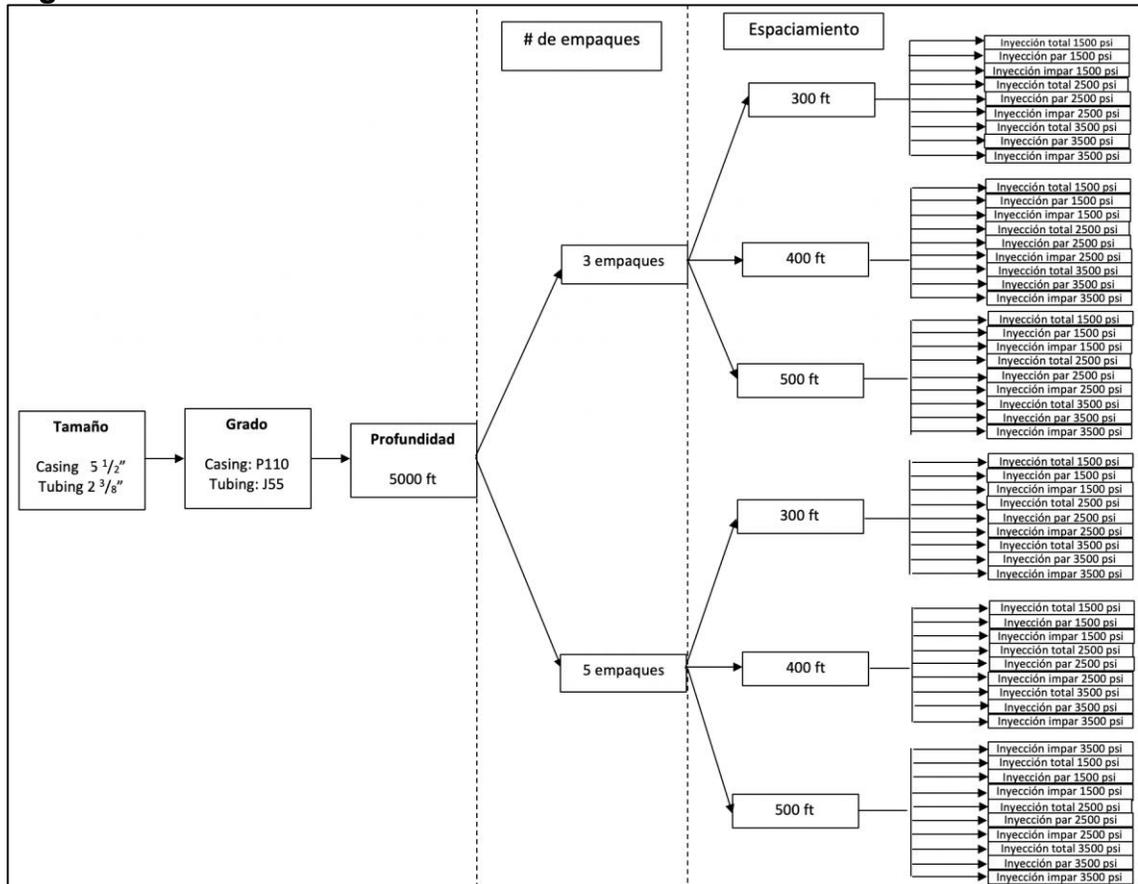
Tabla 14. Resultados novena sección

Tamaño	Grado	Profundidad	# de paquetes	Espaciamiento	Operación	Carga axial		Triaxial		Estallido Encima		colapso Encima		
						Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo	
Tubing 2 3/8"	N80	10000 ft	3	300 ft	Inyección total 1500 psi	0.90	100,00	0.85	1,61	132086,96	NO HAY	NO HAY	13,87	
					Inyección par 1500 psi	2,65	100,00	2,28	1,61	2,19	NO HAY	NO HAY	13,87	
					Inyección impar 1500 psi	0.90	4,60	0.85	2,63	132086,96	2,19	NO HAY	NO HAY	
					Inyección total 2500 psi	0.81	100,00	0.77	1,36	51,71	51,73	FALLA	FALLA	
					Inyección par 2500 psi	2,52	100,00	2,01	1,36	1,83	51,73	NO HAY	NO HAY	
					Inyección impar 2500 psi	0.81	4,16	0.77	2,22	51,71	1,83	FALLA	FALLA	
					Inyección total 3500 psi	0.73	100,00	0.66	1,12	NO HAY	NO HAY	FALLA	FALLA	
					Inyección par 3500 psi	2,79	100,00	1,86	1,03	1,59	NO HAY	NO HAY	10,35	
					Inyección impar 3500 psi	0.71	3,84	0.66	1,93	NO HAY	1,59	FALLA	FALLA	
					Inyección total 1500 psi	0.92	100,00	0.86	1,66	75478,26	NO HAY	NO HAY	14,09	
				Inyección par 1500 psi	2,65	100,00	2,30	1,66	2,22	NO HAY	NO HAY	14,09		
				Inyección impar 1500 psi	0.92	4,55	0.86	2,66	75478,26	2,22	NO HAY	NO HAY		
				Inyección total 2500 psi	0.82	100,00	0.77	1,40	150956,52	NO HAY	FALLA	FALLA		
				Inyección par 2500 psi	2,52	100,00	2,08	1,40	1,93	NO HAY	NO HAY	12,36		
				Inyección impar 2500 psi	0.82	4,17	0.77	2,32	150956,52	1,93	FALLA	FALLA		
				Inyección total 3500 psi	0.72	100,00	0.68	1,14	NO HAY	NO HAY	FALLA	FALLA		
				Inyección par 3500 psi	2,44	100,00	1,84	1,14	1,63	NO HAY	NO HAY	10,56		
				Inyección impar 3500 psi	2,44	100,00	1,84	1,14	1,63	NO HAY	NO HAY	10,56		
				Inyección total 1500 psi	0.93	100,00	0.87	1,38	117410,63	NO HAY	NO HAY	6,31		
				Inyección par 1500 psi	2,65	100,00	2,32	1,38	2,26	NO HAY	NO HAY	6,31		
				Inyección impar 1500 psi	0.93	4,50	0.87	2,70	117410,63	2,26	NO HAY	NO HAY		
				Inyección total 2500 psi	0.83	100,00	0.78	1,43	132086,96	NO HAY	FALLA	FALLA		
				Inyección par 2500 psi	2,53	100,00	2,10	1,43	1,95	NO HAY	NO HAY	12,52		
				Inyección impar 2500 psi	0.83	4,14	0.78	2,35	132086,96	1,95	FALLA	FALLA		
				Inyección total 3500 psi	0.73	100,00	0.68	1,16	132086,96	NO HAY	FALLA	FALLA		
				Inyección par 3500 psi	2,45	100,00	1,85	1,16	1,65	NO HAY	NO HAY	10,69		
				Inyección impar 3500 psi	0.73	3,93	0.68	2,00	132086,96	1,65	FALLA	FALLA		
				5	300 ft	Inyección total 1500 psi	1.05	100,00	0.98	3,49	140000,00	11200,00	NO HAY	NO HAY
						Inyección par 1500 psi	1.04	100,00	0.97	3,27	140000,00	NO HAY	NO HAY	14,13
						Inyección impar 1500 psi	1.03	100,00	0.96	3,07	140000,00	NO HAY	NO HAY	13,80
			Inyección total 2500 psi			2.10	100,00	2.07	3,49	2,44	11200,00	NO HAY	NO HAY	
			Inyección par 2500 psi			1.04	2,80	0.97	2,43	140000,00	2,38	NO HAY	NO HAY	
			Inyección impar 2500 psi			2.12	100,00	2.05	3,07	NO HAY	NO HAY	NO HAY	13,80	
			Inyección total 3500 psi			1.05	2,78	0.98	2,46	140000,00	2,44	NO HAY	NO HAY	
			Inyección par 3500 psi			2.11	100,00	2.06	3,27	2,38	NO HAY	NO HAY	14,13	
			Inyección impar 3500 psi			1.03	2,82	0.96	2,40	140000,00	2,32	NO HAY	NO HAY	
			Inyección total 1500 psi			0.95	100,00	0.89	2,74	140000,00	NO HAY	NO HAY	12,62	
			Inyección par 1500 psi		0.94	100,00	0.88	2,61	160000,00	NO HAY	NO HAY	12,38		
			Inyección impar 1500 psi		0.93	100,00	0.87	2,50	160000,00	NO HAY	NO HAY	12,15		
			Inyección total 2500 psi		1.99	100,00	1.91	2,74	2,10	NO HAY	NO HAY	12,62		
			Inyección par 2500 psi		0.96	2,60	0.88	2,17	160000,00	2,06	NO HAY	NO HAY		
			Inyección impar 2500 psi		2.00	100,00	1.88	2,50	2,01	NO HAY	NO HAY	12,15		
			Inyección total 3500 psi		0.95	2,59	0.87	2,37	NO HAY	2,44	-0.90	NO HAY		
			Inyección par 3500 psi		2.00	100,00	1.98	2,74	2,38	NO HAY	NO HAY	7,50		
			Inyección impar 3500 psi		0.93	2,61	0.85	2,32	NO HAY	2,32	-1.29	NO HAY		
			Inyección total 1500 psi		0.84	100,00	0.78	2,00	NO HAY	NO HAY	FALLA	FALLA		
			Inyección par 1500 psi		0.84	100,00	0.79	1,97	160000,00	NO HAY	FALLA	FALLA		
			Inyección impar 1500 psi		0.83	100,00	0.78	1,90	140000,00	NO HAY	FALLA	FALLA		
			Inyección total 2500 psi		1.92	100,00	1.74	2,00	1,77	NO HAY	NO HAY	9,85		
			Inyección par 2500 psi		0.84	2,48	0.79	1,92	160000,00	1,73	FALLA	FALLA		
			Inyección impar 2500 psi		1.93	100,00	1.71	1,90	1,70	NO HAY	NO HAY	10,41		
			Inyección total 3500 psi		0.84	2,48	0.78	1,94	NO HAY	1,77	FALLA	FALLA		
			Inyección par 3500 psi		1.93	100,00	1.73	1,97	1,73	NO HAY	NO HAY	10,58		
			Inyección impar 3500 psi		0.83	2,49	0.78	1,90	140000,00	1,70	FALLA	FALLA		
			5		400 ft	Inyección total 1500 psi	0.84	100,00	0.74	2,14	NO HAY	NO HAY	FALLA	FALLA
						Inyección par 1500 psi	0.84	100,00	0.75	2,11	NO HAY	NO HAY	FALLA	FALLA
						Inyección impar 1500 psi	0.83	100,00	0.74	2,04	NO HAY	NO HAY	FALLA	FALLA
				Inyección total 2500 psi		1.92	100,00	1.96	2,14	2,53	NO HAY	NO HAY	4,19	
				Inyección par 2500 psi		0.84	2,48	0.75	2,11	NO HAY	2,44	FALLA	FALLA	
				Inyección impar 2500 psi		1.93	100,00	1.93	2,04	2,36	NO HAY	NO HAY	4,42	
				Inyección total 3500 psi		0.84	2,48	0.74	2,34	NO HAY	2,53	FALLA	FALLA	
				Inyección par 3500 psi		1.93	100,00	1.95	2,11	2,44	NO HAY	NO HAY	4,39	
				Inyección impar 3500 psi		0.83	2,49	0.74	2,28	NO HAY	2,36	FALLA	FALLA	
				Inyección total 1500 psi		0.84	100,00	0.76	2,11	NO HAY	NO HAY	FALLA	FALLA	
				Inyección par 1500 psi	0.84	100,00	0.76	2,08	NO HAY	NO HAY	FALLA	FALLA		
				Inyección impar 1500 psi	0.83	100,00	0.76	2,00	NO HAY	NO HAY	FALLA	FALLA		
				Inyección total 2500 psi	1.92	100,00	1.88	2,11	2,16	NO HAY	NO HAY	5,42		
				Inyección par 2500 psi	0.84	2,48	0.76	2,15	NO HAY	2,30	FALLA	FALLA		
				Inyección impar 2500 psi	1.93	100,00	1.85	2,00	2,04	NO HAY	NO HAY	5,75		
				Inyección total 3500 psi	0.84	2,48	0.76	2,18	NO HAY	2,16	FALLA	FALLA		
				Inyección par 3500 psi	1.93	100,00	1.87	2,08	2,10	NO HAY	NO HAY	5,72		
				Inyección impar 3500 psi	0.83	2,49	0.76	2,12	NO HAY	2,04	FALLA	FALLA		
				Inyección total 1500 psi	0.86	100,00	0.80	2,13	160000,00	NO HAY	FALLA	FALLA		
				Inyección par 1500 psi	0.85	100,00	0.79	2,04	32941,18	NO HAY	FALLA	FALLA		
				Inyección impar 1500 psi	0.86	100,00	0.81	2,09	37,32	28,72	FALLA	FALLA		
				Inyección total 2500 psi	1.92	100,00	1.76	2,13	1,81	NO HAY	NO HAY	11,00		
				Inyección par 2500 psi	0.85	2,47	0.79	1,94	32941,18	1,77	FALLA	FALLA		
				Inyección impar 2500 psi	1.94	100,00	1.72	2,09	1,72	NO HAY	NO HAY	NO HAY		
				Inyección total 3500 psi	0.86	2,46	0.80	1,96	160000,00	1,81	FALLA	FALLA		
				Inyección par 3500 psi	1.93	100,00	1.74	2,04	1,77	NO HAY	NO HAY	10,75		
				Inyección impar 3500 psi	0.86	2,48	0.81	1,91	37,32	1,72	FALLA	FALLA		
				5	500 ft	Inyección total 1500 psi	1.09	100,00	1.02	4,30	140000,00	NO HAY	NO HAY	15,46
						Inyección par 1500 psi	1.07	100,00	1.00	3,78	140000,00	NO HAY	NO HAY	14,83
						Inyección impar 1500 psi	1.05	100,00	0.98	3,37	140000,00	NO HAY	NO HAY	14,24
			Inyección total 2500 psi			2.10	100,00	1.86	3,18	1,85	6,30	NO HAY	NO HAY	
			Inyección par 2500 psi			1.07	2,74	1.05	2,03	6,35	1,80	NO HAY	NO HAY	
			Inyección impar 2500 psi			2.12	100,00	1.81	2,69	1,74	6,39	NO HAY	NO HAY	
			Inyección total 3500 psi			1.09	2,72	1.07	2,07	6,30	1,85	NO HAY	NO HAY	
			Inyección par 3500 psi			2.11	100,00	1.84	2,92	1,80	6,35	NO HAY	NO HAY	
			Inyección impar 3500 psi			1.05	2,77	1.02	1,99	6,39	1,74	NO HAY	NO HAY	
			Inyección total 1500 psi			0.98	100,00	0.92	3,16	160000,00	NO HAY	NO HAY	13,32	
			Inyección par 1500 psi		0.96	100,00	0.90	2,90	140000,00	NO HAY	NO HAY	12,87		
			Inyección impar 1500 psi		0.95	100,00	0.88	2,67	140000,00	NO HAY	NO HAY	12,46		
			Inyección total 2500 psi		2.00	100,00	1.95	3,16	2,33	NO HAY	NO HAY	13,32		
			Inyección par 2500 psi		0.96	2,56	0.90	2,21	140000,00	2,15	NO HAY	NO HAY		
			Inyección impar 2500 psi		2.01	100,00	1.91	2,67	2,07	NO HAY	NO HAY	12,46		
			Inyección total 3500 psi		0.98	2,55	0.92	2,25	160000,00	2,23	NO HAY	NO HAY		
			Inyección par 3500 psi		2.00	100,00	1.93	2,90	2,15	NO HAY	NO HAY	12,87		
			Inyección impar 3500 psi		0.95	2,57	0.88	2,17	140000,00	2,07	NO HAY	NO HAY		
			Inyección total 1500 psi		0.87	100,00	0.81	2,27	160000,00	NO HAY	NO HAY	11,26		
Inyección par 1500 psi	0.86	100,00	0.80		2,13	140000,00	NO HAY	FALLA	FALLA					
Inyección impar 1500 psi	0.85	100,00	0.79		2,00	23333,33	NO HAY	FALLA	FALLA					
Inyección total 2500 psi	1.93	100,00	1.78		2,27	1,85	NO HAY	NO HAY	11,26					
Inyección par 2500 psi	0.86	2,45	0.80		1,95	140000,00	1,80	FALLA	FALLA					
Inyección impar 2500 psi	1.94	100,00	1.74		2,00	1,74	NO HAY	NO HAY	10,64					
Inyección total 3500 psi	0.87	2,43	0.81		1,99	160000,00	1,85	NO HAY	NO HAY					
Inyección par 3500 psi	1.93	100,00	1.76		2,13	1,80	NO HAY	NO HAY	10,94					
Inyección impar 3500 psi	0.85	2,46	0.79		1,92	23333,33	1,74	FALLA	FALLA					

Fuente: Elaboración propia. 2019.

6.2.10 Décima sección. Para la décima sección se tiene un OD de 5 1/2" en el casing, 2 3/8" de tubing, grado de tubería del casing P110, tubing J55, a una profundidad de 5000 ft. En la **Figura 58** se puede apreciar el esquema realizado.

Figura 58. Décima sección de la simulación



Fuente: Elaboración propia. 2019.

Esta sección diverge de la anterior al tener un grado de tubería y profundidad diferente, dentro de la **Tabla 15** se puede observar los resultados obtenidos por las simulaciones con las respectivas correcciones.

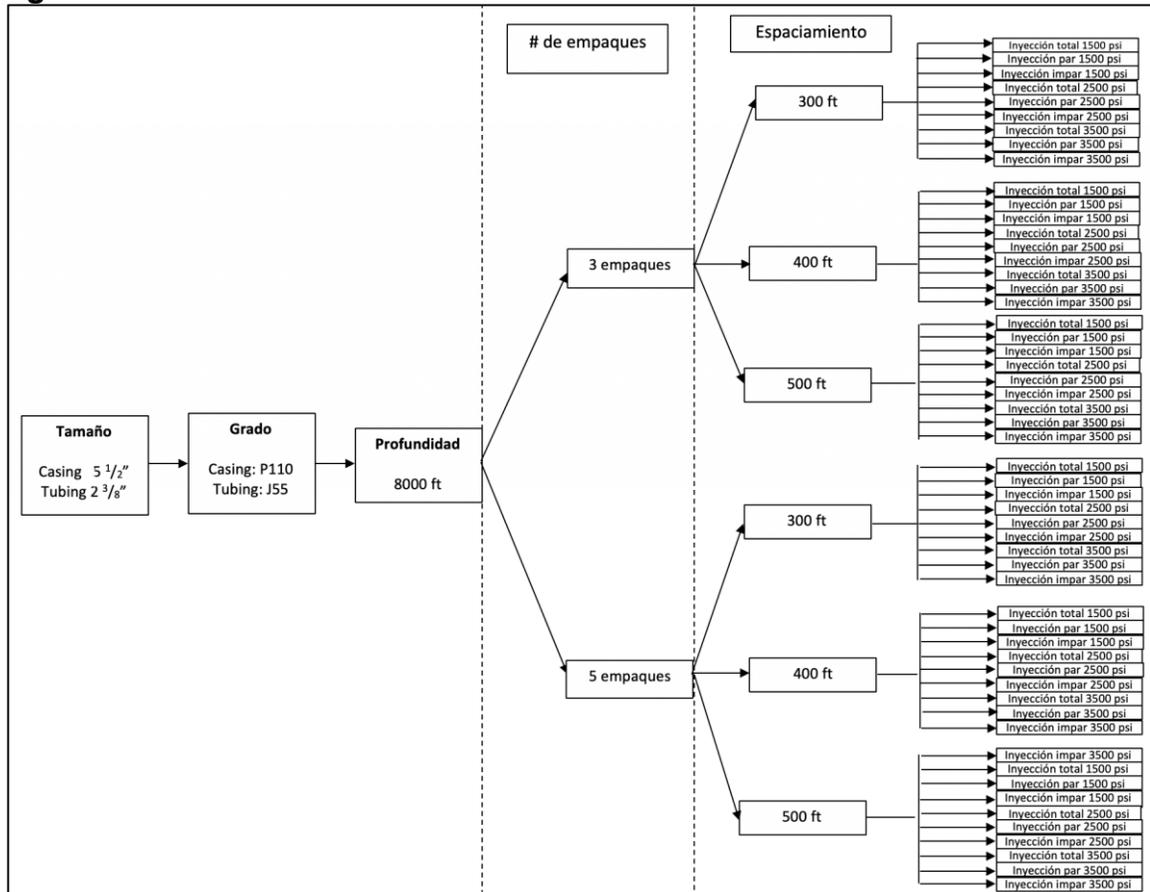
Tabla 15. Resultados décima sección.

Tamaño	Grado	Profundidad	# de empaques	Espaciamiento	Operación	Carga axial		Triaxial		Estallido Encima		colapso Encima						
						Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo					
Tubing 2 3/8"	J55	5000 ft	3	300 ft	Inyección total 1500 psi	1.37	100,00	1,29	2,84	117410,63	NO HAY	NO HAY	21,96					
					Inyección par 1500 psi	3,09	100,00	3,08	2,84	3,69	NO HAY	NO HAY	21,96					
					inyección impar 1500 psi	1.37	5,96	1,29	4,22	117410,63	3,69	NO HAY	NO HAY					
					Inyección total 2500 psi	1.13	100,00	1,06	1,98	117410,63	NO HAY	NO HAY	17,11					
					Inyección par 2500 psi	2,90	100,00	2,67	1,98	2,76	4594,33	NO HAY	NO HAY					
					inyección impar 2500 psi	1.13	5,26	1,06	3,27	117410,63	2,76	NO HAY	NO HAY					
					Inyección total 3500 psi	0.95	100,00	0.89	1,49	132086,96	NO HAY	NO HAY	13,88					
					Inyección par 3500 psi	2,74	100,00	2,31	1,49	2,19	NO HAY	NO HAY	13,88					
					inyección impar 3500 psi	0.95	4,77	0.89	2,64	132086,96	2,19	NO HAY	NO HAY					
					Inyección total 1500 psi	1.39	100,00	1,32	2,98	117410,63	NO HAY	NO HAY	22,53					
					Inyección par 1500 psi	3,11	100,00	3,12	2,98	3,80	NO HAY	NO HAY	22,53					
					inyección impar 1500 psi	1.39	5,88	1,32	4,30	117410,63	3,80	NO HAY	NO HAY					
					Inyección total 2500 psi	1.14	100,00	1,08	2,05	117410,63	10566,96	NO HAY	NO HAY					
					Inyección par 2500 psi	2,92	100,00	2,71	2,05	2,83	10673,69	NO HAY	NO HAY					
					inyección impar 2500 psi	1.14	5,20	1,08	3,33	117410,63	2,83	NO HAY	NO HAY					
					Inyección total 3500 psi	0.96	100,00	0.91	1,53	96063,24	NO HAY	NO HAY	14,10					
					Inyección par 3500 psi	2,76	100,00	2,34	1,53	2,23	NO HAY	NO HAY	14,10					
					inyección impar 3500 psi	0.96	4,72	0.91	2,68	96063,24	2,23	NO HAY	NO HAY					
					Inyección total 1500 psi	1.42	100,00	1,34	3,14	132086,96	NO HAY	NO HAY	23,13					
					Inyección par 1500 psi	3,14	100,00	3,16	3,14	3,92	NO HAY	NO HAY	23,13					
					inyección impar 1500 psi	1.42	5,80	1,34	4,38	132086,96	3,92	NO HAY	NO HAY					
					Inyección total 2500 psi	1.16	100,00	1,09	2,12	132086,96	NO HAY	NO HAY	17,79					
					Inyección par 2500 psi	2,94	100,00	2,75	2,12	2,89	NO HAY	NO HAY	17,79					
					inyección impar 2500 psi	1.16	5,14	1,09	3,38	132086,96	2,89	NO HAY	NO HAY					
					Inyección total 3500 psi	1.86	100,00	1,92	3,43	3,08	3,08	NO HAY	NO HAY					
					Inyección par 3500 psi	2,78	100,00	2,38	3,43	2,27	3,08	NO HAY	NO HAY					
					inyección impar 3500 psi	1.86	4,67	1,92	2,72	3,08	2,27	NO HAY	NO HAY					
					Tubing 2 3/8"	J55	5000 ft	3	400 ft	Inyección total 1500 psi	1.44	100,00	1,36	3,27	117410,63	NO HAY	NO HAY	23,76
										Inyección par 1500 psi	1,40	100,00	1,33	3,04	117410,63	NO HAY	NO HAY	22,83
										inyección impar 1500 psi	1.37	100,00	1,29	2,84	132086,96	NO HAY	NO HAY	21,96
			Inyección total 2500 psi	1.14						100,00	1,08	2,12	132086,96	4,04	NO HAY	NO HAY		
			Inyección par 2500 psi	3,09						100,00	3,08	2,84	3,69	NO HAY	NO HAY	21,96		
			inyección impar 2500 psi	1.14						5,94	1,36	4,51	117410,63	4,04	NO HAY	NO HAY		
			Inyección total 3500 psi	3,09						100,00	3,11	3,04	3,86	NO HAY	NO HAY	22,83		
			Inyección par 3500 psi	1,37						5,96	1,29	4,22	132086,96	3,69	NO HAY	NO HAY		
			inyección impar 3500 psi	1.42						100,00	1,40	3,09	10,99	11,00	NO HAY	NO HAY		
			Inyección total 2500 psi	1.36						100,00	1,34	2,89	11,03	11,03	NO HAY	NO HAY		
			Inyección par 2500 psi	3,09						100,00	3,10	2,71	11,06	11,07	NO HAY	NO HAY		
			inyección impar 2500 psi	2,90						100,00	2,75	3,09	2,96	11,00	NO HAY	NO HAY		
			Inyección total 3500 psi	1.36						5,26	1,34	3,37	11,03	2,86	NO HAY	NO HAY		
			Inyección par 3500 psi	2,90						100,00	2,67	2,71	2,76	11,07	NO HAY	NO HAY		
			inyección impar 3500 psi	1,42						5,27	1,40	3,46	10,99	2,96	NO HAY	NO HAY		
			Inyección total 1500 psi	2,90						100,00	2,71	2,89	2,86	11,03	NO HAY	NO HAY		
			Inyección par 1500 psi	1.33						5,26	1,30	3,27	11,06	2,76	NO HAY	NO HAY		
			inyección impar 1500 psi	0.99						100,00	0.93	1,60	132086,96	NO HAY	NO HAY	14,56		
			Inyección total 3500 psi	0.95						100,00	0.89	1,51	NO HAY	NO HAY	-1,33	12,62		
			Inyección par 3500 psi	2,74						100,00	2,39	1,60	132086,96	NO HAY	NO HAY	13,88		
			inyección impar 3500 psi	0.95						4,77	0.89	2,70	NO HAY	2,25	-1,33	NO HAY		
			Inyección total 1500 psi	1.21						100,00	1,14	2,34	132086,96	NO HAY	NO HAY	18,92		
			Inyección par 1500 psi	1.17						100,00	1,11	2,18	132086,96	NO HAY	NO HAY	18,15		
			inyección impar 1500 psi	1.14						100,00	1,08	2,05	132086,96	NO HAY	NO HAY	17,44		
			Inyección total 2500 psi	2,92						100,00	2,71	2,05	2,83	NO HAY	NO HAY	17,44		
			Inyección par 2500 psi	1.21						5,21	1,14	3,59	132086,96	3,10	NO HAY	NO HAY		
			inyección impar 2500 psi	2,92						100,00	2,76	2,18	2,96	NO HAY	NO HAY	18,15		
			Inyección total 3500 psi	1.14						5,20	1,08	3,33	132086,96	2,83	NO HAY	NO HAY		
			Inyección par 3500 psi	1.01						100,00	0.95	1,69	132086,96	NO HAY	NO HAY	15,05		
			inyección impar 3500 psi	0.99						100,00	0.93	1,61	132086,96	NO HAY	NO HAY	14,56		
			Inyección total 1500 psi	0.96				100,00	0.91	1,53	117410,63	NO HAY	NO HAY	14,10				
			Inyección par 1500 psi	1.01				100,00	0.95	1,69	132086,96	NO HAY	NO HAY	15,05				
			inyección impar 1500 psi	0.99				100,00	0.93	1,61	132086,96	NO HAY	NO HAY	14,56				
			Inyección total 2500 psi	0.96				100,00	0.91	1,53	117410,63	NO HAY	NO HAY	14,10				
			Inyección par 2500 psi	1.01				4,73	0.95	2,85	132086,96	2,39	NO HAY	NO HAY				
			inyección impar 2500 psi	2,76				100,00	2,39	1,61	2,31	NO HAY	NO HAY	14,56				
			Inyección total 3500 psi	0.96				4,72	0.91	2,68	117410,63	2,23	NO HAY	NO HAY				
			Inyección par 3500 psi	1.55				100,00	1,47	4,17	117410,63	NO HAY	NO HAY	26,67				
			inyección impar 3500 psi	1,48				100,00	1,41	3,59	132086,96	NO HAY	NO HAY	24,77				
			Inyección total 1500 psi	1,42				100,00	1,34	3,14	117410,63	NO HAY	NO HAY	23,13				
			Inyección par 1500 psi	3,14				100,00	3,25	4,17	4,65	NO HAY	NO HAY	26,67				
			inyección impar 1500 psi	1,48				5,79	1,41	4,62	132086,96	4,25	NO HAY	NO HAY				
			Inyección total 2500 psi	3,14				100,00	3,16	3,14	3,92	NO HAY	NO HAY	23,13				
			Inyección par 2500 psi	1,55				5,79	1,47	4,87	117410,63	4,65	NO HAY	NO HAY				
			inyección impar 2500 psi	3,14				100,00	3,21	3,59	4,25	NO HAY	NO HAY	24,77				
			Inyección total 3500 psi	1,42				5,81	1,34	4,38	117410,63	3,92	NO HAY	NO HAY				
			Inyección total 1500 psi	1.25				100,00	1,18	2,52	132086,96	NO HAY	NO HAY	19,76				
			Inyección par 1500 psi	1.20				100,00	1,14	2,31	132086,96	NO HAY	NO HAY	18,73				
			inyección impar 1500 psi	1.16				100,00	1,09	2,12	132086,96	NO HAY	NO HAY	17,79				
			Inyección total 2500 psi	2,95				100,00	2,87	2,52	3,26	NO HAY	NO HAY	19,76				
			Inyección par 2500 psi	1.20				5,15	1,14	3,55	132086,96	3,06	NO HAY	NO HAY				
			inyección impar 2500 psi	2,94				100,00	2,75	2,12	2,89	NO HAY	NO HAY	17,79				
			Inyección total 3500 psi	1.25				5,16	1,18	3,72	132086,96	3,26	NO HAY	NO HAY				
			Inyección par 3500 psi	2,94				100,00	2,81	2,31	3,06	NO HAY	NO HAY	18,73				
			inyección impar 3500 psi	1.16				5,14	1,09	3,38	132086,96	2,89	NO HAY	NO HAY				
			Inyección total 1500 psi	1.25				100,00	1,22	2,29	10,52	10,52	NO HAY	NO HAY				
			Inyección par 1500 psi	1.20				100,00	1,17	2,12	10,52	10,52	NO HAY	NO HAY				
			inyección impar 1500 psi	1.16				100,00	1,13	1,96	10,51	10,51	NO HAY	NO HAY				
			Inyección total 2500 psi	2,79				100,00	2,50	1,78	2,49	NO HAY	NO HAY	15,58				
			Inyección par 2500 psi	1.01				4,68	0.95	2,83	117410,63	2,37	NO HAY	NO HAY				
			inyección impar 2500 psi	2,78				100,00	2,38	1,57	2,27	NO HAY	NO HAY	14,33				
			Inyección total 3500 psi	1.04				4,69	0.98	2,95	117410,63	2,49	NO HAY	NO HAY				
			Inyección par 3500 psi	2,78				100,00	2,44	1,67	2,37	NO HAY	NO HAY	14,93				
			inyección impar 3500 psi	0.98				4,67	0.92	2,72	132086,96	2,27	NO HAY	NO HAY				
			Inyección total 1500 psi	1.57				100,00	1,47	4,25	140000,00	NO HAY	NO HAY	20,26				
			Inyección par 1500 psi	1.52				100,00	1,42	3,81	160000,00	NO HAY	NO HAY	19,26				
			inyección impar 1500 psi	1.48				100,00	1,38	3,46	140000,00	NO HAY	NO HAY	18,36				
			Inyección total 2500 psi	3,22				100,00	3,12	4,25	3,58	NO HAY	NO HAY	20,26				
			Inyección par 2500 psi	1.52				4,89	1,42	3,73	160000,00	3,37	NO HAY	NO HAY				
			inyección impar 2500 psi	3,22				100,00	2,99	3,46	3,19	NO HAY	NO HAY	18,36				
			Inyección total 3500 psi	1.57				4,88	1,47	3,87	140000,00	3,58	NO HAY	NO HAY				
			Inyección par 3500 psi	3,21				100,00	3,06	3,81	3,37	NO HAY	NO HAY	19,26				
			inyección impar 3500 psi	1.48				4,90	1,38	3,59	140000,00	3,19	NO HAY	NO HAY				

Fuente: Elaboración propia. 2019.

6.2.11 Undécima sección. Para la undécima sección se tiene un OD de 5 1/2" en el casing, 2 3/8" de tubing, grado de tubería del casing P110, tubing J55, a una profundidad de 8000 ft. En la **Figura 59** se puede apreciar el esquema realizado.

Figura 59. Undécima sección de la simulación



Fuente: Elaboración propia. 2019.

Para este caso en particular se tiene un cambio en profundidad de 8000 ft. A continuación, en la **Tabla 16** se tienen los valores obtenidos por las simulaciones

Tabla 16. Resultados undécima sección.

Tamaño	Grado	Profundidad	# de paquetes	Espaciamiento	Operación	Carga axial		Triaxial		Estallido Encima		colapso Encima	
						Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo
Tubing 2 3/8"	J55	8000 ft	3	300 ft	Inyección total 1500 psi	1.22	100,00	1.14	3,62	14000,00	NO HAY	NO HAY	16,31
					Inyección par 1500 psi	2,47	100,00	2,41	3,62	2,79	NO HAY	NO HAY	16,31
					Inyección impar 1500 psi	1.22	3,47	1.14	2,92	140000,00	2,79	NO HAY	NO HAY
					Inyección total 2500 psi	1.08	100,00	1.01	2,75	160000,00	112000,00	NO HAY	NO HAY
					Inyección par 2500 psi	2,34	100,00	2,32	2,90	2,79	NO HAY	NO HAY	NO HAY
					Inyección impar 2500 psi	1.08	3,21	0.96	2,82	NO HAY	2,79	1,06	NO HAY
					Inyección total 3500 psi	0.94	100,00	0.87	1,90	124444,44	NO HAY	NO HAY	11,27
					Inyección par 3500 psi	2,27	100,00	1,93	1,90	1,86	NO HAY	NO HAY	11,27
					Inyección impar 3500 psi	0.94	3,08	0.87	2,14	124444,44	1,86	NO HAY	NO HAY
					Inyección total 1500 psi	1.23	100,00	1.15	3,81	140000,00	NO HAY	NO HAY	16,61
				Inyección par 1500 psi	2,48	100,00	2,43	3,81	2,85	NO HAY	NO HAY	16,61	
				Inyección impar 1500 psi	1.23	3,44	1.15	2,94	140000,00	2,85	NO HAY	NO HAY	
				Inyección total 2500 psi	1.09	100,00	1.02	2,85	160000,00	NO HAY	NO HAY	14,10	
				Inyección par 2500 psi	2,35	100,00	2,21	2,85	2,37	NO HAY	NO HAY	14,10	
				Inyección impar 2500 psi	1.09	3,18	1.02	2,56	160000,00	2,37	NO HAY	NO HAY	
				Inyección total 3500 psi	0.95	100,00	0.88	1,95	140000,00	NO HAY	NO HAY	11,21	
				Inyección par 3500 psi	2,27	100,00	1,95	1,95	1,88	NO HAY	NO HAY	11,41	
				Inyección impar 3500 psi	0.95	3,05	0.88	2,15	140000,00	1,88	NO HAY	NO HAY	
				Inyección total 1500 psi	1.25	100,00	1.17	4,03	140000,00	NO HAY	NO HAY	16,92	
				Inyección par 1500 psi	2,48	100,00	2,45	4,03	2,91	NO HAY	NO HAY	16,92	
				Inyección impar 1500 psi	1.25	3,40	1.17	2,96	140000,00	2,91	NO HAY	NO HAY	
				Inyección total 2500 psi	1.10	100,00	1.03	2,96	140000,00	NO HAY	NO HAY	14,30	
				Inyección par 2500 psi	2,36	100,00	2,23	2,96	2,11	NO HAY	NO HAY	14,30	
				Inyección impar 2500 psi	1.10	3,16	1.03	2,58	140000,00	2,41	NO HAY	NO HAY	
				Inyección total 3500 psi	0.95	100,00	0.89	2,01	140000,00	NO HAY	NO HAY	11,56	
				Inyección par 3500 psi	2,28	100,00	1,97	2,01	1,91	NO HAY	NO HAY	11,56	
				Inyección impar 3500 psi	0.95	3,03	0.89	2,17	140000,00	1,91	NO HAY	NO HAY	
				Inyección total 1500 psi	1.25	100,00	1.18	4,21	1111,11	1120,00	NO HAY	NO HAY	
				Inyección par 1500 psi	1.23	100,00	1.16	3,89	140000,00	NO HAY	NO HAY	16,76	
				Inyección impar 1500 psi	1.22	100,00	1.14	3,62	140000,00	NO HAY	NO HAY	16,31	
			Inyección total 2500 psi	2,45	100,00	2,44	4,21	2,97	1120,00	NO HAY	NO HAY		
			Inyección par 2500 psi	1.23	3,45	1.16	2,96	140000,00	2,88	NO HAY	NO HAY		
			Inyección impar 2500 psi	2,47	100,00	2,41	3,62	2,79	NO HAY	NO HAY	16,31		
			Inyección total 1500 psi	1.06	100,00	0.89	1,48	NO HAY	NO HAY	0.40	3,66		
			Inyección impar 1500 psi	1.02	100,00	0.85	1,42	NO HAY	NO HAY	0.11	3,45		
			Inyección total 2500 psi	0.98	100,00	0.82	1,36	NO HAY	NO HAY	-0.17	3,26		
			Inyección par 2500 psi	1.10	100,00	1.03	3,03	160000,00	NO HAY	NO HAY	14,52		
			Inyección impar 2500 psi	1.09	100,00	1.02	2,88	140000,00	NO HAY	NO HAY	14,20		
			Inyección total 3500 psi	1.08	100,00	1.01	2,75	140000,00	140000,00	NO HAY	NO HAY		
			Inyección par 3500 psi	2,33	100,00	2,22	3,03	2,45	NO HAY	NO HAY	14,52		
			Inyección impar 3500 psi	1.09	3,20	1.02	2,58	140000,00	2,59	NO HAY	NO HAY		
			Inyección total 1500 psi	2,34	100,00	2,19	2,75	2,33	140000,00	NO HAY	NO HAY		
			Inyección par 1500 psi	1.10	100,00	1.03	2,61	160000,00	NO HAY	NO HAY	4,63		
			Inyección impar 1500 psi	2,33	100,00	2,21	1,88	2,39	NO HAY	NO HAY	4,28		
			Inyección total 2500 psi	1.08	100,00	1.01	2,23	140000,00	NO HAY	NO HAY	3,99		
			Inyección par 2500 psi	0.96	100,00	0.89	2,05	140000,00	NO HAY	NO HAY	11,71		
			Inyección impar 2500 psi	0.95	100,00	0.88	1,97	124444,44	NO HAY	NO HAY	11,48		
			Inyección total 3500 psi	0.94	100,00	0.87	1,90	140000,00	NO HAY	NO HAY	11,27		
			Inyección par 3500 psi	2,25	100,00	1,97	2,05	1,94	NO HAY	NO HAY	11,71		
			Inyección impar 3500 psi	0.95	3,07	0.88	2,17	124444,44	1,90	NO HAY	NO HAY		
			Inyección total 1500 psi	1.28	100,00	1.20	4,72	140000,00	NO HAY	NO HAY	17,93		
			Inyección par 1500 psi	1.25	100,00	1.18	4,22	140000,00	NO HAY	NO HAY	17,24		
			Inyección impar 1500 psi	1.23	100,00	1.15	3,81	140000,00	NO HAY	NO HAY	16,61		
			Inyección total 2500 psi	2,45	100,00	2,47	4,72	3,11	NO HAY	NO HAY	17,93		
			Inyección par 2500 psi	1.25	3,41	1.18	2,99	140000,00	2,97	NO HAY	NO HAY		
			Inyección impar 2500 psi	2,48	100,00	2,43	3,81	2,85	NO HAY	NO HAY	16,61		
			Inyección total 3500 psi	1.28	3,39	1.20	3,05	140000,00	3,11	NO HAY	NO HAY		
			Inyección par 3500 psi	2,46	100,00	2,45	4,22	2,97	NO HAY	NO HAY	17,24		
			Inyección impar 3500 psi	1.23	3,44	1.15	2,94	140000,00	2,85	NO HAY	NO HAY		
			Inyección total 1500 psi	1.13	100,00	1.05	3,27	160000,00	NO HAY	NO HAY	14,97		
			Inyección par 1500 psi	1.11	100,00	1.04	3,05	160000,00	NO HAY	NO HAY	14,52		
			Inyección impar 1500 psi	1.09	100,00	1.02	2,85	160000,00	NO HAY	NO HAY	14,10		
			Inyección total 2500 psi	2,33	100,00	2,25	3,27	2,54	NO HAY	NO HAY	14,97		
			Inyección par 2500 psi	1.11	3,17	1.04	2,61	160000,00	2,45	NO HAY	NO HAY		
			Inyección impar 2500 psi	2,35	100,00	2,21	2,85	2,37	NO HAY	NO HAY	14,10		
			Inyección total 3500 psi	1.13	3,16	1.05	2,66	160000,00	2,54	NO HAY	NO HAY		
			Inyección par 3500 psi	2,34	100,00	2,23	3,05	2,45	NO HAY	NO HAY	14,52		
			Inyección impar 3500 psi	1.09	3,18	1.02	2,56	160000,00	2,37	NO HAY	NO HAY		
			Inyección total 1500 psi	0.97	100,00	0.91	2,17	140000,00	NO HAY	NO HAY	12,02		
			Inyección par 1500 psi	0.96	100,00	0.89	2,05	124444,44	NO HAY	NO HAY	11,71		
			Inyección impar 1500 psi	0.95	100,00	0.88	1,95	112000,00	NO HAY	NO HAY	11,40		
			Inyección total 2500 psi	2,25	100,00	2,00	2,17	1,99	NO HAY	NO HAY	12,02		
			Inyección par 2500 psi	0.96	3,04	0.89	2,20	124444,44	1,94	NO HAY	NO HAY		
			Inyección impar 2500 psi	2,27	100,00	1,95	1,95	1,88	NO HAY	NO HAY	11,40		
			Inyección total 3500 psi	0.97	3,02	0.91	2,24	140000,00	1,99	NO HAY	NO HAY		
			Inyección par 3500 psi	2,26	100,00	1,97	2,05	1,94	NO HAY	NO HAY	11,71		
			Inyección impar 3500 psi	0.95	3,05	0.88	2,15	112000,00	1,88	NO HAY	NO HAY		
			Inyección total 1500 psi	1.31	100,00	1.23	5,38	124444,44	NO HAY	NO HAY	18,67		
			Inyección par 1500 psi	1.28	100,00	1.20	4,61	140000,00	NO HAY	NO HAY	17,75		
			Inyección impar 1500 psi	1.25	100,00	1.17	4,03	140000,00	NO HAY	NO HAY	16,92		
			Inyección total 2500 psi	2,46	100,00	2,50	5,38	3,25	NO HAY	NO HAY	18,67		
			Inyección par 2500 psi	1.28	3,37	1.20	3,02	140000,00	3,07	NO HAY	NO HAY		
			Inyección impar 2500 psi	2,48	100,00	2,45	4,03	2,91	NO HAY	NO HAY	16,92		
			Inyección total 3500 psi	1.31	3,35	1.23	3,09	124444,44	3,25	NO HAY	NO HAY		
			Inyección par 3500 psi	2,47	100,00	2,48	4,61	3,07	NO HAY	NO HAY	17,75		
			Inyección impar 3500 psi	1.25	3,40	1.17	2,96	140000,00	2,91	NO HAY	NO HAY		
			Inyección total 1500 psi	1.15	100,00	1.08	3,55	160000,00	NO HAY	NO HAY	15,43		
			Inyección par 1500 psi	1.13	100,00	1.05	3,23	140000,00	NO HAY	NO HAY	14,85		
			Inyección impar 1500 psi	1.10	100,00	1.03	2,96	140000,00	NO HAY	NO HAY	14,30		
			Inyección total 2500 psi	2,34	100,00	2,28	3,55	2,63	NO HAY	NO HAY	15,43		
			Inyección par 2500 psi	1.13	3,14	1.05	2,64	140000,00	2,51	NO HAY	NO HAY		
			Inyección impar 2500 psi	2,36	100,00	2,23	2,96	2,41	NO HAY	NO HAY	14,30		
			Inyección total 3500 psi	1.15	3,13	1.08	2,69	160000,00	2,63	NO HAY	NO HAY		
			Inyección par 3500 psi	2,35	100,00	2,26	3,23	2,51	NO HAY	NO HAY	14,85		
			Inyección impar 3500 psi	1.10	3,16	1.03	2,58	140000,00	2,41	NO HAY	NO HAY		
			Inyección total 1500 psi	0.99	100,00	0.92	2,30	140000,00	37333,33	NO HAY	NO HAY		
			Inyección par 1500 psi	0.97	100,00	0.90	2,14	140000,00	NO HAY	NO HAY	11,94		
			Inyección impar 1500 psi	0.95	100,00	0.89	2,01	140000,00	NO HAY	NO HAY	11,56		
			Inyección total 2500 psi	2,26	100,00	2,03	2,30	2,05	37333,33	NO HAY	NO HAY		
			Inyección par 2500 psi	0.97	3,01	0.90	2,22	140000,00	1,98	NO HAY	NO HAY		
Inyección impar 2500 psi	2,28	100,00	1,97	2,01	1,91	NO HAY	NO HAY	11,56					
Inyección total 3500 psi	0.99	2,99	0.92	2,28	140000,00	2,05	NO HAY	NO HAY					
Inyección par 3500 psi	2,27	100,00	2,00	2,14	1,98	NO HAY	NO HAY	11,94					
Inyección impar 3500 psi	0.95	3,03	0.89	2,17	140000,00	1,91	NO HAY	NO HAY					

Fuente: Elaboración propia. 2019.

6.2.12 Duodécima sección. Para la duodécima sección se tiene un OD de 5 1/2” en el casing, 2 3/8” de tubing, grado de tubería del casing P110, tubing J55, a una profundidad de 10000 ft. En la **Figura 60** se puede apreciar el esquema realizado.

Al igual que en la sexta sección, no se tuvo en cuenta las simulaciones obtenidas por el programa Wellcat™ dado a que los factores obtenidos se salen de la envolvente operativa. Por ende, no se realizó ningún tipo de corrección con el modelo PTA, y no se obtuvo ningún tipo de dato para ser analizado posteriormente.

6.3 ANALISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS

Teniendo en cuenta los datos obtenidos del Wellcat™, y posteriormente corregidos por el modelo PTA, se debe establecer un análisis respecto a las variables que fueron escogidas anteriormente, todo esto con el fin de tener unos parámetros iniciales para ser analizados. En ciertas ocasiones se puede notar que existen variables que son más sustanciales que otras, de igual manera, bajo determinadas condiciones de una variable, otras ganan relevancia. La tarea es tener en cuenta estos factores y organizarlos de manera que se tenga certeza bajo qué condiciones son recomendables o no la implementación de empaques tipo tándem.

6.3.1 Análisis Variables. A continuación, se comprenden los parámetros que fueron considerados como primordiales.

6.3.1.1 Grado de tubería. Una variable que fue reconocida dentro de los datos y que demostró desde un inicio una gran variación a comparación de las demás fue el grado de la tubería. Se pudo establecer desde el mismo programa Wellcat™, que no se pudo correr el grado de tubería J55 a profundidades altas (10000ft), al no ser lo suficientemente robusta para resistir este tipo de ambientes. Este es un aspecto peculiar que será contemplado en el establecimiento de criterios de evaluación y las posteriores recomendaciones que se hagan respecto al grado de tubería.

6.3.1.2 Profundidades. Desde el inicio de las corridas de datos se pudo establecer que las profundidades afectan sustancialmente a los factores de seguridad, especialmente a las profundidades de 5000 y 8000ft, donde los patrones de fluctuación de los valores de las variables, ilustran cambios importantes. Cabe resaltar, que esta variable a su vez, influye y condiciona las otras variables al establecer escenarios donde se modifica su tendencia.

6.3.1.3 Número de empaques. Al manejar una mayor cantidad de empaques se pudo notar que el tipo de inyección y la profundidad influenciaban en gran medida a la falla de estos arreglos. Siendo la menor profundidad utilizada la óptima para su funcionamiento y la inyección par la única que la que no se evidenciaba falla en alguno de las herramientas. La presión de inyección que se tenga y el tipo de diámetro usado, tienden a no afectar.

6.3.2 Análisis factores de seguridad. A continuación, se hace una retrospectiva de todos los factores tenidos en cuenta y los patrones que muestran en la toma de datos, los cuales una vez analizados y a partir de estos establecer los criterios de uso.

6.3.2.1 Factor de seguridad axial. Dentro de todos los análisis tenidos en cuenta se pudo establecer que el factor de seguridad de carga axial es de los que más fluctúa, comparándolo con los otros tres factores, especialmente cuando se trata de la carga axial por encima de los empaques. Debajo del empaque las cargas no representaron un problema. Al ser tan pocos los casos en comparación a la cantidad de casos corridos, la cantidad se torna despreciable. Se puede establecer este criterio teniendo en cuenta que todas las condiciones de los pozos fueron tenidas en cuenta como si este fuera de tipo inyector. Se tendrá en cuenta solamente el factor de seguridad axial superior para los posteriores criterios.

6.3.2.2 Factor de seguridad triaxial. Al igual que el anterior factor de seguridad, el factor de seguridad triaxial es un variable importante que será tenida en cuenta para los criterios, especialmente el factor de seguridad superior ya que demostró su importancia al momento de realizar las corridas al variar constantemente, lo que permite obtener una idea más educada sobre las limitaciones del programa y tenido en cuenta al momento de sacar los criterios. Al igual que el anterior, los datos de las cargas por debajo del empaque son despreciables.

6.3.2.3 Factor de seguridad de estallido. A diferencia de los otros datos obtenidos, el factor de estallido no demostró mayores complicaciones, esto se puede considerar al no tener grandes presiones de inyección dentro de las corridas. En otras palabras, el diferencial de presión en la tubería no fue lo suficientemente alto para generar algún tipo de daño por estallido dentro en el completamiento. Por ende, este factor de diseño no se tiene en cuenta para los posteriores criterios.

6.3.2.4 Factor de seguridad de colapso. Finalmente, el factor de seguridad de colapso, mostro fallas “automáticas” en los escenarios donde se tomó la profundidad a 10000ft, indicando que para estos escenarios la presión anular supera con creces la presión interna. Para estos casos donde las fallas son “automáticas”, es imperativo replantear el grado de la tubería, donde se necesitaría una tubería más robusta con un punto de cedencia más alto y una presión de inyección más alta, acorde con las nuevas especificaciones de la tubería.

Explicados los factores, se pasa a revisar la aplicación del modelo en los casos reales.

7. CRITERIOS, RECOMENDACIONES PARA OPERACIONES DE EMPAQUES TIPO TÁNDEM

En el siguiente capítulo se tienen en cuenta los criterios en que los empaques tándem son utilizables o no dependiendo de las condiciones en a las que se expongan. Del mismo modo se consideran los factores que intervienen al momento de la instalación, como fue descrito en el capítulo anterior. Al haber descrito todos los factores, se procede a establecer gráficas comparativas para establecer factores trascendentales en el que los empaques tipo tándem demuestran un óptimo funcionamiento. Para ello se vislumbran los factores que son de mayor importancia para el análisis de los datos al momento de generar las conclusiones.

Finalmente, todos estos datos se cuantifican para determinar las recomendaciones que se deben tener en cuenta al momento de incluir los empaques tipo tándem como empaques intermedios en sartas utilizadas.

7.1 CONSIDERACIONES PARA LA AGRUPACIÓN DE DATOS

A continuación, se tienen las consideraciones que se tuvieron en cuenta para resumir el volumen de datos, esto es fundamental ya que al recolectar un número significativo de información se deben agrupar de manera coherente y legible para ver patrones y de esta manera establecer las recomendaciones. Para ello se habla primero de los factores de seguridad.

7.1.1 Consideraciones para los factores de diseño. Al tener la agrupación de datos se pudo establecer que los factores de seguridad con mayor incidencia son los factores de seguridad axial y triaxial, dado a que tienden a fallar. Del mismo modo, en estos factores de seguridad se puede observar que las fallas en estos dos factores ocurren por encima del empaque, en la totalidad de los escenarios planteados. Es por esto que a estos se les dará un mayor protagonismo en el momento de sacar las conclusiones y recomendaciones.

A pesar de que se evidenciaron varios casos con fallas en colapso y estallido, estos ocurrieron bajo condiciones específicas. Se harán las conclusiones con la relevancia pertinente.

7.1.2 Consideraciones para las variables. Al igual que los factores de diseño, existen variables que necesitan ser tenidas en cuenta para un mejor entendimiento. El primer caso a considerar, es el número de empaques. A diferencia del caso de 3 empaques, en donde se puede observar con claridad las fallas encontradas en un solo empaque tándem, en el caso de 5 empaques se pueden apreciar las fallas presentadas en las tres herramientas, triplicando así los factores a ser considerados. Para mayor eficacia, en este trabajo de grado se toman en cuenta los factores de diseño críticos encontrados en cualquiera de los tres empaques, de

manera que se tenga un escenario real en el que la operación se pueda ver afectada.

7.2 PARÁMETROS SEGÚN FACTORES DE DISEÑO

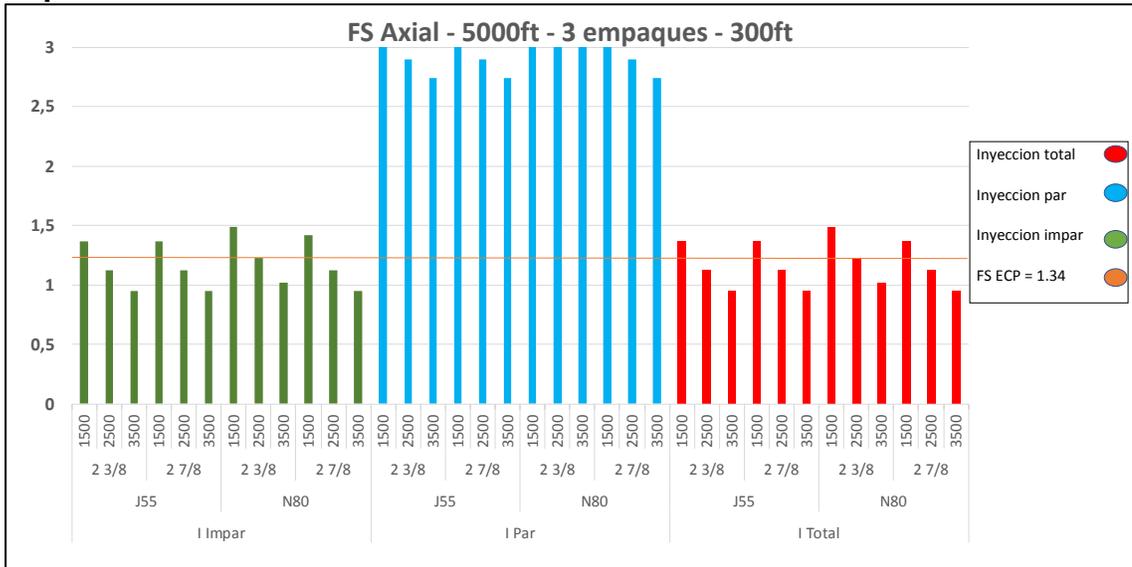
Para entender de manera apropiadamente los datos obtenidos, se dividen según los resultados de los factores de diseño más críticos, axial y triaxial. Del mismo modo se tomaron las variables y se organizaron de manera que en la organización de datos se logren notar patrones. Al haber examinado todas las posibles formas de analizar las gráficas se pudo establecer el orden óptimo en el que estas muestran la información de la manera más clara. Primero se empieza por el esquema de inyección, siendo estos inyección impar, par y total. Posterior a esto se establece el tamaño de la tubería y finalmente se tiene la presión a inyectar, siendo estas de 1500, 2500 y finalmente 3500 psi. En total salen un número de 38 gráficas en donde se pueden notar los patrones encontrados. En primer lugar, se muestran los parámetros obtenidos para el factor de seguridad axial.

7.2.1 Parámetros factor de seguridad axial. En el análisis de los datos obtenidos se pudo interpretar que el número de empaques afecta de manera considerable las operaciones que se puedan ejercer. Así mismo, la profundidad incide sustancialmente en todos los factores, a mayor profundidad los empaques tienden a exhibir valores más bajos en los factores de diseño. El espaciamiento, increíblemente no afectó de manera relevante. Finalmente, la presión de inyección incidió sobre escenarios planteados exclusivamente en grandes profundidades. A continuación, se muestran las gráficas obtenidas con 3 empaques.

7.2.1.1 Factor de seguridad axial a 3 empaques. Como se habló anteriormente, se trajeron a acotación los factores seguridad según la profundidad. Las próximas 9 gráficas hacen referencia a como los factores de seguridad se ven afectados por la profundidad y el número de empaques.

La **Gráfica 5** hace referencia a los escenarios donde se utiliza una profundidad de 5000 ft y 300 ft de espaciamiento entre empaques.

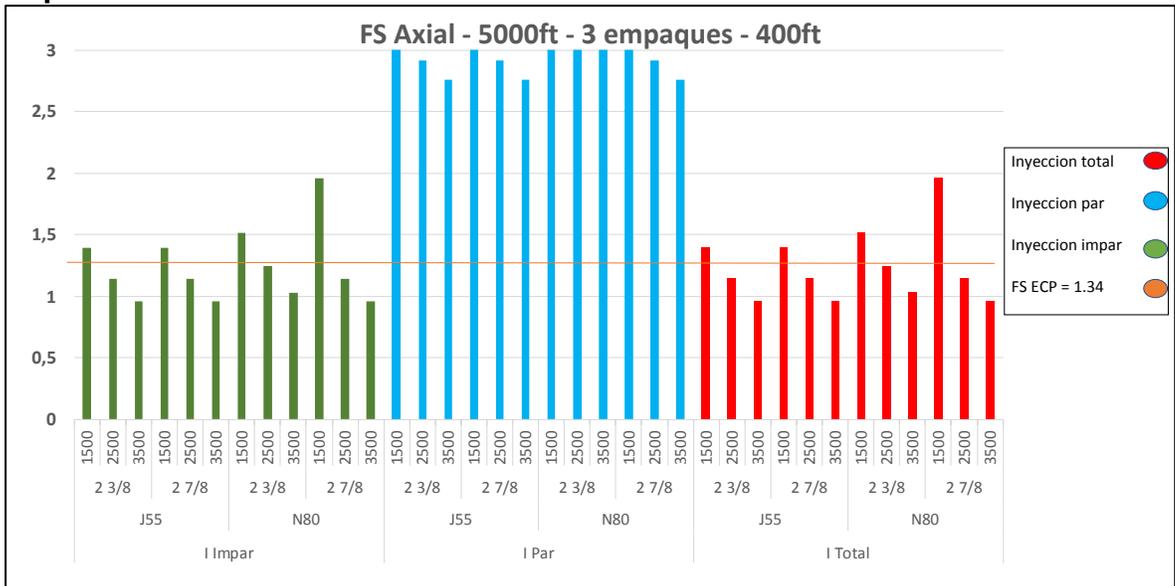
Gráfica 5. Factor de Seguridad Axial – Profundidad 5000 ft – 3 empaques – Espaciamiento 300 ft.



Fuente: Elaboración propia. 2019.

La **Gráfica 6** hace referencia a cuando se usa una profundidad de 5000 pies, pero con una variación de 400 pies a comparación de la anterior gráfica.

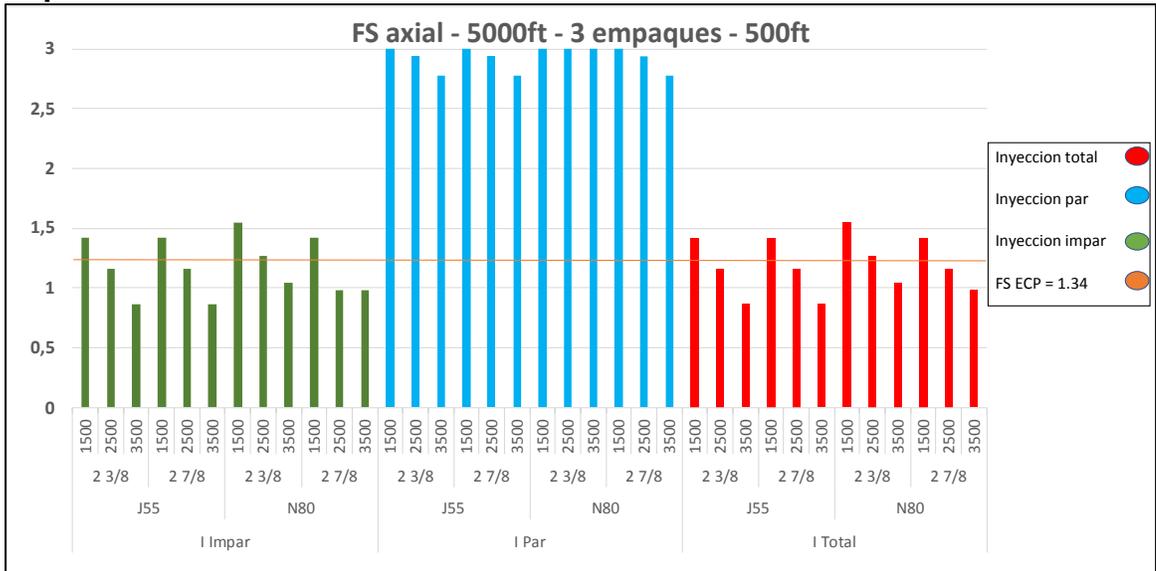
Gráfica 6. Factor de Seguridad Axial – Profundidad 5000 ft – 3 empaques – Espaciamiento 400 ft.



Fuente: Elaboración propia. 2019.

Se hace el mismo procedimiento para un espaciamiento de 500 ft. (ver **Gráfica 7**)

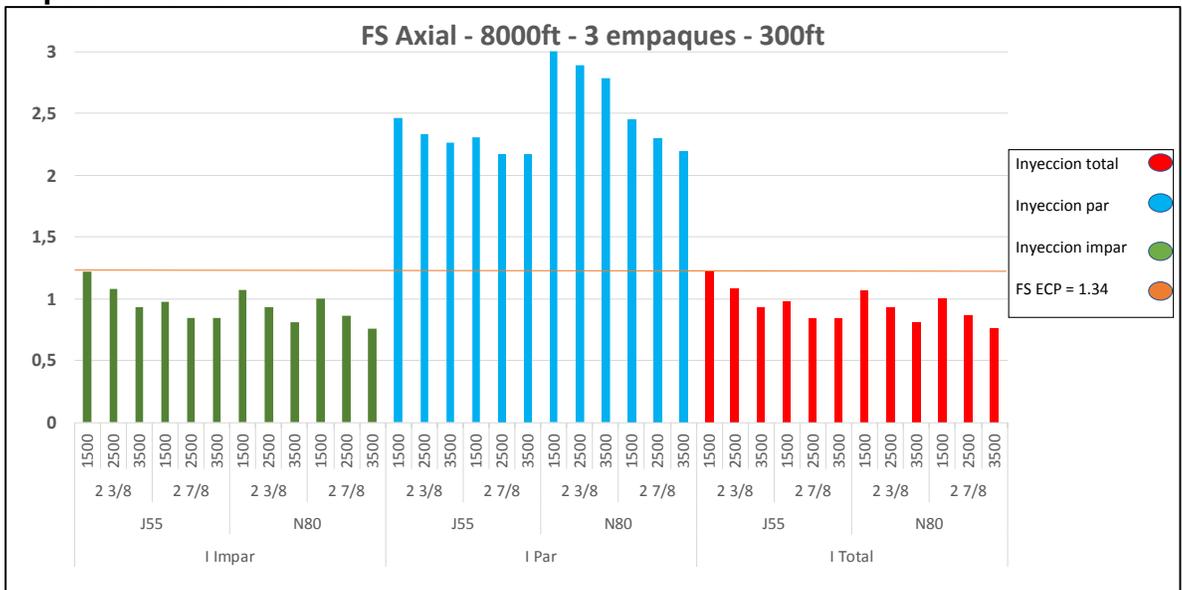
Gráfica 7. Factor de Seguridad Axial – Profundidad 5000 ft – 3 paquetes – Espaciamiento 500 ft.



Fuente: Elaboración propia. 2019.

Como se puede apreciar, independientemente del espaciamiento, el tipo de inyección es fundamental, en este caso el mejor escenario es con una inyección par. Se sigue el procedimiento, pero para una profundidad de 8000 ft. Como se puede apreciar en la **Gráfica 8**. Así mismo, la presión de inyección a 1500 psi influye lo suficiente para que el factor supere el umbral. En ciertos casos.

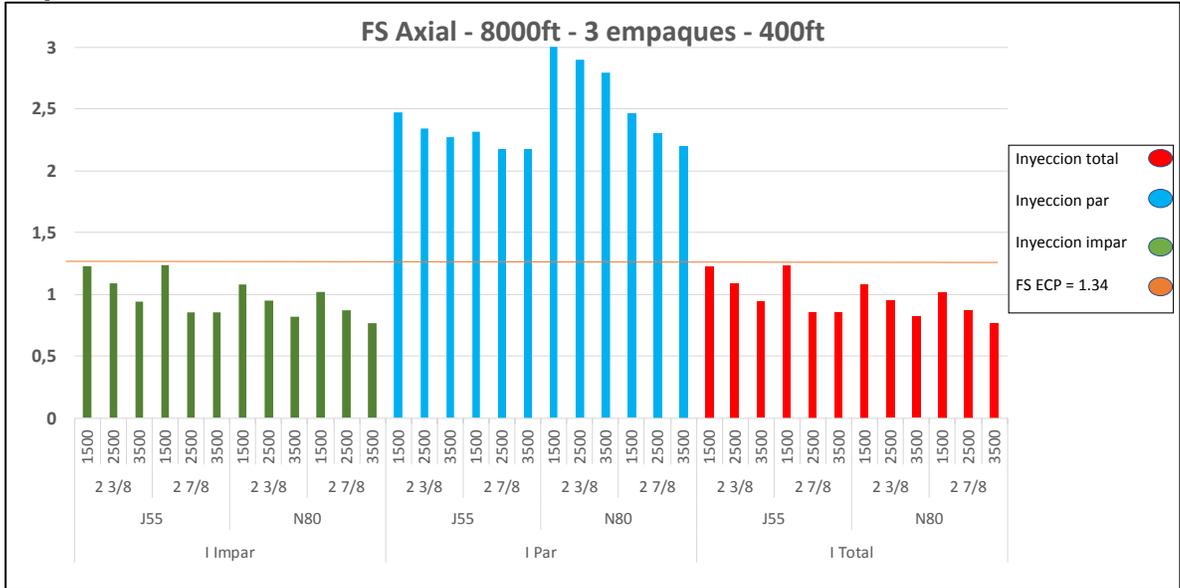
Gráfica 8. Factor de Seguridad Axial – Profundidad 8000 ft – 3 paquetes – Espaciamiento 300 ft.



Fuente: Elaboración propia. 2019.

Se hace el mismo procedimiento para 400 ft de espaciamento. (ver **Gráfica 9**)

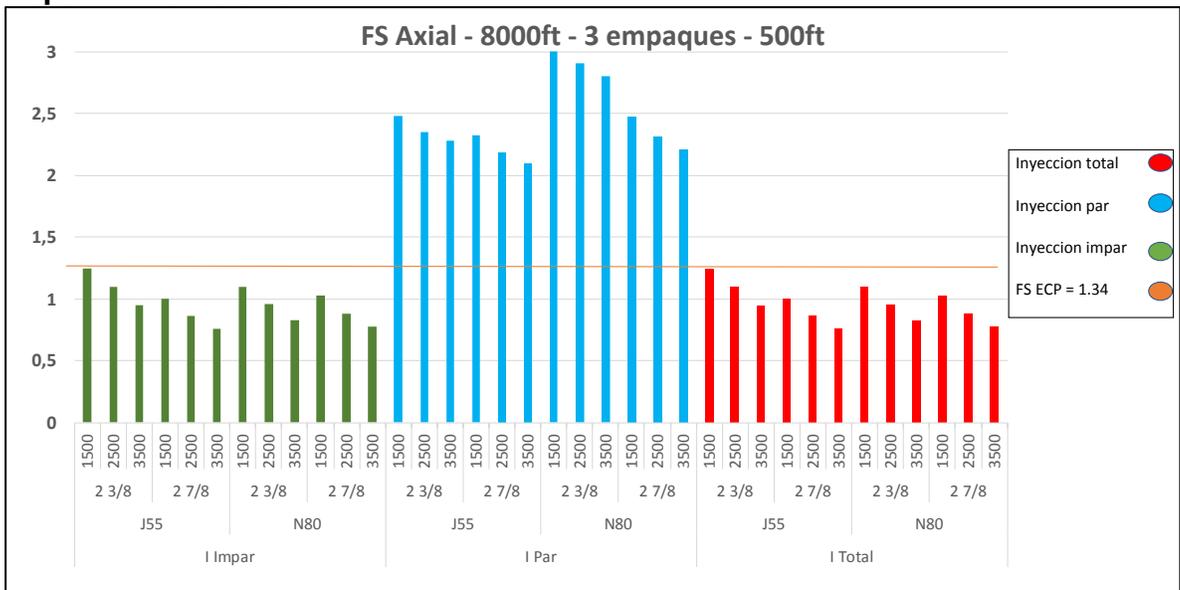
Gráfica 9. Factor de Seguridad Axial – Profundidad 8000 ft – 3 empaques – Espaciamento 400 ft.



Fuentes: Elaboración propia. 2019.

Finalmente se analizan los casos para un espaciamento de 500 ft. (ver **Gráfica 10**)

Gráfica 10. Factor de Seguridad Axial – Profundidad 8000 ft – 3 empaques – Espaciamento 500 ft.



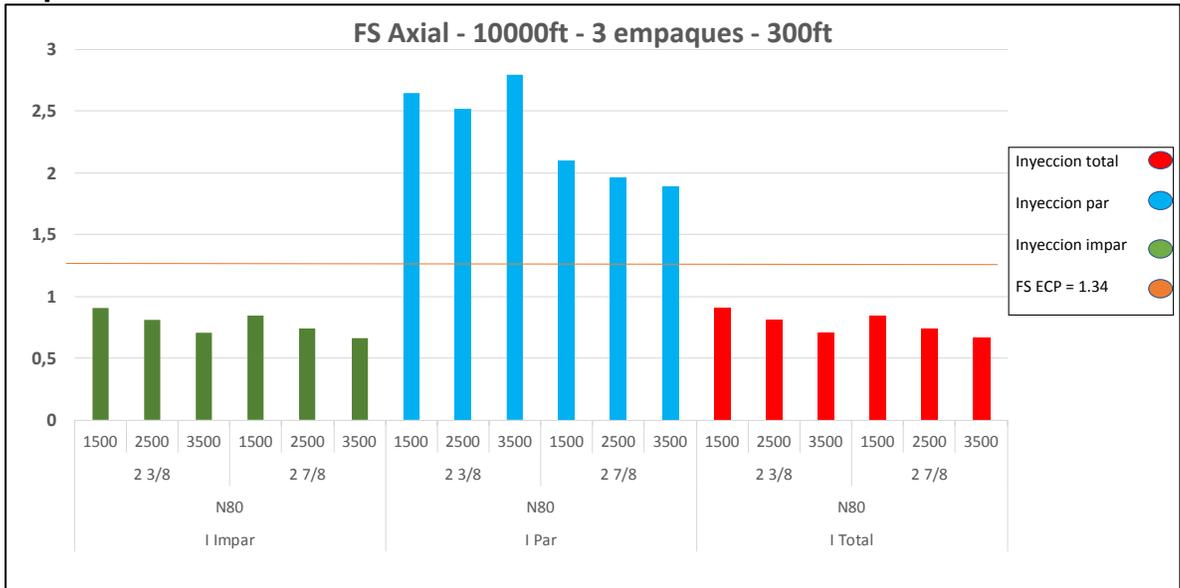
Fuente: Elaboración propia. 2019.

Como se puede apreciar todos los factores de seguridad disminuyen considerablemente, sin importar la presión de inyección que se tenga.

La única inyección que logra pasar el umbral establecido por Ecopetrol S.A. es la inyección par. La inyección impar y total no logran pasar. Sin embargo, en los casos de inyección con la presión más baja, apenas alcanzan a llegar.

Finalmente se analizan los datos a una profundidad de 10000 ft, cabe recalcar que solo se tiene un grado de tubería (N80), ya que al probar el J55 con el simulador (Wellcat™), los valores se salen de la envolvente operativa de los empaques. Por lo tanto, las siguientes 3 gráficas muestran el comportamiento de la tubería N80. La primera grafica muestra una profundidad de 10000 ft con un espaciamiento de 300 ft. (ver **Gráfica 11**)

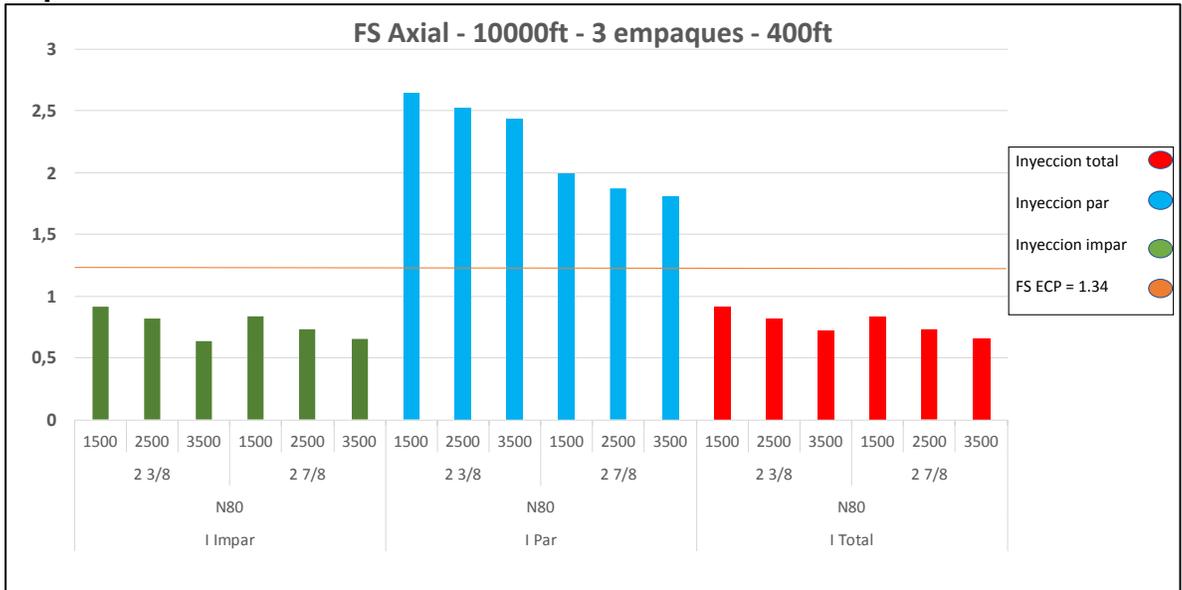
Gráfica 11. Factor de Seguridad Axial – Profundidad 10000 ft – 3 empaques – Espaciamiento 300 ft.



Fuente: Elaboración propia. 2019.

La siguiente gráfica tiene un espaciamiento de 400 ft a comparación de la anterior. (ver **Gráfica 12**)

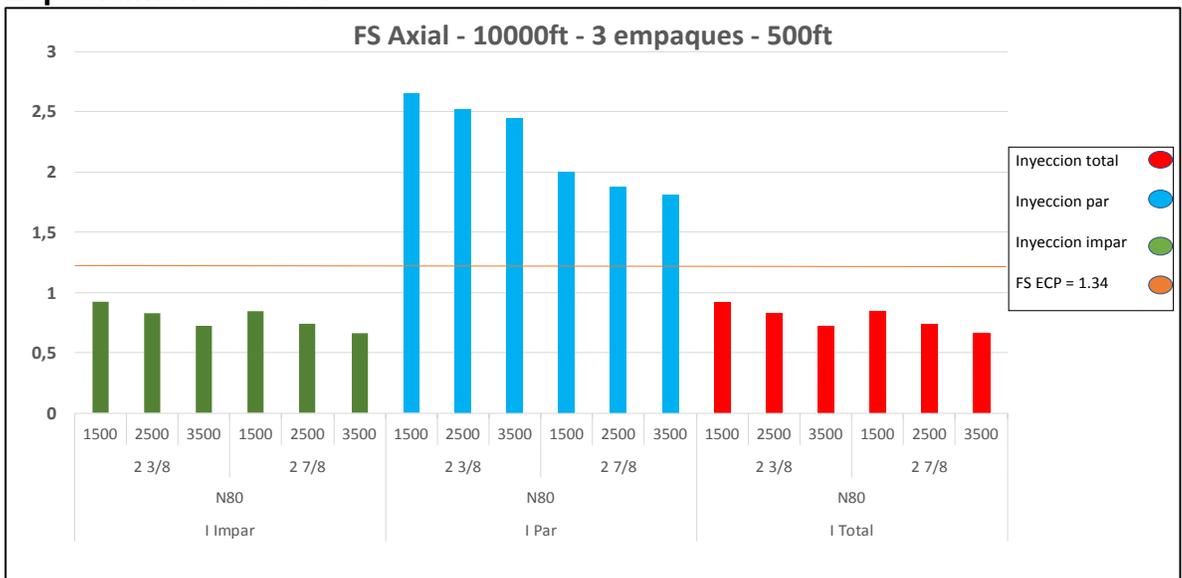
Gráfica 12. Factor de Seguridad Axial – Profundidad 10000 ft – 3 empaques – Espaciamiento 400 ft.



Fuente: Elaboración propia. 2019.

La Gráfica 13 hace referencia a un espaciamiento de 500 ft.

Gráfica 13. Factor de Seguridad Axial – Profundidad 10000 ft – 3 empaques – Espaciamiento 500 ft.



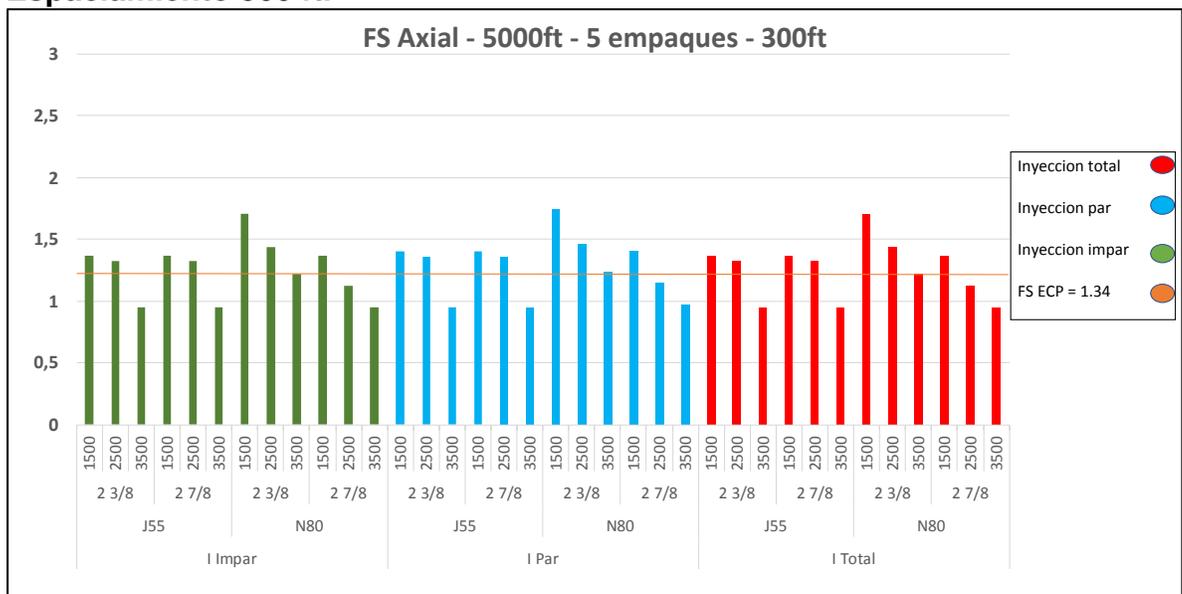
Fuentes: Elaboración propia. 2019.

Como se puede apreciar, los tres casos con diferentes espaciamientos ilustran una tendencia relativamente igual. Esto significa que entre un espaciamiento entre 300 a 500 ft no varía los factores de seguridad. De igual manera, se puede notar que la

inyección par sigue predominando a comparación de los otros dos esquemas, esto significa que en el caso de 3 empaques se debe tener cuidado con el tipo de inyección que se busca realizar. A continuación, se muestran los resultados obtenidos para el caso de 5 empaques. Como bien se ha dicho, se toma el factor de diseño mínimo entre los 3 empaques tipo tándem y se analiza entre los demás.

7.2.1.2 Factor de seguridad axial a 5 empaques. A continuación, en la **Gráfica 14** se muestran los resultados obtenidos con 5 empaques, a una profundidad de 5000 ft con espaciamiento de 300 ft.

Gráfica 14. Factor de Seguridad Axial – Profundidad 5000 ft – 5 empaques – Espaciamiento 300 ft.

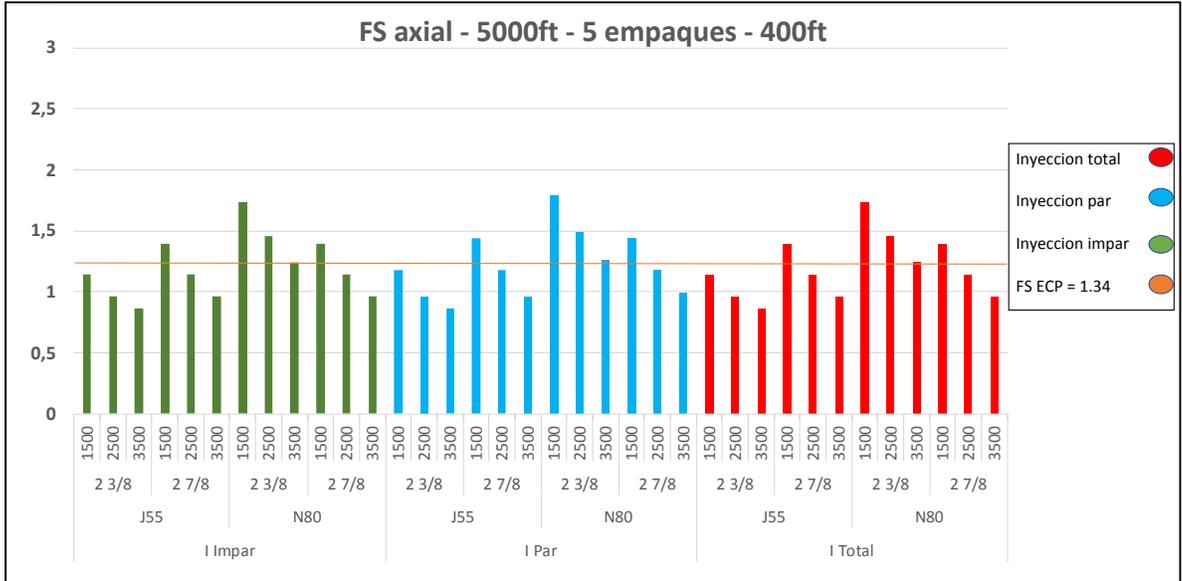


Fuentes: Elaboración propia. 2019.

Como se puede observar, al tener una disminución en las presiones de inyección se disminuyen los casos donde el factor de seguridad pasa el umbral, para casos en el que la presión de inyección es de 1500 y 2500 psi pasa sin dificultades el umbral.

A continuación, en la **Gráfica 15**, se ven los mismos datos, pero con espaciamientos de 400 y 500 ft.

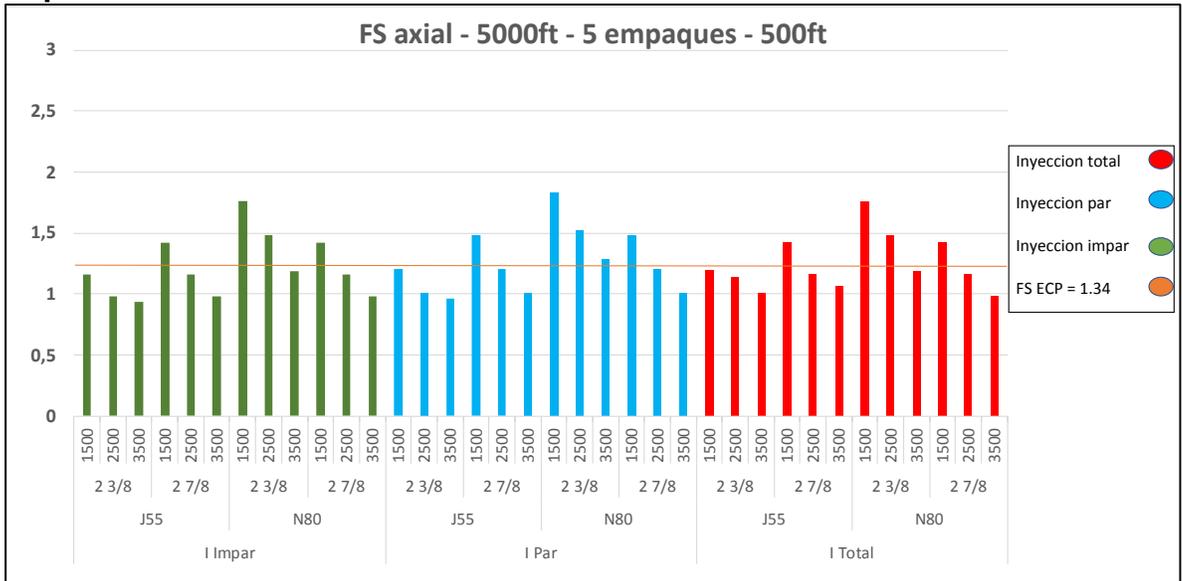
Gráfica 15. Factor de Seguridad Axial – Profundidad 5000 ft – 5 empaques – Espaciamiento 400 ft.



Fuente: Elaboración propia. 2019.

En la **Gráfica 16** se muestra las mismas condiciones, pero con un espaciamiento de 500 ft.

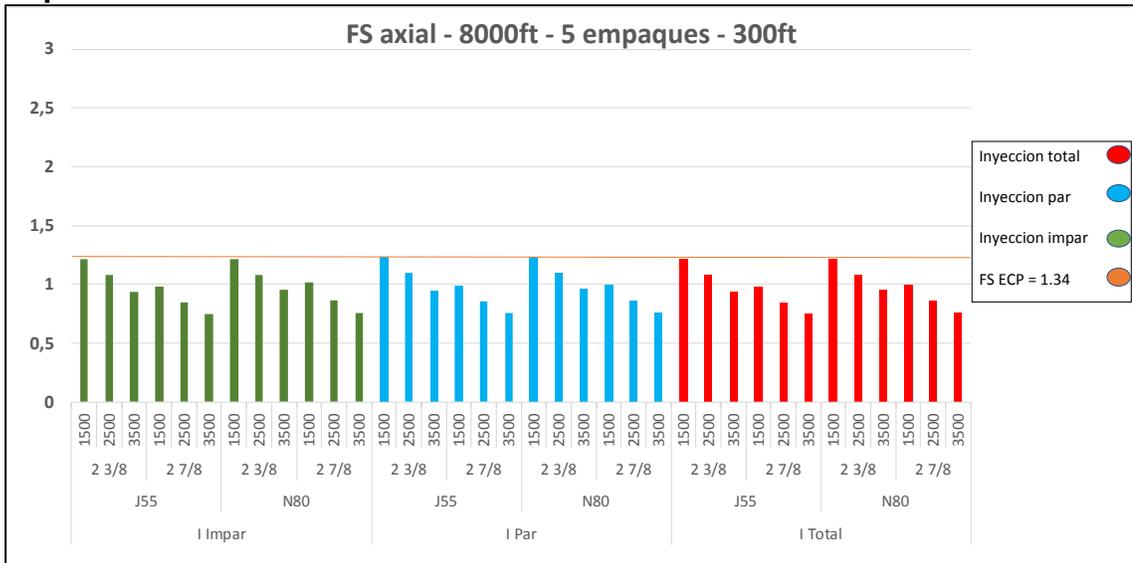
Gráfica 16. Factor de Seguridad Axial – Profundidad 5000 ft – 5 empaques – Espaciamiento 500 ft.



Fuente: Elaboración propia. 2019.

Como se puede concluir, se pueden usar 3 empaques tipo tándem (5 en total) seguidos, solamente si se utilizan presiones de inyección menores a 2500 Psi. A continuación, se muestran las condiciones anteriores, pero a una profundidad de 8000 ft. (ver **Gráfica 17**)

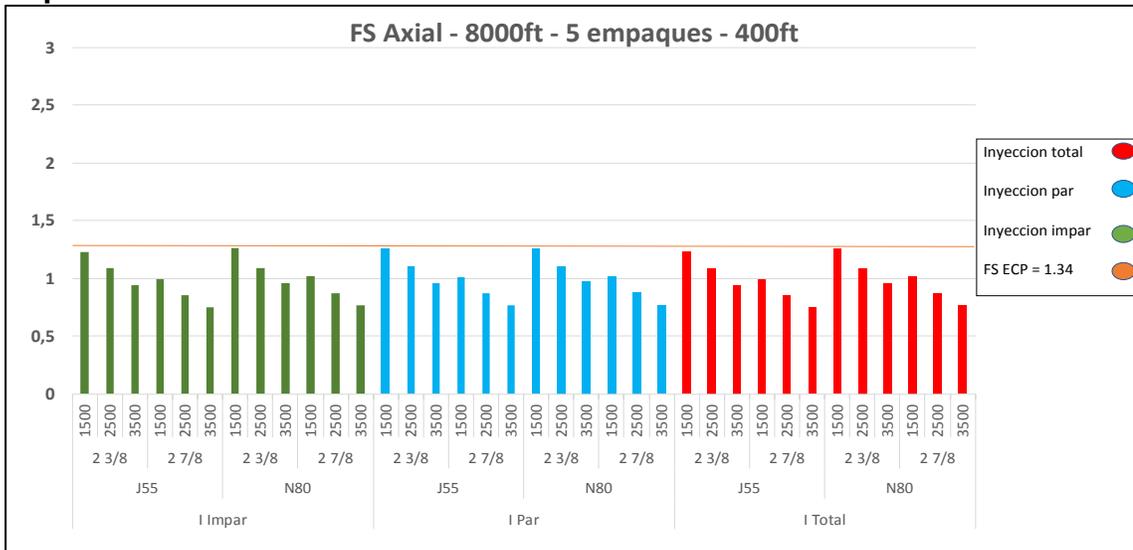
Gráfica 17. Factor de Seguridad Axial – Profundidad 8000 ft – 5 empaques – Espaciamiento 300 ft.



Fuente: Elaboración propia. 2019.

A diferencia de la anterior gráfica, la **Gráfica 18** tiene un espaciamiento de 400 ft.

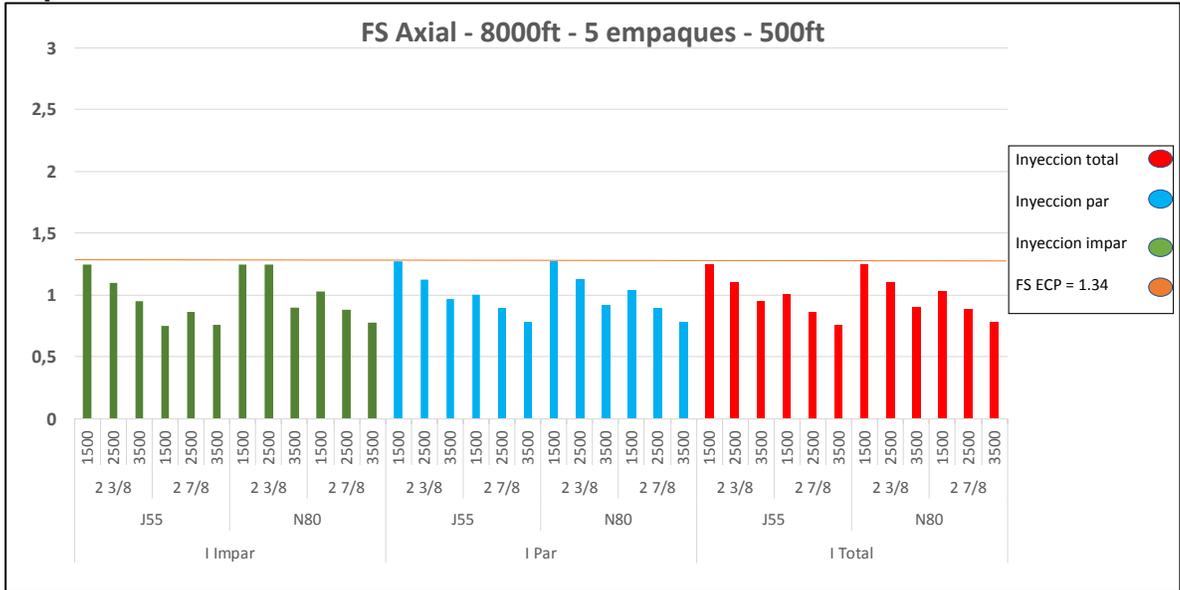
Gráfica 18. Factor de Seguridad Axial – Profundidad 8000 ft – 5 empaques – Espaciamiento 400 ft.



Fuente: Elaboración propia. 2019.

En la **Gráfica 19** se tienen los mismos valores anteriores a diferencia del espaciamiento, que en este caso se toma con una diferencia de 500 ft.

Gráfica 19. Factor de Seguridad Axial – Profundidad 8000 ft – 5 empaques – Espaciamiento 500 ft.

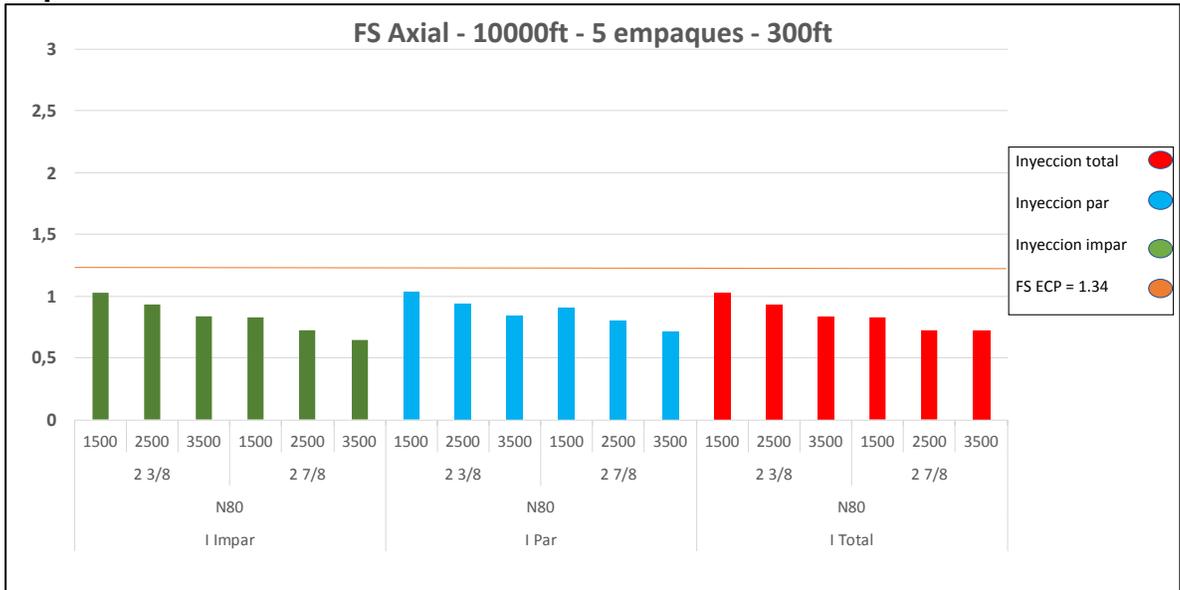


Fuente: Elaboración propia. 2019.

Como se puede apreciar, a una profundidad de 8000 ft, la instalación de 5 empaques es poco fiable, esto teniendo en cuenta que la única presión de inyección que soporta el sistema es de 1500 psi. Por ende, se puede establecer que a profundidades de 8000 ft en adelante no es aconsejable hacer un completamiento con estas condiciones. A pesar de ello, se tiene en cuenta la profundidad de 10000 ft para hacer énfasis en lo que se dijo anteriormente. A estas profundidades no se presenta el grado de tubería J55, ya que desde que se realizaron las corridas en el programa Wellcat™ se notaban fallas.

A continuación, en la **Gráfica 20** se aprecian los resultados obtenidos a un espaciamiento de 300 ft.

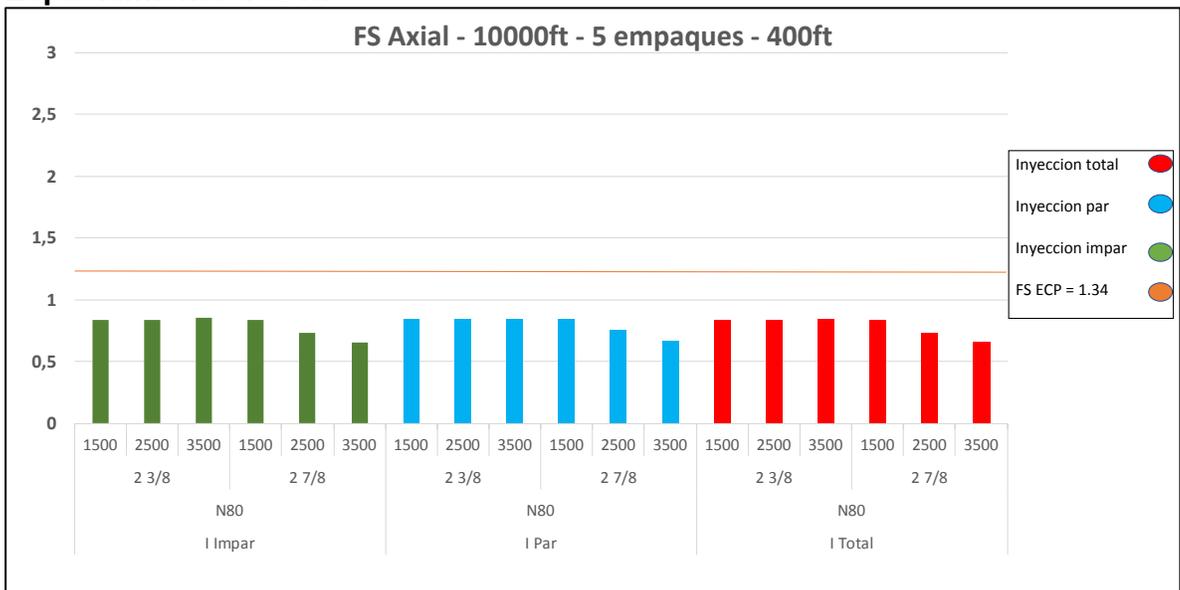
Gráfica 20. Factor de Seguridad Axial – Profundidad 10000 ft – 5 empaques – Espaciamiento 300 ft.



Fuente: Elaboración propia. 2019.

En la **Gráfica 21** se puede notar una diferencia de espaciamiento de 400 ft.

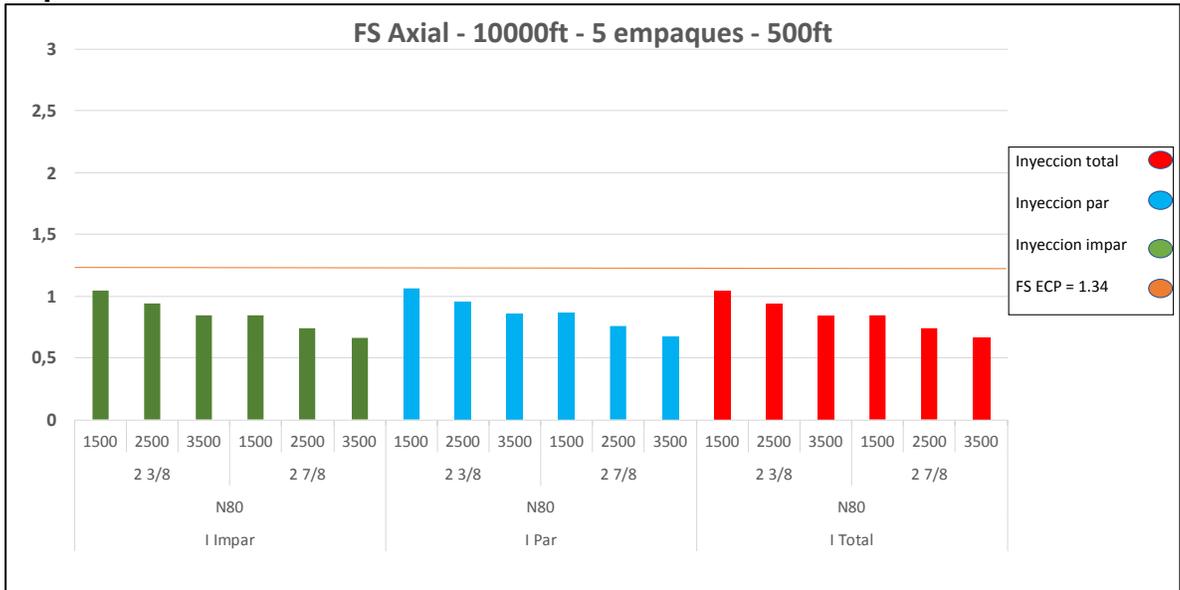
Gráfica 21. Factor de Seguridad Axial – Profundidad 10000 ft – 5 empaques – Espaciamiento 400 ft.



Fuente: Elaboración propia. 2019.

Finalmente, en la **Gráfica 22** se tiene un espaciamiento de 500 ft.

Gráfica 22. Factor de Seguridad Axial – Profundidad 10000 ft – 5 empaques – Espaciamiento 500 ft.



Fuente: Elaboración propia. 2019.

Como se puede observar en estos casos expuestos, los escenarios donde se utilizaron 5 empaques a una profundidad de 10000 ft terminan siendo inviables, aplicar este tipo de diseño dentro de un pozo conllevaría a la pérdida de los empaques, sin mencionar en los costos asociados a estas pérdidas.

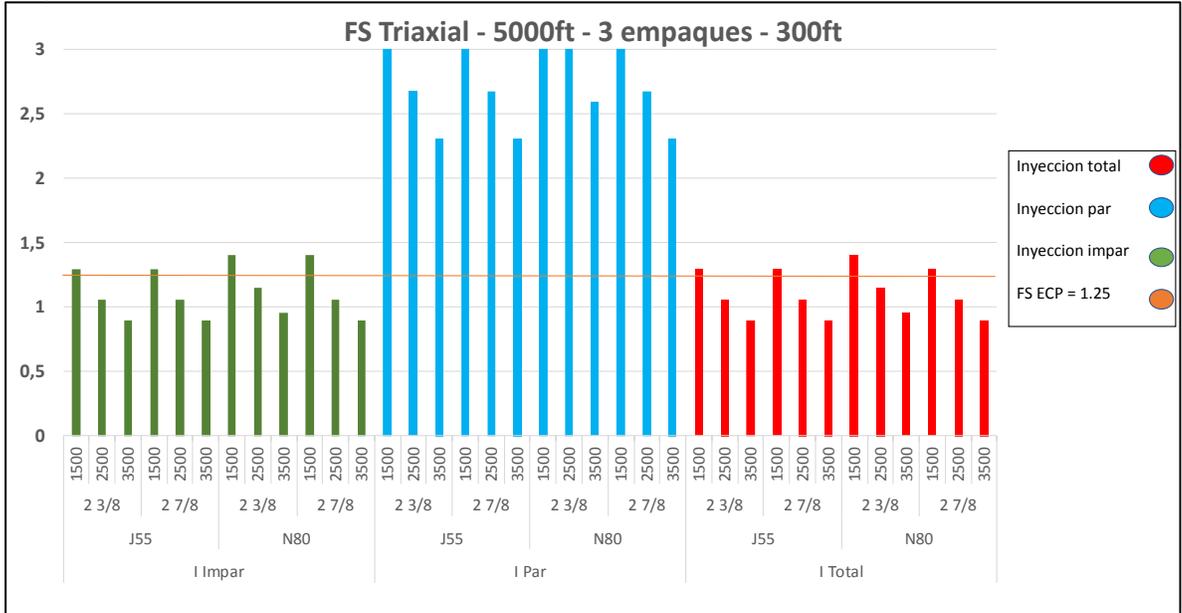
Como se puede inferir en todos los casos, a una menor cantidad de empaques bajados, mejores son los factores de seguridad. Bajar una mayor cantidad de empaques conlleva a un riesgo mayor. De mismo modo, el tipo de inyección que se busque realizar afecta de manera significativa el funcionamiento de los empaques tándem. Como se pudo mirar en los casos anteriores. El esquema de inyección par continúa siendo el más fiable.

Habiendo analizado las variables, se tienen en cuenta los parámetros de seguridad triaxial. Estos serán analizados al detalle ya que durante las simulaciones gran cantidad de escenarios resultaron en falla.

7.2.2 Parámetros factor de seguridad triaxial. Al igual que el factor de seguridad axial, se hace la comparativa. Para observar los mismos valores en el eje x, tipo de inyección, grado de tubería, tamaño de tubería y finalmente el tipo de inyección. Se organizarán los datos para 3 y 5 empaques respectivamente.

7.2.2.1 Factor de seguridad triaxial a 3 empaques. A continuación, en la **Gráfica 23**, se disponen los datos de factor de seguridad triaxial utilizando 3 empaques.

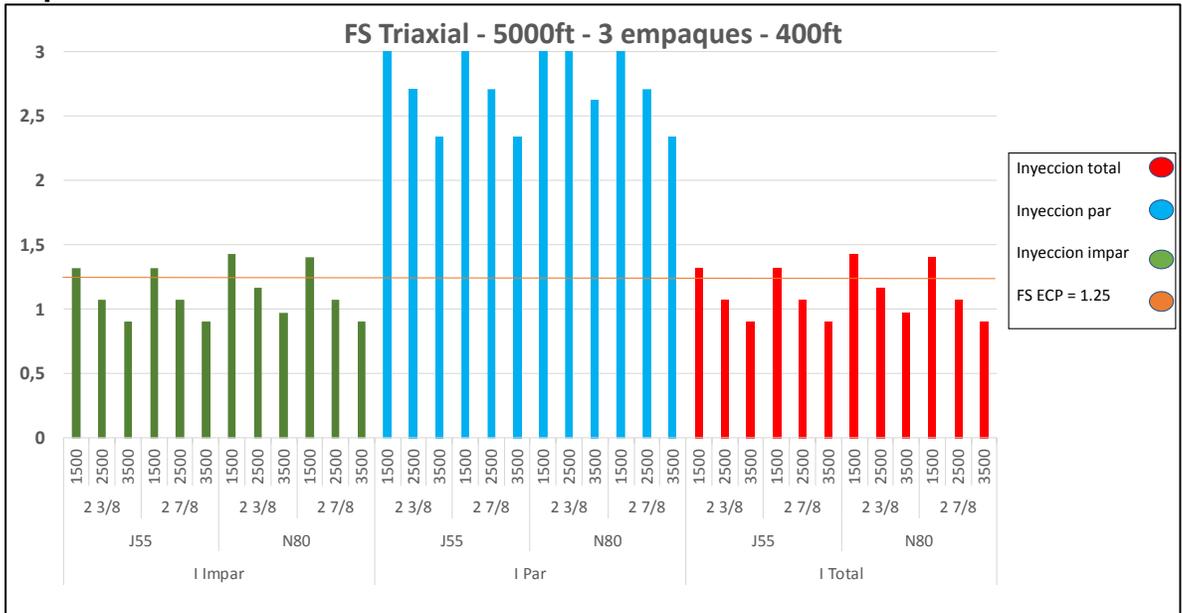
Gráfica 23. Factor de Seguridad Triaxial – Profundidad 5000 ft – 3 empaques – Espaciamiento 300 ft.



Fuente: Elaboración propia. 2019.

En la **Gráfica 24** se ilustra el comportamiento con espaciamiento entre empaques de 400 ft.

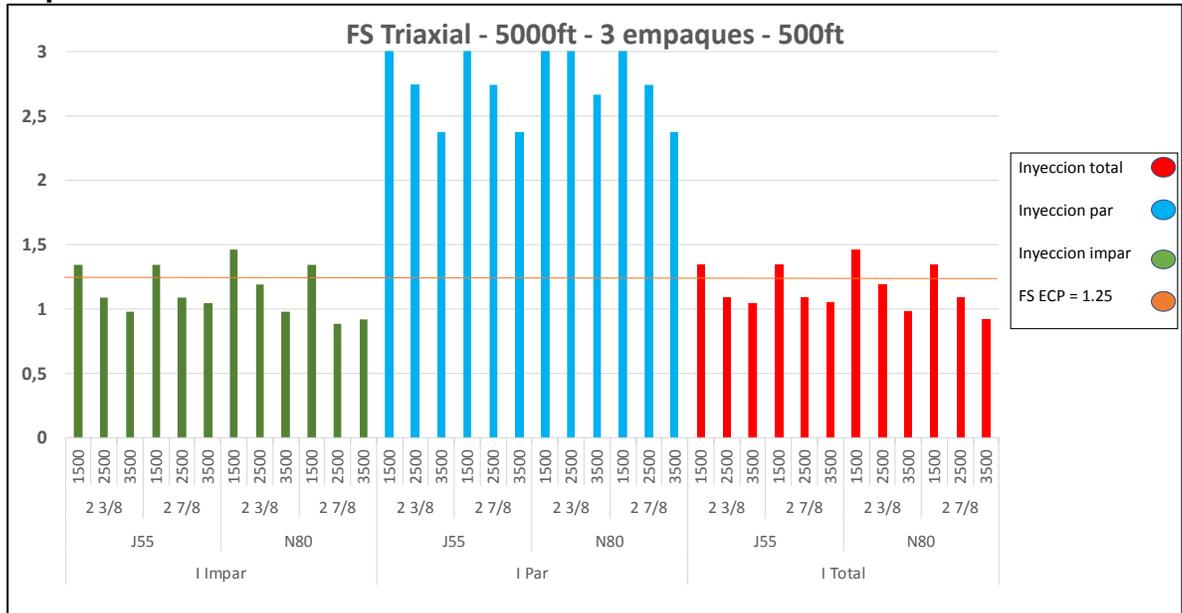
Gráfica 24. Factor de Seguridad Triaxial – Profundidad 5000 ft – 3 empaques – Espaciamiento 400 ft.



Fuente: Elaboración propia. 2019.

A continuación, en la **Gráfica 25** se ilustra el espaciamiento de 500 ft.

Gráfica 25. Factor de Seguridad Triaxial – Profundidad 5000 ft – 3 empaques – Espaciamiento 500 ft.

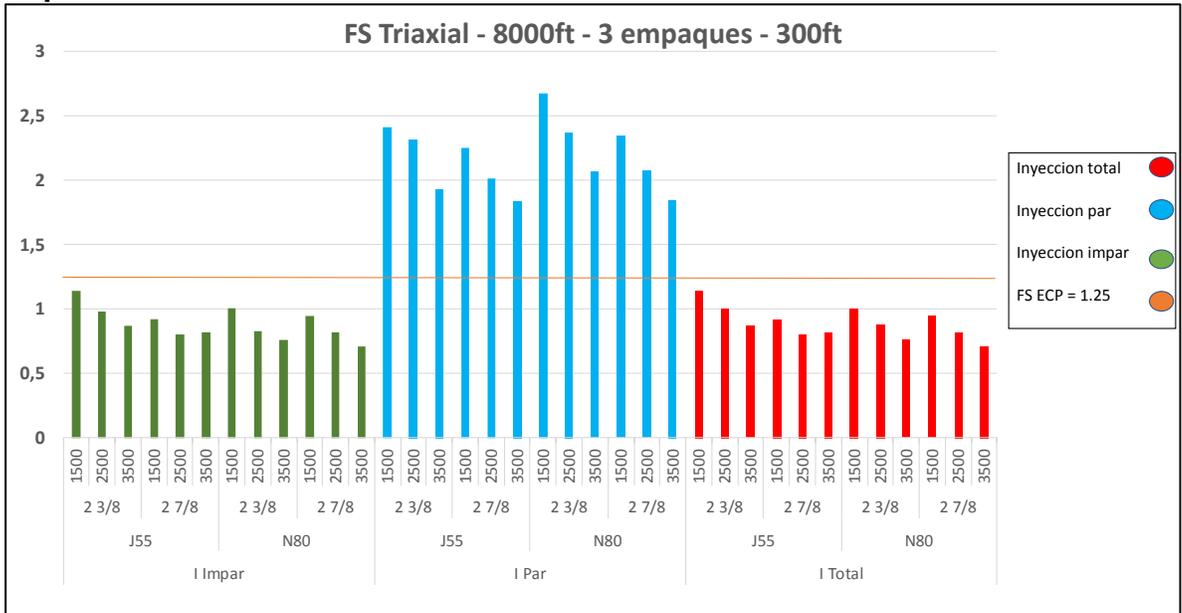


Fuente: Elaboración propia. 2019.

Al igual que en los casos anteriores, se pueden notar patrones en donde la inyección par es la más eficiente, dando los mejores resultados. De igual forma, se puede notar que, a profundidades de 5000 ft, una presión de inyección de 1500 Psi es óptima para realizar cualquier tipo de operación.

A continuación, en la **Gráfica 26** se inicia con los resultados arrojados a 8000 ft.

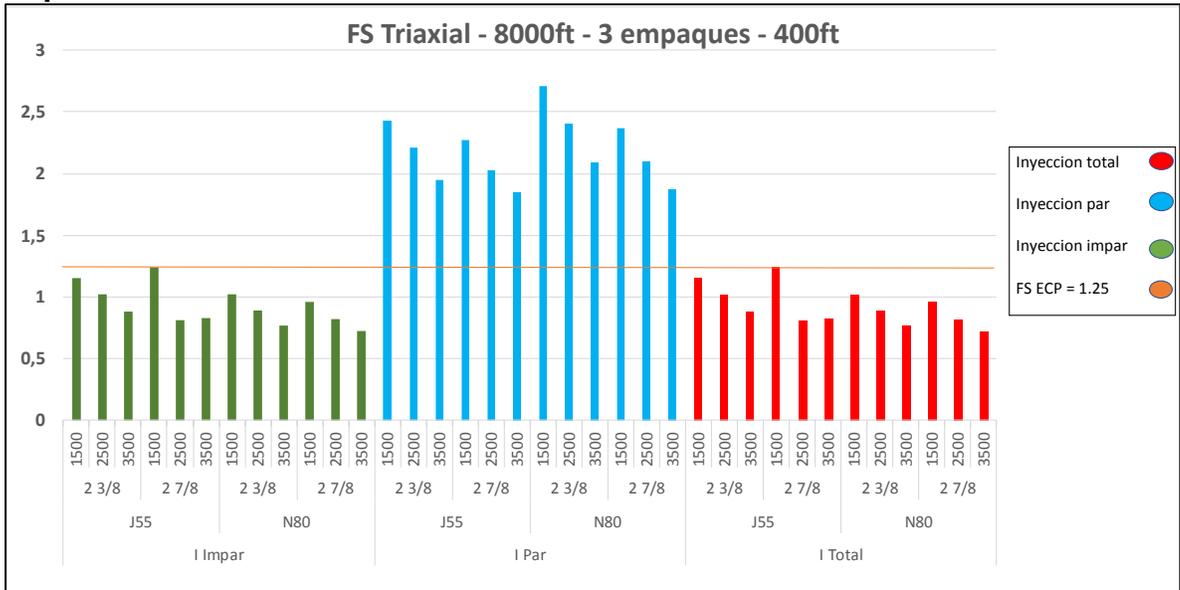
Gráfica 26. Factor de Seguridad Triaxial – Profundidad 8000 ft – 3 empaques – Espaciamiento 300 ft.



Fuente: Elaboración propia. 2019.

A esta profundidad, el esquema de inyección par sigue siendo el más adecuado de los modelos, siendo el único donde los factores que superan el umbral delimitado por la empresa. Para inyección total e impar los patrones formados en la graficas de diseño axial se repiten nuevamente. En la **Gráfica 27** a continuación, se puede apreciar el factor de seguridad triaxial, pero con un espaciamiento de 400 ft.

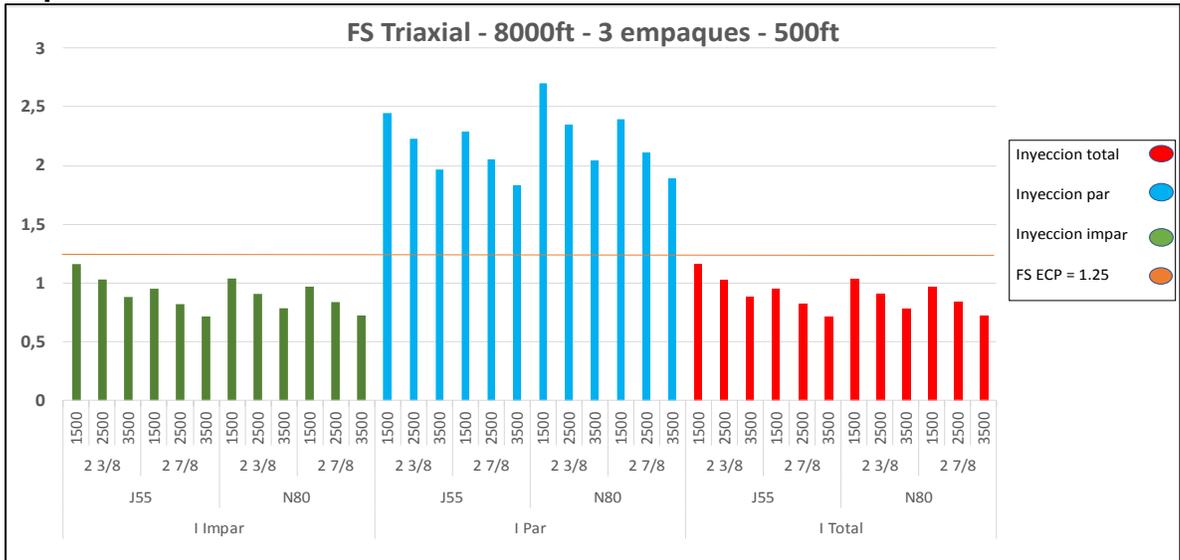
Gráfica 27. Factor de Seguridad Triaxial – Profundidad 8000 ft – 3 empaques – Espaciamiento 400 ft.



Fuente: Elaboración propia. 2019.

Finalmente, para el espaciamiento de 500 ft, (ver **Gráfica 28**) se repite el patrón, el esquema de inyección par es el único que supera la marca del factor de diseño. Si bien es cierto en inyección par y total para tubería J55 con presión de 1500 psi pasan el umbral, los factores apenas alcanzan la marca, lo cual indica que funciona. Pero al ser los factores de seguridad, medidas de prevención con un margen extra de las condiciones estrictamente requeridas, sería necesario realizar un estudio más detallado de las condiciones de operación y las características del pozo a fin de evitar cualquier imprevisto.

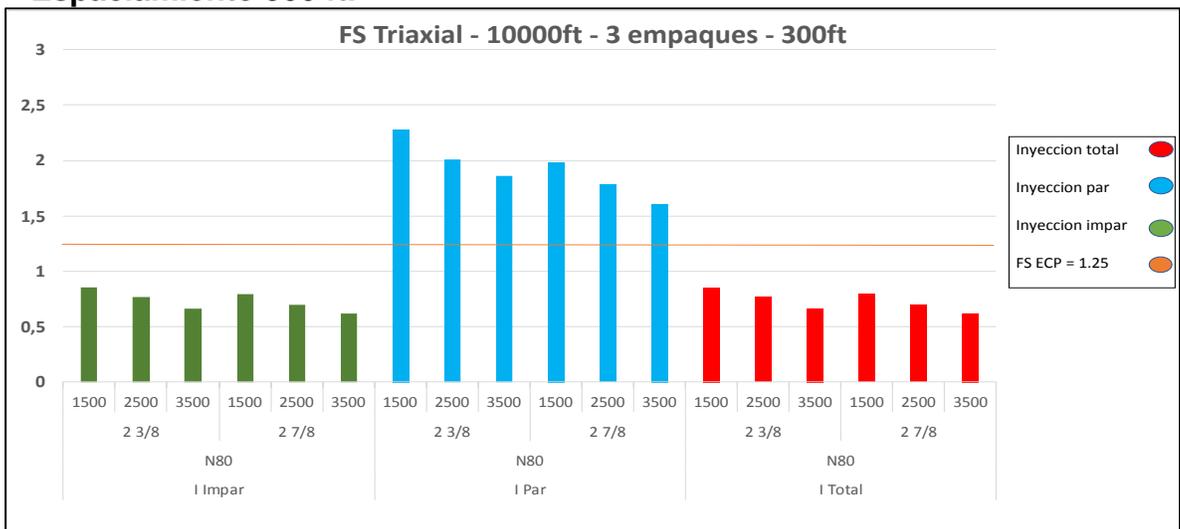
Gráfica 28. Factor de Seguridad Triaxial – Profundidad 8000 ft – 3 empaques – Espaciamiento 500 ft.



Fuente: Elaboración propia. 2019.

En la **Gráfica 29**, se expresan los resultados a profundidades de 10000 ft utilizando 3 empaques, al igual que los casos con factores de seguridad axial, a profundidades de 10000 ft no se analiza la tubería J55 ya que se sale de la envolvente operativa. A continuación, se empieza con un espaciamiento de 300 ft.

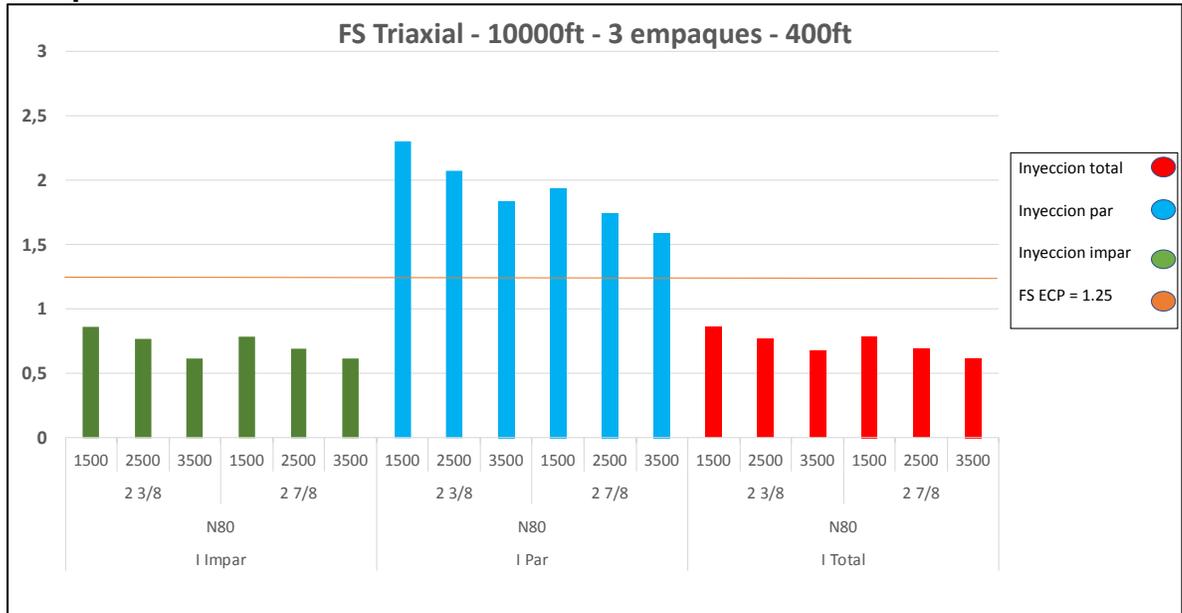
Gráfica 29. Factor de Seguridad Triaxial – Profundidad 10000 ft – 3 empaques – Espaciamiento 300 ft.



Fuente: Elaboración propia. 2019.

En la **Gráfica 30** se cambia el espaciamiento a 400 ft a diferencia de la anterior gráfica.

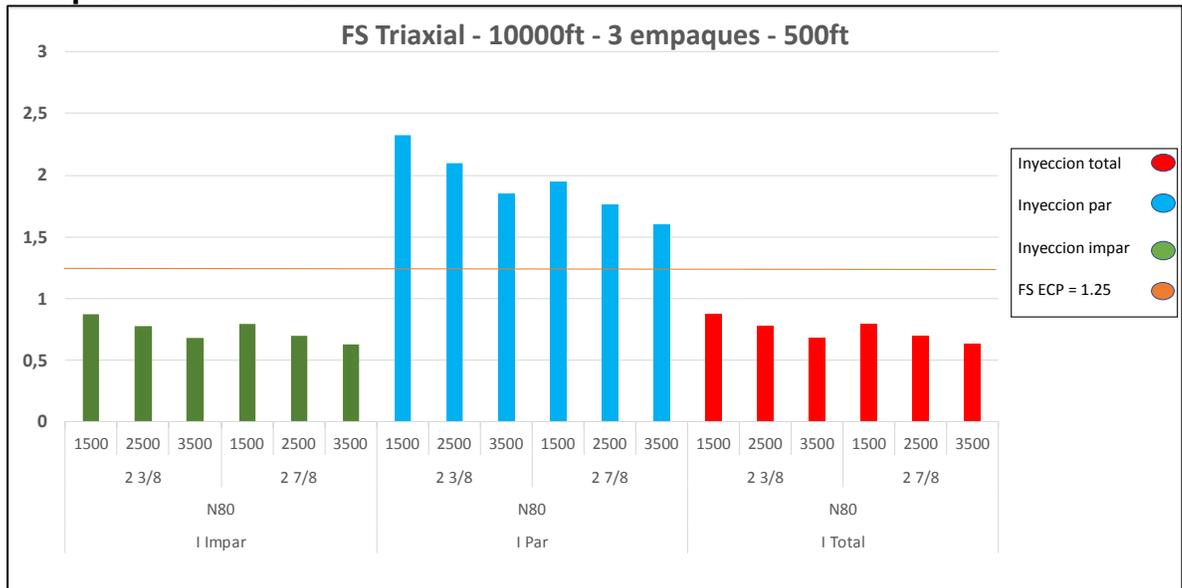
Gráfica 30. Factor de Seguridad Triaxial – Profundidad 10000 ft – 3 empaques – Espaciamiento 400 ft.



Fuente: Elaboración propia. 2019.

En la **Gráfica 31**, se exponen los resultados utilizando 500 ft de espaciamiento.

Gráfica 31. Factor de Seguridad Triaxial – Profundidad 10000 ft – 3 empaques – Espaciamiento 500 ft.

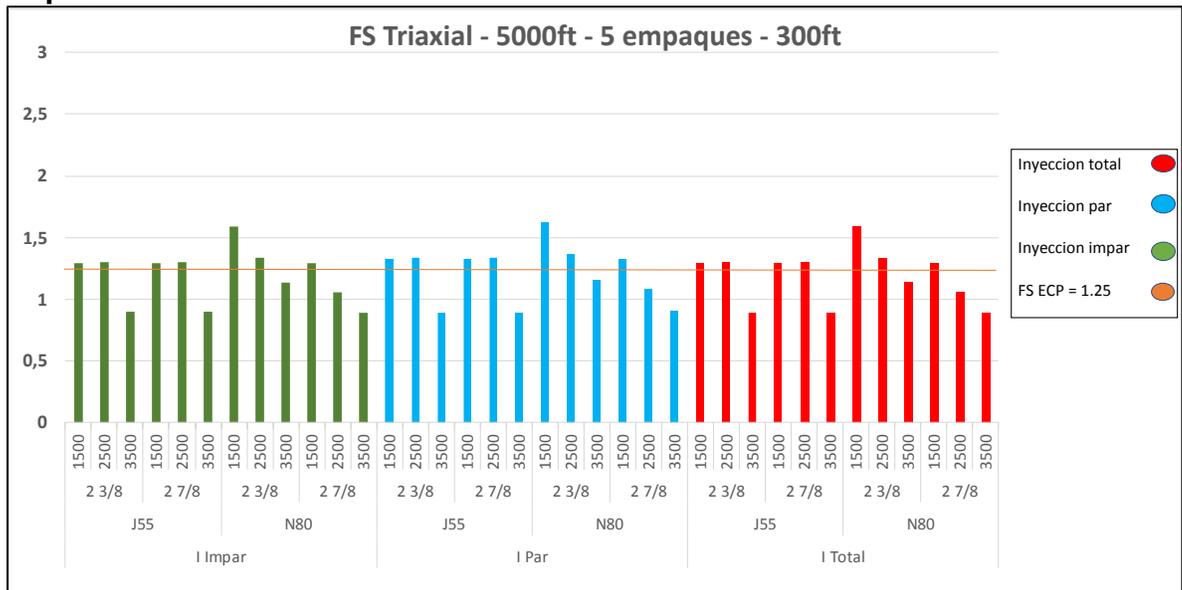


Fuente: Elaboración propia 2019.

Al igual que en casos anteriores, el cambio de espaciamento no aporta cambios relevantes y a su vez, el esquema de inyección par es el más efectivo. De mismo modo se puede apreciar que a una profundidad de 10000 ft todos los factores de seguridad se ven con una disminución apreciable.

7.2.2.2 Factor de seguridad triaxial a 5 empaques. En la **Gráfica 32**, se cambia en número de empaques a 5 y se reduce el espaciamento a 300 ft, con una profundidad de 500 ft.

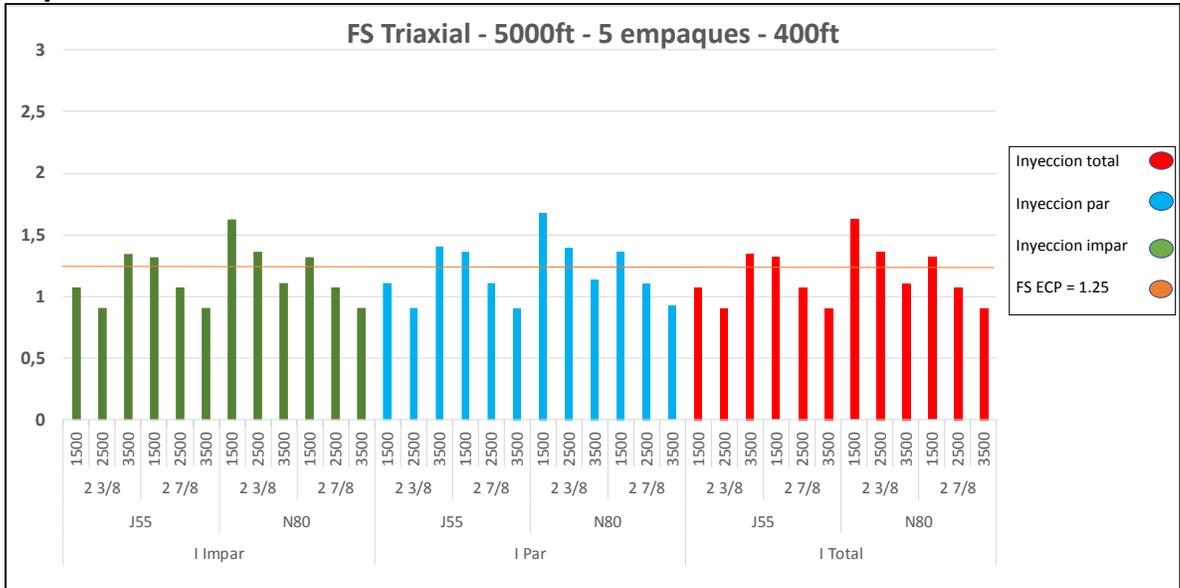
Gráfica 32. Factor de Seguridad Triaxial – Profundidad 5000 ft – 5 empaques – Espaciamento 300 ft.



Fuente: Elaboración propia. 2019.

Como se puede apreciar, a una profundidad de 5000 ft con 5 empaques los factores de diseño se ven pasando el umbral por apenas unos cuantos decimales, las presiones de 1500 y 2500 Psi son los más aconsejables. A continuación, en la **Gráfica 33** se cambia el espaciamento a 400 ft.

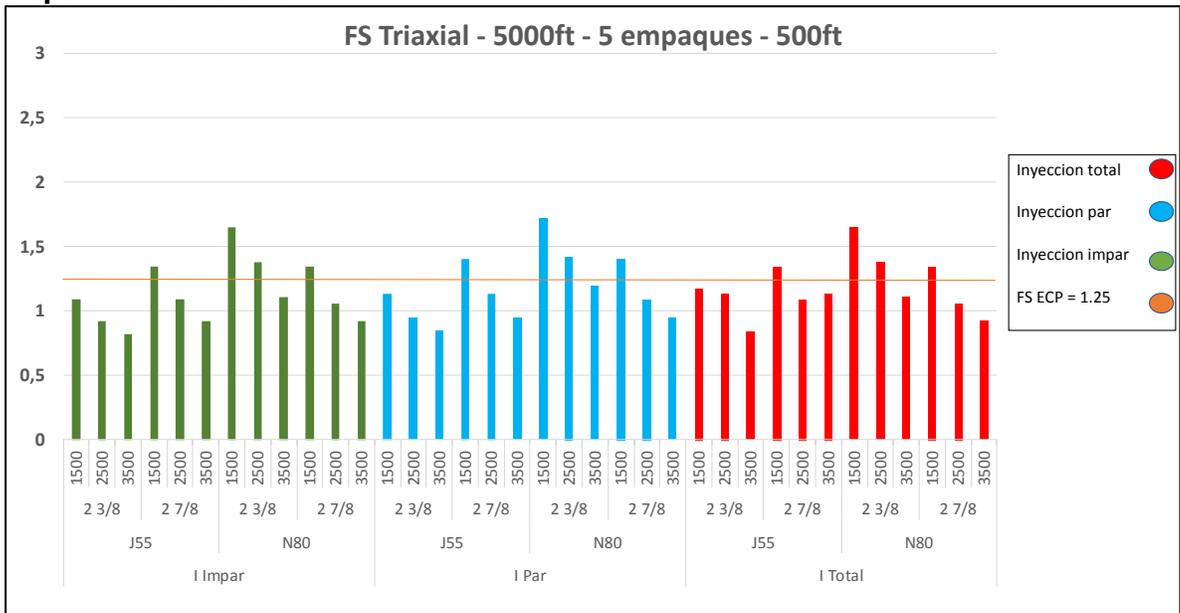
Gráfica 33. Factor de Seguridad Triaxial – Profundidad 5000 ft – 5 empaques – Espaciamiento 400 ft.



Fuente: Elaboración propia. 2019.

Finalmente, se cambia el espaciamiento a 500 ft, como se muestra en la **Gráfica 34**.

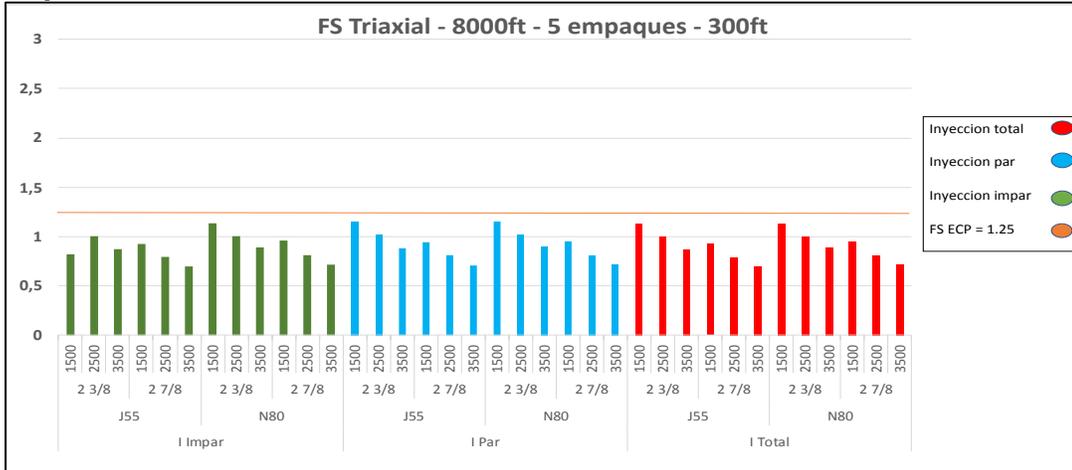
Gráfica 34. Factor de Seguridad Triaxial – Profundidad 5000 ft – 5 empaques – Espaciamiento 500 ft.



Fuente: Elaboración propia. 2019.

Los 3 esquemas mostraron resultados similares, utilizando 5 empaques el tipo de operación y el espaciamiento entre empaques no afectan en mayor medida el valor de los resultados. Sin embargo, se puede apreciar que los valores arrojados en las corridas con tubería N80, son un poco más efectivos. La presión de inyección, conserva los patrones mostrados en los casos anteriores. En la **Gráfica 35**, se cambia la profundidad a 8000 ft y 300 ft de espaciamiento.

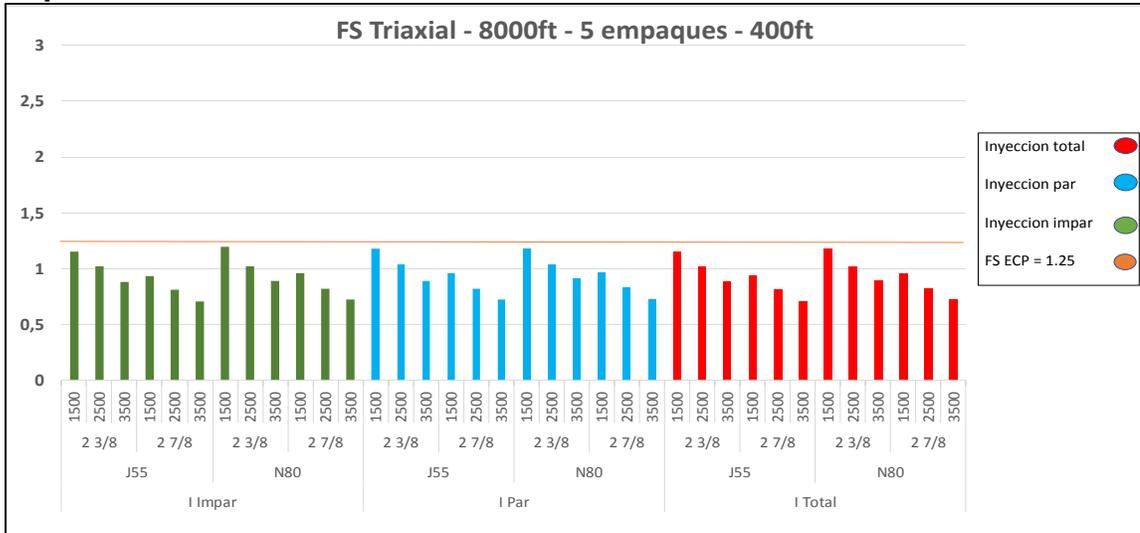
Gráfica 35. Factor de Seguridad Triaxial – Profundidad 8000 ft – 5 empaques – Espaciamiento 300 ft.



Fuente: Elaboración propia. 2019.

En la **Gráfica 36**, se ilustra el cambio de espaciamiento a 400 ft.

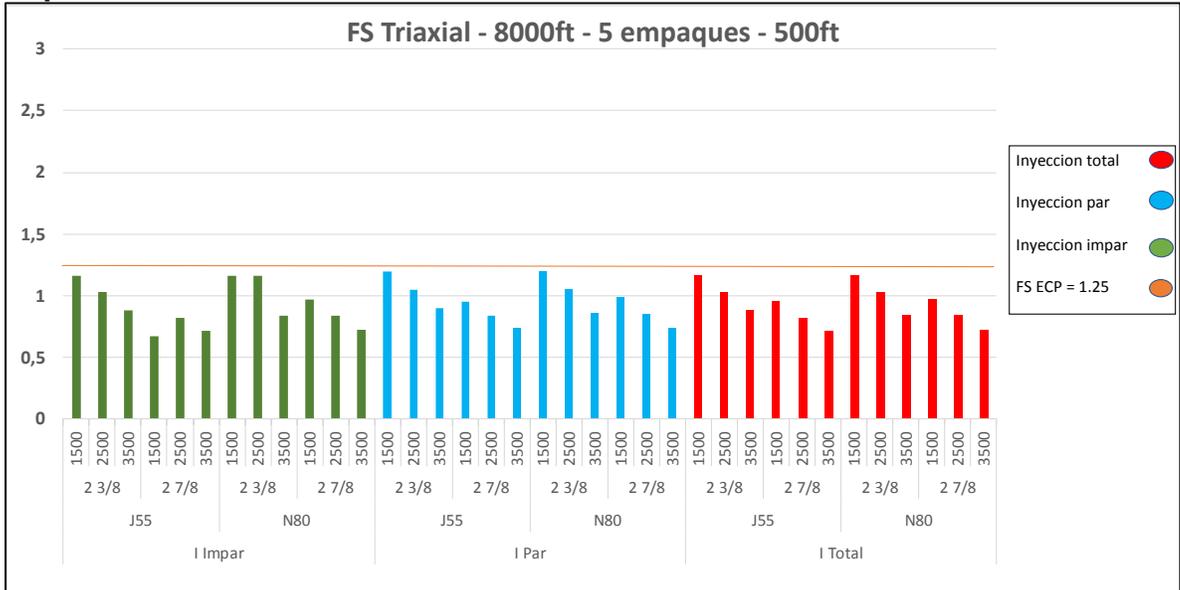
Gráfica 36. Factor de Seguridad Triaxial – Profundidad 8000 ft – 5 empaques – Espaciamiento 400 ft.



Fuente: Elaboración propia. 2019.

En la **Gráfica 37**, se disponen los resultados con espaciamento de 500 ft, como se puede ver a continuación.

Gráfica 37. Factor de Seguridad Triaxial – Profundidad 8000 ft – 5 empaques – Espaciamento 500 ft.

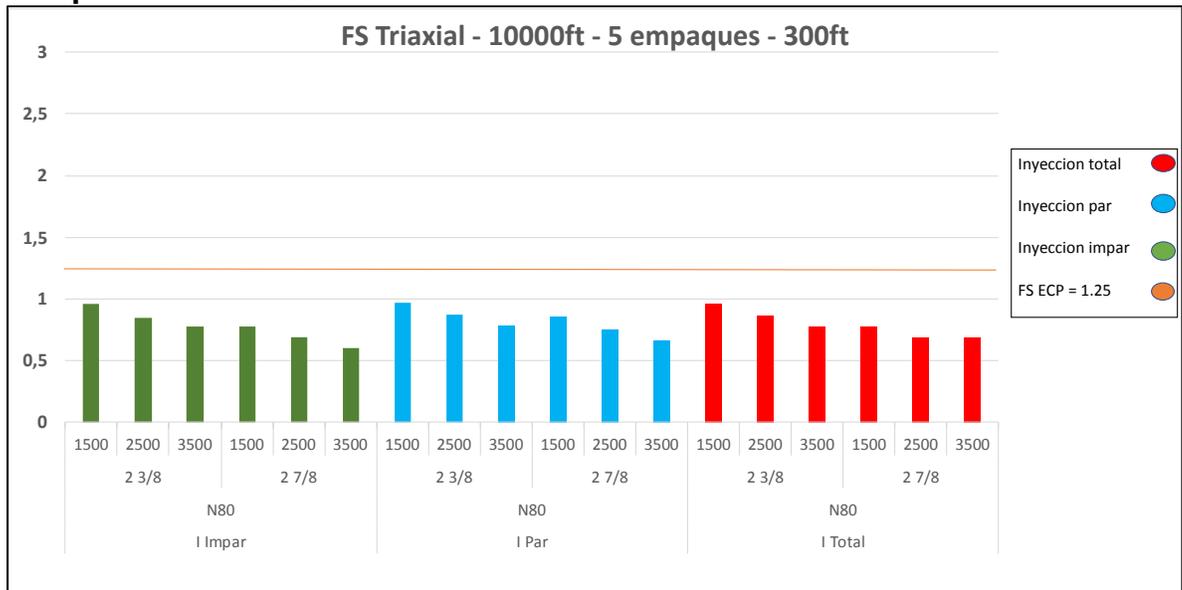


Fuente: Elaboración propia. 2019.

Con estas condiciones el completamiento falla en todos los casos. A pesar de que hay valores que se acercan bastante al umbral, la dificultad de trabajar con 5 empaques con estas características descartaría este tipo de arreglos.

En la **Gráfica 38**, se cambia el espaciamento a 300 ft con profundidad de 10000 ft. Al igual que todos los anteriores casos, la tubería J55 no entra en los cálculos puesto que se pasan de la envolvente operativa del Wellcat™.

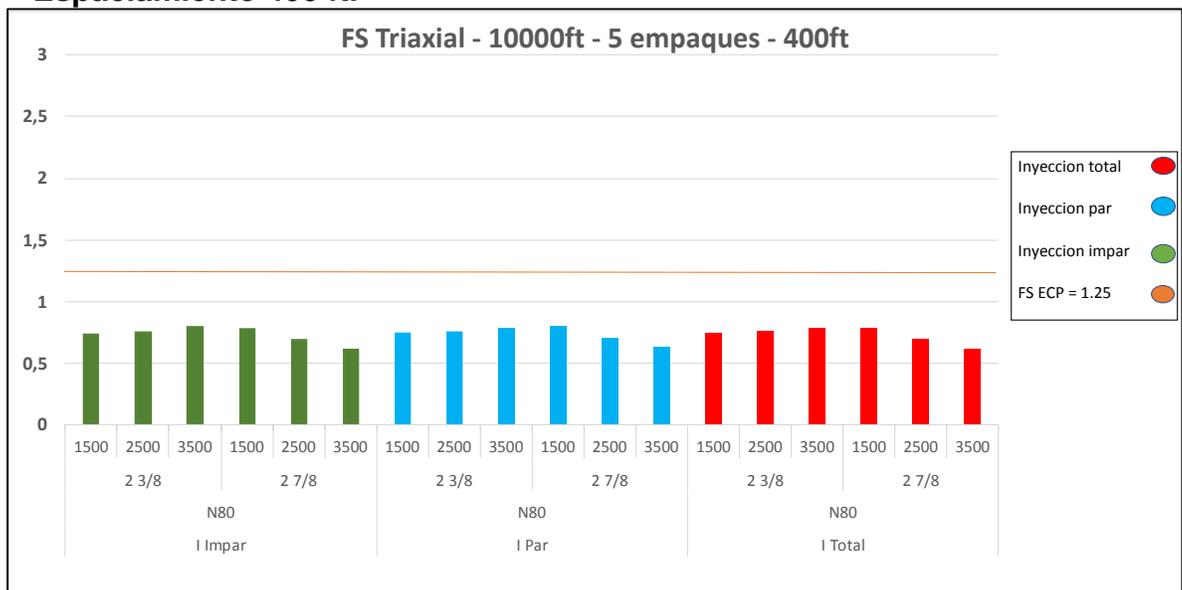
Gráfica 38. Factor de Seguridad Triaxial – Profundidad 10000 ft – 5 empaques – Espaciamiento 300 ft.



Fuente: Elaboración propia. 2019.

En la **Gráfica 39**, se cambia el espaciamiento entre empaques a 400 ft.

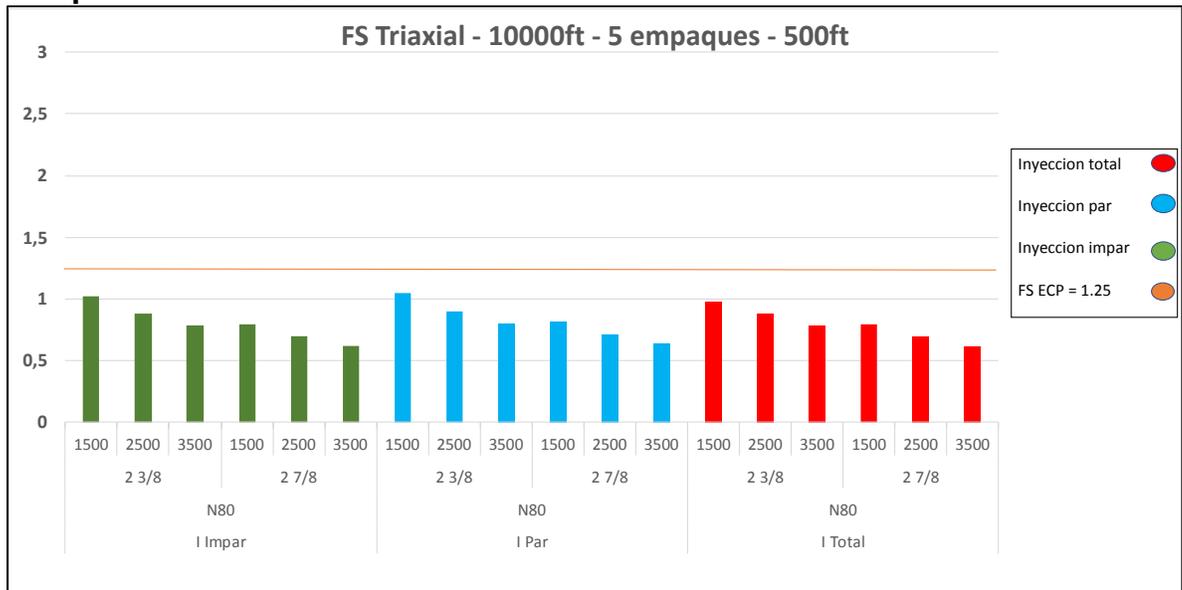
Gráfica 39. Factor de Seguridad Triaxial – Profundidad 10000 ft – 5 empaques – Espaciamiento 400 ft.



Fuente: Elaboración propia. 2019.

Finalmente, se cambia a 500 ft el espaciamiento en la **Gráfica 40**.

Gráfica 40. Factor de Seguridad Triaxial – Profundidad 10000 ft – 5 empaques – Espaciamiento 500 ft.



Fuente: Elaboración propia. 2019.

Al igual que en los casos simulados con profundidad de 8000 ft para el factor triaxial, los empaques fallan, esta vez estando mas alejados del factor de diseño mínimo requerido, lo cual descartaría por este factor el uso de los empaques tándem para estas condiciones.

Para el caso del factor triaxial, lo recomendado sería utilizar 3 empaques hasta una profundidad de 8000 ft, con un esquema de inyección par siendo el mas efectivo. Ambos grados de tubería son bastante eficientes, aunque el N80 muestra resultados ligeramente mejores. Nuevamente el espaciamiento resulta siendo un factor no relevante.

Se podría utilizar también un arreglo con 5 empaques, sin embargo, esta condición se podría aplicar únicamente a una profundidad de 5000 ft, mientras se inyecte a una presión baja (1500 Psi), grado de tubería y diámetro no afectan demasiado en este escenario.

Para utilizarse a una profundidad de 8000 ft, se necesita hacer estudios más detallados, después de todo el valor arrojado por las simulaciones es muy cercano al mínimo requerido.

Habiendo analizado los resultados del factor triaxial, se pasará a analizar el factor de estallido.

7.2.3 Parámetros factor de seguridad estallido. Después de realizar las corridas, se determinó que este factor no sería tenido en cuenta en los análisis posteriores, ya que bajo las condiciones de los 648 escenarios propuestos ninguno falló. Esto se debe a que en ninguno de los casos las presiones internas de la tubería excedían las fuerzas exteriores y el grado del metal hace la tubería lo suficientemente robusta para no causar deformaciones en las paredes por este efecto.

7.2.4 Parámetros factor de seguridad colapso. Mediante la información recopilada y los posteriores análisis, se determinó que los empaques tándem no tendrán fallas por colapso hasta profundidades de 5000 ft sin importar la distancia entre empaques ni el esquema de inyección.

Para la profundidad de 8000 ft, para el esquema de inyección par, no ocurren fallas, por el contrario bajo los esquemas impar (Ver **Figura 46**) y total (Ver **Figura 48**) los empaques comienzan a presentar fallas. Esto es debido a las sobrepresiones generadas por la inyección, dado a que son los empaques directamente debajo de los que se utilizan para el proceso de inyección los que reciben la carga extra.

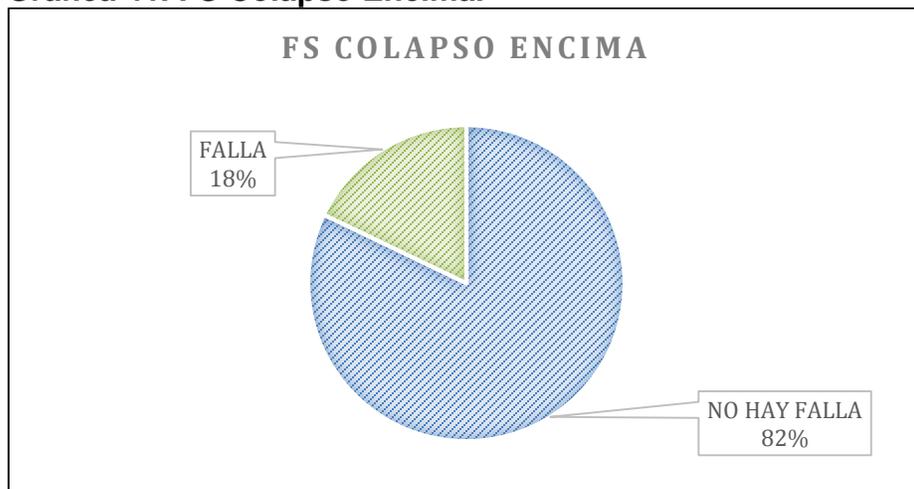
El espaciado juega aquí un factor clave, ya que la cercanía entre los empaques determina la cantidad de estrés extra que debe soportar la herramienta, siendo tal impacto que, para espaciados de 300 ft, todos los empaques fallan, para los casos de 400 ft y 500 ft, solo al inyectarse con altas presiones (3500 Psi) tienden a fallar.

A la profundidad de 10000 ft, el completamiento falla sin importar el espaciado, dado a que como se dijo anteriormente las cargas extras producto de los procesos de inyección someten a las herramientas directamente debajo del empaque a través del cual se da paso al fluido a la tubería a sobreesfuerzos que superan el punto de cedencia del material de la tubería ocasionando el colapso.

Aumentar el diámetro causa que más presión se ejerza sobre los empaques, al ser mayor la superficie de contacto, incrementando la cantidad de fuerza que se aplica sobre la herramienta, volviéndola más propensa a fallas.

Analizando el factor de diseño por encima del empaque por colapso, de los 1080 datos recolectados se pudo establecer que en el 82% de los casos, la tubería no sería propensa a falla y que solo el 18% la presentaría automáticamente, por las razones descritas anteriormente. (Ver **Gráfica 41**)

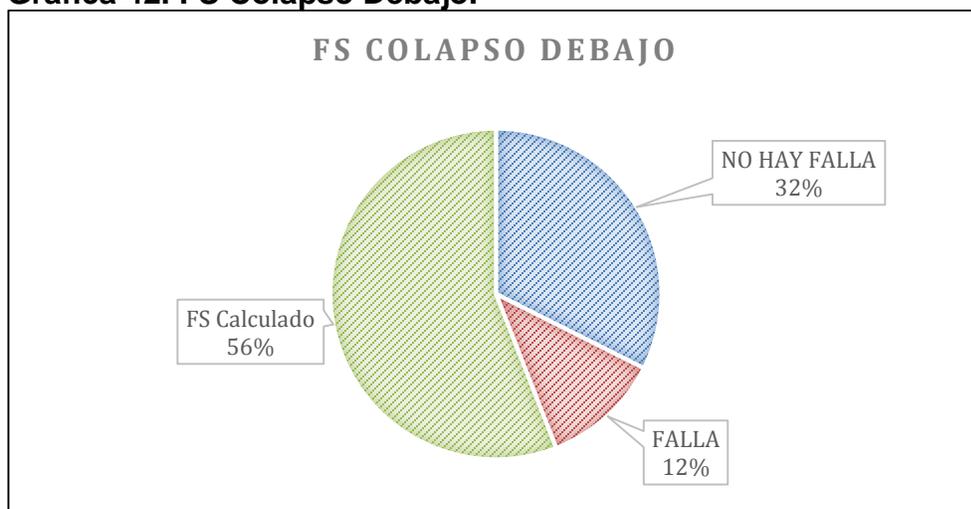
Gráfica 41. FS Colapso Encima.



Fuente: Elaboración propia. 2019.

Para el factor de colapso por debajo del empaque, se determinó que en el 88% de los casos el completamiento no fallaba, 56% del 88% de los datos el programa calcula el valor, estando siempre por encima de los factores estipulados antes de las corridas y para el 32% restante, el valor no se calcula al superar con creces estos factores. Solo en el 12% de los casos el completamiento falla por las razones expuestas anteriormente. (Ver **Gráfica 42**).

Gráfica 42. FS Colapso Debajo.



Fuente: Elaboración propia. 2019.

La razón por la cual el modelo calcula los valores por debajo y no por encima, es debida a las cargas extra que los esquemas de inyección descargan sobre la parte de arriba del empaque, desajustándolo y afectando de manera contundente el factor de diseño, mientras que el factor de abajo, al no ser impactado directamente

por el fluido de la operación, alcanza a ser impactado lo suficiente para calcular el factor de diseño por debajo del empaque, pero no para generar la falla.

Realizado el análisis de resultados de las corridas en base a las diferentes variables seleccionadas, se pasará a dar los criterios, recomendaciones y procedimientos para el asentamiento de los empaques tándem.

7.3 CRITERIOS, RECOMENDACIONES Y PROCEDIMIENTOS PARA ASENTAMIENTO DE EMPAQUES TIPO TÁNDEM

Teniendo en cuenta todos los factores obtenidos y el análisis de los datos realizados, junto con las gráficas, se realizan los criterios y recomendaciones según los efectos sufridos por los empaques tipo tándem. Para ello se establecen los criterios según las variables su relevancia. Es decir, se compararán las variables según los análisis obtenidos. Para este fin, se dispusieron tablas respecto a las variables que fueron expuestas y qué criterios se tienen en cuenta.

7.3.1 Criterios según variables expuestas. A continuación, se contempla cada variable que fue tomada para el análisis de datos. Se tienen en cuenta los datos tomados para cada variable y se establece un criterio en base a los análisis anteriores. Se empieza con la profundidad como primera variable.

7.3.1.1 Criterios Profundidad. Teniendo en cuenta todo lo establecido, se presenta la **Tabla 17**, en esta se tienen en cuenta las condiciones que fueron determinadas.

Tabla 17. Criterios de profundidad

Profundidad (ft)	Criterio
5000	A presión de 1500 Psi funcionan las inyecciones. La inyección par es viable sin importar el espaciamiento. Para un número superior a 3 empaques es necesario replantear la presión de inyección para no generar falla. El tamaño de la tubería y grado no influyen de manera significativa.
8000	Se debe tener cuidado al momento de plantear operaciones a esta profundidad, solo bajo esquemas de inyección par se pueden asegurar buenos resultados. Con una tubería de 2 3/8 y presiones de 1500 Psi se ven escenarios satisfactorios, tanto para 3 como para 5 empaques.
10000	Peligra la integridad del completamiento. Solo es óptima una operación de inyección par con 3 empaques, las demás derivan en falla fija.

Fuente: A Elaboración propia. 2019.

7.3.1.2 Criterios número de empaques. El segundo factor más trascendental fue el número de empaques. En la **Tabla 18** se tienen en cuenta los criterios.

Tabla 18. Criterios de número de empaques.

Numero de empaques	Criterio
3 empaques	Con esta condición se pueden bajar completamientos variando cualquier otra de las condiciones. Sin embargo, después de los 5000 ft, las otras variables deben ser tenidas en cuenta cuidadosamente, especialmente el tipo de operación, ya que son estas las que llevan a la falla del empaque.
5 empaques	Se pueden efectuar operaciones con 5 empaques hasta profundidades de 5000 ft a bajas presiones para cualquier esquema. Para hacerlas con otras condiciones se requeriría un estudio más detallado de los perfiles de inyección.

Fuente: Elaboración propia. 2019.

7.3.1.3 Criterios para tipo de operación. A continuación, se presenta la tabla de criterios para el tipo de operación como se ve en la **Tabla 19**.

Tabla 19. Criterios de tipo de operación.

Tipo de operación	Criterio
Inyección total	El caso de inyección total puede ser tenida en cuenta con una profundidad de 5000 ft sin importar la cantidad de empaques o el tipo de operación. A una profundidad mayor se deben analizar minuciosamente la cantidad de empaques a bajar y las presiones de inyección. El diámetro y grado de tubería no son relevantes para estos aspectos.
Inyección par	Al tener un caso de 3 empaques, la inyección par es óptima puesto que no hay cargas sobre el empaque. Por ende, se puede aplicar sin ninguna restricción. Para el uso de 5 empaques, solamente se aconseja para profundidades de 5000 ft o inferiores.
Inyección impar	Los criterios de inyección total se aplican a la inyección impar. Esto teniendo en cuenta que en ambas condiciones los empaques tándem sufren aumento en las cargas por encima de ellos.

Fuente: Elaboración propia. 2019.

7.3.1.4 Criterios para presión de inyección. En la **Tabla 20**, a continuación, se encuentran los criterios para la presión de inyección.

Tabla 20. Criterios de presión.

Presión (Psi)	Criterio
1500	Se pueden realizar sin ningún inconveniente a una profundidad de 5000 ft, sin importar la operación u otras características importantes de la tubería.
2500	Al igual que en el criterio anterior se puede aplicar a 5000 ft sin ningún problema. Para las demás profundidades, condiciones como la cantidad de empaques, el tipo de operación, el grado y tamaño de la tubería interceden en la generación de la falla.
3500	No apta para ningún tipo de procedimiento, no debe emplearse para ninguno de los escenarios expuestos en este estudio. Potencial para fallas.

Fuente: Elaboración propia. 2019.

7.3.1.5 Criterios para tamaño de tubería. A continuación, en la **Tabla 21**, se tienen los criterios establecidos para el tamaño de la tubería teniendo.

Tabla 21. Criterios de tamaño de tubería.

Tamaño de tubería (in)	Criterio
Casing 7 Tubing 2 ⁷/₈	Tamaño de diámetro óptimo para profundidades someras, para casos superiores a 5000 ft es preferible usar otro tipo de tubería.
Casing 5 ¹/₂ Tubing 2 ³/₈	Tamaño de tubería óptimo para profundidades altas a comparación de la primera, de cualquier manera, es necesario tener estudios respecto a presión, tipo de inyección y número de empaques para un óptimo procedimiento.

Fuente: Elaboración propia. 2019.

7.3.1.6 Criterios para grado de tubería. Los criterios expuestos para los dos grados de tubería se ven expuestos en la **Tabla 22**.

Tabla 22. Criterios de grado de tubería.

Grado de tubería	Criterio
N80	Según las condiciones que se planteen, la tubería N80 es óptima a profundidades altas. A pesar de esto, es necesario tener en mente las otras variables. A una profundidad de 5000 ft en adelante, se aconseja inyectar a una presión de 1500 Psi para no generar algún tipo de falla en los empaques.
J55	Mismos criterios que grado de tubería N80 a diferencia de la profundidad. No es recomendable usarse a profundidades mayores de 8000 ft.

Fuente: Elaboración propia. 2019.

7.3.1.7 Criterios de espaciamento. Finalmente se tienen los criterios de espaciamento expuestos en la **Tabla 23**.

Tabla 23. Criterios de espaciamento.

Espaciamento (ft)	Criterio
300	Este espaciamento es inconveniente para altas profundidades, donde automáticamente fallan, para cualquier otro escenario no afecta de manera representativa.
400-500	Estos espaciamentos pueden causar falla, si se agrupan con otras condiciones desfavorables de profundidad y tipo de inyección.

Fuente: Elaboración propia. 2019.

Al haber obtenido los criterios para el asentamiento de empaques tipo tándem, se deben realizar recomendaciones y procedimientos para que las operaciones sean exitosas.

7.3.2 Procedimiento y recomendaciones. Se obtuvieron los criterios específicos según los casos establecidos. A pesar de esto, es necesario tener en cuenta recomendaciones y procedimientos que sean óptimos independientemente del tipo de completamiento que se busque realizar.

Para el procedimiento de asentamiento es necesario poseer lo siguiente. Primero, se debe tener en cuenta el grado de tubería junto con el tamaño (independientemente de los casos que se puedan presentar). Deben ser los mejores que soporten los tipos de inyección presente, esto quiere decir que para un completamiento selectivo es preferible usar el grado de tubería N80, junto con diámetro de tubería $2 \frac{3}{8}$.

Para las recomendaciones de este tipo de casos, es necesario tener en cuenta la presión y el tipo de inyección que se busque realizar, en ya que el fin de una sarta

selectiva es generar distintos tipos de inyección según lo que se plantee. Por esto, se deben considerar todos los casos presentes (inyección par, impar y total) afirmativos para que se cumpla la premisa inicial. Profundidades mayores con altas presiones de inyección derivan en fallas en los empaques. De las variables anteriores, dependerá el espaciamiento, si bien este factor no es relevante si no hasta que se agrupa con las condiciones desfavorables de las variables dichas.

Dicho lo anterior el mejor escenario corresponde a uno donde se tenga un esquema de inyección par, inyectando a 1500 Psi, utilizando una tubería grado N80, con diámetro de $2\frac{3}{8}$, a una profundidad de 5000 ft, bajando 3 empaques con espaciamiento de 400 o 500f ft.

Otra recomendación, que mejora considerablemente una sarta selectiva, es bajar intercalaciones de empaques tándem con empaques con cuñas convencionales, con el fin de mejorar las condiciones en las que se encuentran inmersos los empaques tipo tándem.

7.4 APLICACION DEL MODELO PTA EN ESCENARIOS REALES

Para una mayor certeza sobre los resultados, se pasa a aplicar el modelo a dos casos reales para evaluar su efectividad y afianzar las conclusiones obtenidas de las experiencias anteriores.

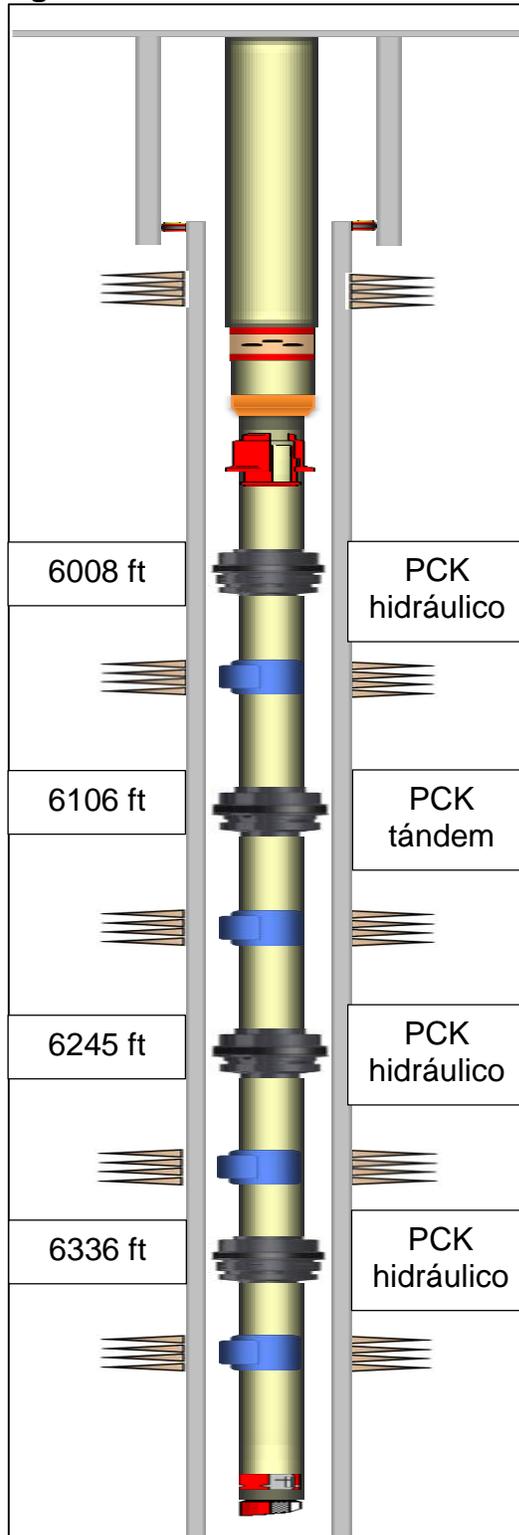
7.4.1 Primer caso. Obedece a la sarta de completamiento del Pozo A del campo Alpha de Ecopetrol S.A., utilizada para inyección de agua. El nombre real del pozo y del campo fueron cambiados por razones de confidencialidad.

Esta sarta tiene una longitud de 6586 ft, contados desde la mesa rotaria y está comprendida por los siguientes elementos:

- Camisa de cierre de $2\frac{7}{8}$ a una profundidad de 5961 ft.
- Cross over a ubicado a 5995 ft, el cual cambia el diámetro de $2\frac{7}{8}$ a $2\frac{3}{8}$.
- On-Off tool a la profundidad de 6001 ft y diámetro de $2\frac{3}{8}$.
- Empaque hidráulico de cuñas ubicado a 6008 ft.
- Mandril de inyección de $2\frac{3}{8}$ a 6042ft.
- Empaque tándem de $2\frac{3}{8}$ a 6106 ft.
- Mandril de inyección de $2\frac{3}{8}$, localizado a 6173 ft.
- Empaque hidráulico de cuñas ubicado a 6245 ft.
- Mandril de inyección de $2\frac{3}{8}$, localizado a 6281 ft.
- Empaque hidráulico de cuñas ubicado a 6336 ft.
- Mandril de inyección de $2\frac{3}{8}$, localizado a 6369 ft.
- Nipple de asentamiento de $2\frac{3}{8}$, ubicado a 6472 ft.
- Zapato de perforación de $2\frac{3}{8}$ a 6476 ft de profundidad.

La **Figura 60**, ilustra el estado mecánico del pozo en cuestión.

Figura 60. Estado mecánico Pozo A



Fuente: Completion services. 2019.

Para esta simulación se tienen 5 escenarios los cuales corresponden a la inyección total, inyección par, inyección impar, prueba de tubería y prueba de anular.

El **Cuadro 9**, a continuación, ilustra los datos de entrada que se le colocan en el programa Wellcat™ para realizar las corridas.

Cuadro 9. Datos de entrada del primer caso.

Datos		Valor
Casing		7" - 26 # P-110
Tubing		2 7/8" - 6.5 # N-80
Temperatura superficie		90 °F
Gradiente de temperatura		1.5 °F/100 ft
Densidad del fluido de inyección		8.33 ppg
Presión inyección		2000 psi
Caudal de inyección		3000 Bwp
Empaque PCS-5	Presión interna	11200 Psi
	Tensión	67000 Psi
	Compresión	67000 Psi
"Sliding Sleeve XO profile (camisa)"	Presión interna	6000 Psi
	Tensión	122000 Psi
	Compresión	122000 Psi
Mandril MGDWI VRF (Texproil)	Presión interna	6000 Psi
	Tensión	114000 Psi
	Compresión	114000 Psi
CONECTOR ON-OFF (Texproil)	Presión interna	8636 Psi
	Tensión	207000 Psi
	Compresión	207000 Psi

Fuente: Elaboración propia. 2019

A continuación, en la **Figura 61** se presenta la información de entrada necesaria para realizar las correcciones con el modelo PTA.

Figura 61. Datos de entrada primer caso.

PACKER TANDEM ANALYSIS - PTA							
DATOS DE ENTRADA							
TUBERIA			REVESTIMIENTO			FACTORES DE DISEÑO	
Diametro externo de la tubería	2,875	in	Diametro externo del revestimiento	7	in	Tension	1,34
Diametro interno de la tubería	2,441	in	Diametro interno del revestimiento	6,276	in	Compresion	1,2
Yield Point	80000	psi	Diametro del sello del empaque	2,875	in	Triaxial SF	1,25
Rating axial de la tubería	144962	psi	Grado de Tubería	P-110		Estallido SF	1,25
Rating axial del empaque	119200	psi				Colapso SF	1
Número de empaques	4						
Numero de Casos	5						
Grado de Tubería	L-N-80						

Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería de completamientos de sargas selectivas. Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017

Realizadas las correcciones, se exponen los resultados.

Para el caso de la inyección total, se puede apreciar que el empaque 2 (tándem) presenta fallas en los factores axial y triaxial, estos al no pasar el umbral respectivo. Estallido y colapso no presentan problemas. (Ver **Tabla 24**)

Tabla 24. Resultado Inyección total – Primer caso

Caso 1	Total								
Name	Packer MD (ft)	FD Axial		FD Triaxial		FD estallido		FD colapso	
		Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo
Empaque 1	6011,8	7,079974	4,8	6,0	3,88	7,71	2.766	NO HAY	NO HAY
Empaque 2	6109,8	1,135606	100,0	1,1	2,39	2766,22	2.825	NO HAY	NO HAY
Empaque 3	6248,3	4,96158	4,9	4,0	3,90	2855,93	2.919	NO HAY	NO HAY
Empaque 4	6339,3	4,969063	100,0	4,0	183,24	2911,01	96.063	NO HAY	NO HAY

Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería de completamientos de sargas selectivas. Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017

Para el segundo escenario, se repite lo anterior, solamente fallan los factores axial y triaxial para el empaque tándem. Los otros factores no presentan inconvenientes. (Ver **Tabla 25**).

Tabla 25. Resultado Inyección Impar- Primer caso.

Caso 2		Impar							
Name	Packer MD (ft)	FD Axial		FD Triaxial		FD estallido		FD colapso	
		Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo
Empaque 1	6011,8	7,1	4,8	5,97	3,88	7,708381	2.635	NO HAY	NO HAY
Empaque 2	6109,8	1,1	4,6	1,07	3,39	2635,151	3	NO HAY	NO HAY
Empaque 3	6248,3	3,4	4,9	2,99	3,90	2,956255	2.766	NO HAY	NO HAY
Empaque 4	6339,3	5,0	8,5	3,96	3,57	2758,996	3	NO HAY	NO HAY

Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería de completamientos de sartas selectivas. Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017

Para el caso de la inyección par, la corrida arroja resultados favorables. Todos los factores están por encima de los factores de diseño estipulados al inicio del proceso. (Ver **Tabla 26**).

Tabla 26. Resultado Inyección Par – Primer caso.

Caso 3		Par							
Name	Packer MD (ft)	FD Axial		FD Triaxial		FD estallido		FD colapso	
		Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo
Empaque 1	6011,8	7,1	3,3	5,97	3,00	7,709449	3,039582	NO HAY	NO HAY
Empaque 2	6109,8	2,6	100,0	2,58	2,39	3,004563	2.825	NO HAY	NO HAY
Empaque 3	6248,3	5,0	3,3	3,96	2,96	2855,934	2,956421	NO HAY	NO HAY
Empaque 4	6339,3	3,35919	100	2,967151	183,2365	2,925619	96063,24	NO HAY	NO HAY

Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería de completamientos de sartas selectivas. Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017

La prueba de la tubería (Ver **Tabla 27**) no posee ningún problema dentro del empaque tándem. Esto se puede demostrar en los factores de seguridad expuestos.

Tabla 27. Resultado Prueba tubería – Primer caso.

Caso 4		Prueba Tubería							
Name	Packer MD (ft)	FD Axial		FD Triaxial		FD estallido		FD colapso	
		Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo
Empaque 1	6011,8	15,8	8,0	4,30	2,52	3,521978	2,075305	NO HAY	NO HAY
Empaque 2	6109,8	4,9	26,0	2,49	2,40	2,058163	2,058163	NO HAY	NO HAY
Empaque 3	6248,3	8,6	8,4	2,47	2,47	2,034411	2,034411	NO HAY	NO HAY
Empaque 4	6339,3	8,73689	5,856833	2,446197	2,462929	2,019103	2,019103	NO HAY	NO HAY

Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería de completamientos de sartas selectivas. Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017.

De mismo modo se puede notar que la prueba en el anular se desempeña con total normalidad, demostrado así que los casos de inyección desempeñan un mayor riesgo para este tipo de completamiento. Los factores de seguridad de este caso se pueden notar en la **Tabla 28**.

Tabla 28. Resultado Prueba anular – Primer caso.

Caso 5		Prueba Anular							
Name	Packer MD (ft)	FD Axial		FD Triaxial		FD estallido		FD colapso	
		Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo
Empaque 1	6011,8	100,0	16,0	7,52	6,16	NO HAY	5,052189	5,9039034	NO HAY
Empaque 2	6109,8	7,0	100,0	5,95	6,17	5,752384	5,752384	NO HAY	NO HAY
Empaque 3	6248,3	18,6	17,9	5,86	5,87	4,816517	4,816517	NO HAY	NO HAY
Empaque 4	6339,3	19,36189	100	5,753488	184,246	4,731586	NO HAY	NO HAY	27,0597

Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería de completamientos de sartas selectivas. Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017

Según lo anterior, se puede afirmar que en los escenarios donde se inyecta directamente encima del empaque tándem, esta falla en los factores de seguridad axial y triaxial, dado a que la salida del fluido desajusta a la herramienta, como sucede en los casos de inyección total e impar.

Los otros factores no mostraron resultados fuera de lo normal, no presentaron falla.

En los otros 3 escenarios, como se dijo anteriormente, los resultados no muestran información considerada desfavorable. Esto soporta una idea de que la presión ejercida por encima de los empaques tipo tándem a profundidades altas genera

fallas. A pesar de ello se toma en cuenta un segundo caso con un completamiento diferente para poder tener en cuenta esta premisa.

7.4.2 Segundo Caso. Obedece a la sarta de completamiento del Pozo B del campo Alpha de Ecopetrol S.A., utilizada para inyección de agua.

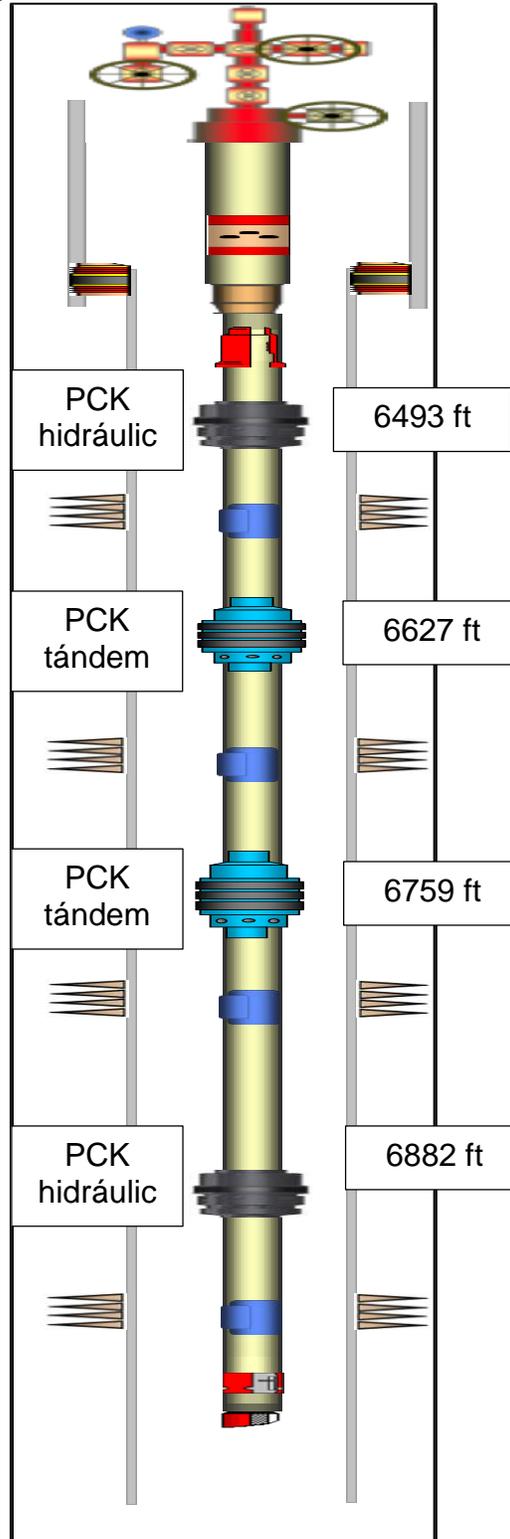
El nombre real del pozo y del campo fueron cambiados por razones de confidencialidad.

Esta sarta tiene una longitud de 7068 ft, contados desde la mesa rotaria y está comprendida por los siguientes elementos:

- Camisa de cierre de $2\frac{7}{8}$ a una profundidad de 6445 ft.
- Cross over a ubicado a 6479 ft, el cual cambia el diámetro de $2\frac{7}{8}$ a $2\frac{3}{8}$.
- On-Off tool a la profundidad de 6488 ft y diámetro de $2\frac{3}{8}$.
- Empaque hidráulico de cuñas ubicado a 6493 ft.
- Mandril de inyección de $2\frac{3}{8}$ a 6530 ft.
- Empaque tándem de $2\frac{3}{8}$ a 6627 ft.
- Mandril de inyección de $2\frac{3}{8}$, localizado a 6692 ft.
- Empaque tándem de $2\frac{3}{8}$ a 6759 ft.
- Mandril de inyección de $2\frac{3}{8}$, localizado a 6814 ft.
- Empaque hidráulico de cuñas ubicado a 6882 ft.
- Mandril de inyección de $2\frac{3}{8}$, localizado a 6917 ft.
- Nipple de asentamiento de $2\frac{3}{8}$, ubicado a 7016 ft.
- Zapato de perforación de $2\frac{3}{8}$ a 7021 ft de profundidad.

La **Figura 62**, ilustra el estado mecánico del pozo en cuestión.

Figura 62. Estado mecánico Pozo B



Fuente: Completion services. 2019.

Para esta simulación al igual que en la anterior, se tienen 5 escenarios, estos son: Inyección total, inyección par, inyección impar, prueba de tubería y prueba de anular.

El **Cuadro 10**, a continuación, ilustra los datos de entrada que se le colocan en el programa Wellcat™ para realizar las corridas.

Cuadro 10. Datos de entrada del segundo caso.

Datos		Valor
Casing		7"- 26 # P-110
Tubing		2 7/8" – 6.5 # N-80
Temperatura superficie		90 °F
Gradiente de temperatura		1.5 °F/100 ft
Densidad del fluido de inyección		8.33 ppg
Presión inyección		2000 psi
Caudal de inyección		3000 Bwp
Empaque PCS-5	Presión interna	11200 Psi
	Tensión	67000 Psi
	Compresión	67000 Psi
"Sliding Sleeve XO profile (camisa)"	Presión interna	6000 Psi
	Tensión	122000 Psi
	Compresión	122000 Psi
Mandril MGDWI VRF (Texproil)	Presión interna	6000 Psi
	Tensión	114000 Psi
	Compresión	114000 Psi
CONECTOR ON-OFF (Texproil)	Presión interna	8636 Psi
	Tensión	207000 Psi
	Compresión	207000 Psi
Datos		Valor
Casing		7"- 26 # P-110
Tubing		2 7/8" – 6.5 # N-80
Temperatura superficie		90 °F
Gradiente de temperatura		1.5 °F/100 ft
Densidad del fluido de inyección		8.33 ppg
Presión inyección		2000 psi
Caudal de inyección		300 Bwp
Empaque PCS-5	Presión interna	6000 Psi
	Tensión	60000 Psi
	Compresión	60000 Psi

Fuente: Elaboración propia. 2019

A continuación, en la **Figura 62** se presenta la información de entrada necesaria para realizar las correcciones con el modelo PTA.

Figura 63. Datos de entrada segundo caso.

PACKER TANDEM ANALYSIS - PTA							
DATOS DE ENTRADA							
TUBERIA			REVESTIMIENTO			FACTORES DE DISEÑO	
Diametro externo de la tubería	2,875	in	Diametro externo del revestimiento	7	in	Tension	1,34
Diametro interno de la tubería	2,441	in	Diametro interno del revestimiento	6,276	in	Compresion	1,2
Yield Point	80000	psi	Diametro del sello del empaque	2,875	in	Triaxial SF	1,25
Rating axial de la tubería	144962	psi	Grado de Tubería	P-110		Estallido SF	1,25
Rating axial del empaque	119200	psi				Colapso SF	1
Número de empaques	4						
Numero de Casos	5						
Grado de Tubería	L-N-80						

Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería de completamientos de sartas selectivas. Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017

Para el caso de la inyección total, los factores axial y triaxial fallan para ambos empaques tándem, esto se debe a la exposición de estos a los fluidos provenientes de la inyección. Los otros factores no presentan falla. (Ver **Tabla 29**).

Tabla 29. Resultado Inyección total – Segundo caso.

Caso 1	Total								
Name	Packer MD (ft)	FD Axial		FD Triaxial		FD estallido		FD colapso	
		Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo
Empaque 1	6494	6,655455	4,5	5,6	3,61	7,25	NO HAY	NO HAY	15,048919
Empaque 2	6628	1,055702	100,0	1,0	2,20	117410,63	117.411	NO HAY	NO HAY
Empaque 3	6762	1,047067	100,0	1,0	2,15	132086,96	NO HAY	NO HAY	16,870334
Empaque 4	6885,7	4,662822	100,0	3,7	185,34	117410,63	NO HAY	NO HAY	16,675213

Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería de completamientos de sartas selectivas. Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017

Para el esquema de inyección par, fallan por encima tanto el factor axial como el triaxial para el empaque número 3 (tándem). Los otros factores no fallan. (Ver **Tabla 30**).

Tabla 30. Resultado Inyección Par- Segundo caso.

Caso 2		Par							
Name	Packer MD (ft)	FD Axial		FD Triaxial		FD estallido		FD colapso	
		Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo
Empaque 1	6494	6,7	3,1	5,60	2,78	7,24970775	3	NO HAY	NO HAY
Empaque 2	6628	2,5	100,0	2,42	2,20	2,76002699	117.411	NO HAY	NO HAY
Empaque 3	6762	1,0	4,2	0,99	3,08	132086,957	3	NO HAY	NO HAY
Empaque 4	6885,7	3,1	100,0	2,75	185,34	2,68508308	NO HAY	NO HAY	16,675213

Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería de completamientos de sargas selectivas. Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017

Para el caso de la inyección impar, únicamente falla el segundo empaque (tándem), al igual que en los otros casos en los factores axial y triaxial. Los otros factores tienden a no fallar como se vio en casos anteriores. (Ver **Tabla 31**).

Tabla 31. Resultado Inyección Impar – Segundo caso.

Caso 3		Impar							
Name	Packer MD (ft)	FD Axial		FD Triaxial		FD estallido		FD colapso	
		Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo
Empaque 1	6494	6,7	4,5	5,60	3,61	7,24970775	NO HAY	NO HAY	15,048919
Empaque 2	6628	1,1	4,1	1,00	3,11	117410,628	3	NO HAY	NO HAY
Empaque 3	6762	2,5	100,0	2,41	2,15	2,72054656	NO HAY	NO HAY	16,870334
Empaque 4	6885,7	4,662822	7,772787	3,705059	3,274857	117410,628	2,6850831	NO HAY	NO HAY

Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería de completamientos de sargas selectivas. Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017

La prueba de la tubería (Ver **Tabla 32**) en el segundo caso (como en el primer caso real). No presento ningún problema. Esto se puede notar en los factores de seguridad que se encuentran a continuación.

Tabla 32. Resultado Prueba tubería – Segundo caso

Caso 4		Prueba Tuberia							
Name	Packer MD (ft)	FD Axial		FD Triaxial		FD estallido		FD colapso	
		Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo
Empaque 1	6494	6,7	3,1	5,60	2,78	7,24970775	2,8006776	NO HAY	NO HAY
Empaque 2	6628	2,5	4,1	2,42	3,11	2,76002699	2,760027	NO HAY	NO HAY
Empaque 3	6762	2,5	4,2	2,41	3,08	2,72054656	2,7205466	NO HAY	NO HAY
Empaque 4	6885,7	3,129722	100	2,745441	3,045589	2,68508308	2,6850831	NO HAY	NO HAY

Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería de completamientos de sargas selectivas. Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017

Finalmente se puede notar los factores de seguridad de la presión del anular en la **Tabla 33**. Como se puede apreciar, no se tiene en cuenta ningún tipo de problema considerable dentro de los empaques.

Tabla 33. Resultado Prueba anular – Segundo caso.

Caso 5		Prueba Anular							
Name	Packer MD (ft)	FD Axial		FD Triaxial		FD estallido		FD colapso	
		Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo	Encima	Debajo
Empaque 1	6494	12,7	3,4	4,35	3,44	NO HAY	4,5741826	5,079912	NO HAY
Empaque 2	6628	2,7	4,7	2,81	4,30	4,4621899	4,4621899	NO HAY	NO HAY
Empaque 3	6762	2,7	4,7	2,80	4,26	4,35553214	4,3555321	NO HAY	NO HAY
Empaque 4	6885,7	3,432933	100	3,444232	108,4958	4,26150535	NO HAY	NO HAY	21,948782

Fuente: CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Análisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería de completamientos de sargas selectivas. Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017

Como lo muestran los resultados expuestos anteriormente, es posible afirmar que en los escenarios donde se inyecta directamente encima del empaque tándem, esta falla en los factores de seguridad axial y triaxial, dado a que la salida del fluido desajusta el empaque, como se puede apreciar en los tres esquemas de inyección.

Los factores de estallido y colapso no presentaron falla en ninguno de los escenarios evaluados para el Pozo B.

Como se ilustra anteriormente, el modelo PTA logra demostrar de manera eficiente los problemas que se encuentran en los pozos teniendo en cuenta las demás herramientas como lo son camisas o mandriles. Los dos casos expuestos presentaron complicaciones, es por ello que actualmente estos dos pozos se encuentran bajo revisión debido a sus problemas en el completamiento con estos tipos de empaques.

A pesar de ello, y demostrando la efectividad del modelo PTA según las condiciones que se le exponga; es necesario hacer unos criterios óptimos que logren simplificar el uso de este modelo para cada caso y así cualificar las condiciones en donde termina siendo optimo usar un completamiento con este tipo de herramienta.

8. CONCLUSIONES

- Los empaques tipo tándem para una sarta selectiva presentan varios inconvenientes para una inyección con agua. La falta de cuñas hace que la inyección del fluido desajuste la herramienta. Se concluye que para la implementación de este tipo de empaques es necesario tener una intercalación agrupada con empaques con cuñas para disminuir la posibilidad de fallas.
- Se concluye que las operaciones que utilizan varios empaques tipo tándem sean exclusivamente para escenarios de trabajo a bajas profundidades (máximo 5000 ft), de ser excedido este límite, estos empaques tenderán casi automáticamente a la falla.
- Gracias a las variaciones en los esquemas de inyección, se puede concluir que los empaques tándem fallan por lo general debido a las sobrepresiones que se cargan por encima de la herramienta producto de la inyección, es decir, el fluido de inyección desajusta el empaque directamente debajo de él.
- Para el factor de seguridad axial y triaxial, los escenarios más fortuitos son aquellos donde se trabaja a bajas profundidades (5000ft) con un esquema de inyección par a 1500 Psi. El grado, el diámetro y el espaciamiento no son influyentes sobre estos factores.
- Para el factor de seguridad de estallido, todos los escenarios funcionan, debido a que las cargas al exterior de la tubería tienden a superar a la presión interna, imposibilitando la falla del completamiento por el estallido de la tubería.
- Para el factor de seguridad de colapso, es imperativo tener en cuenta el espaciamiento y la profundidad. Desde que el espaciamiento no sea de 300ft y la profundidad no supere los 8000ft, se pueden alterar las demás variables sin afectar este factor.
- Dentro de las simulaciones hechas con el programa Wellcat™ se pudo concluir que el grado J55 no es recomendable para operaciones de inyección a altas profundidades (10000 ft en adelante), dado a que el completamiento falla en todos los escenarios.
- El tubing de diámetro de $2\frac{3}{8}$, es más eficiente que el de $2\frac{7}{8}$ para trabajar en altas profundidades. A pesar de esto, se pueden usar ambos tipos de tuberías si se encuentran en el rango de los 5000 ft.
- Aumentar la profundidad equivale a disminuir la cantidad de empaques que se emplearían para hacer el completamiento. Es pertinente realizar estudios

adicionales si lo que se planea es operar con mas de 2 empaques tándem a profundidades mayores a 5000 ft.

- Según la experiencia, se determinó que la inyección par es la más efectiva, funcionando en el 67% de los casos analizados, siendo en ocasiones el único tipo que funcionaba, sin embargo, cabe recordar que el aspecto más importante de una sarta selectiva es su versatilidad y vencería su propósito si solo resulta seguro utilizar un esquema.
- Se pudo determinar, que el mejor se presenta al utilizar la sarta a una profundidad de 5000ft, con espaciamiento de 400 o 500ft, haciendo uso de del grado J55 de tubería, con un diámetro de $2 \frac{3}{8}$, bajo un esquema de inyección par a una presión de 1500 Psi, con tres empaques (1 tándem).

9. RECOMENDACIONES

- Es prudente, hacer estudios con profundidades más someras con el modelo PTA, de manera que se puedan establecer criterios de evaluación más certeros, dado a que a menores profundidades aumenta la posibilidad del éxito de las sartas que utilizan los empaques tándem.
- Para el caso de los empaques, se requiere realizar nuevas corridas utilizando espaciamentos entre empaques de menor distancia, para poder observar y analizar el impacto en el completamiento. Del mismo modo, el aumento entre empaques puede generar nuevos patrones de fallas que no fueron analizados en este trabajo de grado.
- Para un mejor análisis del diseño de sartas selectivas, se deben hacer corridas con el modelo PTA en donde las intercalaciones de empaques con cuñas y empaques tipo tándem sean más notorias, de manera que se pueda sacar mejores resultados a distintas profundidades.
- Al no tomar datos específicos de presiones de yacimiento, los datos presentes pueden poseer cierta variación, para una mejor toma de datos se recomienda tener las presiones de yacimiento reales, de manera que se logren implementar desde el programa Wellcat™.
- Para obtener una idea más acertada del funcionamiento de las sartas selectivas con este tipo de empaques, es necesario realizar corridas utilizando grados de tubería diversos, ya que la resistencia de esta es clave para determinar los factores de diseño mas óptimos para el empaque o los empaques.
- Para analizar con mayor certeza la viabilidad del uso de estas herramientas en altas profundidades, se deben replantear las demás variables, especialmente el grado de la tubería, el espaciamiento y la presión de inyección.

BIBLIOGRAFÍA

- ALFONSO, Carlos. Optimización de la inyección de agua en los pozos con sarta selectiva, mediante la simulación de flujo en el Campo Casabe. Trabajo de Grado. Ingeniero de Petróleos. Universidad De América. Colombia. 2009.
- BAQUERO, Luis y VARGAS, Juan. Evaluación técnico financiera de la inyección de agua en un campo de la cuenca del Catatumbo colombiano mediante simulación analítica. Universidad de América. Facultad de ingenierías. 2018.
- BELLARBY J. Well completion Design. Aberdeen, UK: Elsevier. 2009.
- CALDERON, Angie y CASTRO, Javier. Analisis del impacto de empaques tándem como empaques intermedios sobre los esfuerzos de tubería completamientos de sargas selectivas. Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017.
- DELGADO, Juan. Especificaciones técnicas, manual – guía de empaque de operaciones de completamiento y reacondicionamiento de pozos. Universidad Industrial de Santander. Colombia. 2005.
- Efectos producidos sobre los packer por presión y temperatura. Petroblogger. [en línea], 14 de febrero de 2019. Disponible en Internet: <http://www.ingenieriadepetroleo.com/efectos-producidos-sobre-los-packer-por-presion-y-temperatura/>
- HERNANDEZ, Claudia Marcela. Componentes de completamiento. [Diapositivas]. Neiva, Huila, Colombia. 2017.
- _____. Upper Completion o CPL Superior. [diapositivas]. Neiva, Huila, Colombia. 2017.
- HERNANDEZ, Claudia. PEREZ, Robinson y RINCÓN, Cristian. Clasificación de empaques para diseño de completamiento. Bogotá, Colombia. 2018.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C.: El instituto, 2018. 153 p.
- LÓPEZ, Christian y MOSQUERA, Henry. Selección, diseño y análisis de esfuerzos para completamiento de inyección de agua selectiva. Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2017.

LUCUARA, Erika y TAHA, Layla. Desarrollo de un pozo operacional para el diseño de sartas selectivas en pozos inyectoros del campo la Cira Infantas, Fundación Universidad de América, Facultad de Ingenierías. 2018.

MORENO, Andrés. Metodología para la evaluación técnica en proyectos de inyección con sartas selectivas, aplicado a la fase piloto en campo Tibú (Ecopetrol), Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías. 2011.

PARIS DE FERRER, Magdalena. Inyección de agua y gas en Yacimientos Petrolíferos. 2da Edición. Maracaibo, Venezuela. 2001.

SCHLUMBERGER. Packers and completions equipment catalog. Houston, Texas. 2014.

TEXPROIL, Catálogo de productos y servicios de completamiento. Edición 2012. [en línea]. Recuperado el 20 de Marzo de 2019.

<http://texproil.com.ar/pdf/Service%20Tools/151%20Conector%20NF-1.pdf>

<http://texproil.com.ar/pdf/Service%20Tools/152%20Conector%20NF-3.pdf>

TRUJILLO, Jaime y VALBUENA, María. Evaluación de la envolvente operacional de los empaques de completamiento; interpretación, implementación e impacto sobre el diseño de completamiento de un pozo, Universidad Surcolombiana, Facultad de ingenierías. 2018.

ANEXOS

ANEXO A. ESTADO MECÁNICO POZO A

CANT.	DESCRIPCIÓN	ROSCA UP	ROSCA BOT	OD (in)	ID (in)	LONG (ft)	PROF (ft) (Tope)	PROF (ft) (Bottom)
1	MESA ROTARIA					23,00	0,00	23,00
1	HANGER 2 7/8" EUE	2 7/8"	2 7/8"		2,44	0,87	23,00	23,87
1	LANDING JOINT 2 7/8" N-80 6,5 lb/ft EUE (196)	2 7/8"	2 7/8"	3,66	2,44	28,76	23,87	52,63
0	PUP JOINT 2 7/8" N-80 6,5 lb/ft EUE	2 7/8"	2 7/8"	3,66	2,44	0,00	52,63	52,63
191	TUBING JOINT 2 7/8" N-80 6,5 lb/ft EUE	2 7/8"	2 7/8"	3,66	2,44	5908,55	52,63	5961,18
1	SLIDING SLEEVE 2 7/8" EUE con perfil 2,31 GXA (Open Up, Shifting Tool B) S/N:	2 7/8"	2 7/8"	3,49	2,31	2,86	5961,18	5964,04
1	TUBING JOINT 2 7/8" N-80 6,5 lb/ft EUE N° 14 (195)	2 7/8"	2 7/8"	3,66	2,44	30,96	5964,04	5995,00
1	X-OVER Box 2 7/8" EUE x Pin 2 3/8" EUE S/N: 1811-10-15-04 V&G	2 7/8"	2 3/8"	3,66	1,991	0,43	5995,00	5995,43
1	PUP JOINT 2 3/8" N-80 4,7 lb/ft EUE (5,82 ft)	2 3/8"	2 3/8"	3,06	1,991	5,82	5995,43	6001,25
1	ON-OFF TOOL 5" x 2 3/8" EUE S/N: 18-205	2 3/8"	2 3/8"	3,93	1,87	1,72	6001,25	6002,97
1	PUP JOINT 2 3/8" N-80 4,7 lb/ft EUE (5,82 ft)	2 3/8"	2 3/8"	3,06	1,991	5,82	6002,97	6008,79
1	PKR HIDRAULICO GD-1 5" x 2 3/8" 18 # EUE (Rotation release) CENTRO GOMA N° 4	2 3/8"	2 3/8"	4,12	1,94	1,90	6008,79	6010,69
	2,86					6010,69	6013,55	
1	GOMAS ABAJO S/N: 18060018							
1	TUBING JOINT 2 3/8" N-80 4,7 lb/ft EUE N° 13	2 3/8"	2 3/8"	3,06	1,991	28,81	6013,55	6042,36
1	MANDRIL DE INYECCIÓN 5" x 2 3/8" EUE CON DUMMIE 1" - N° 4 S/N: 18-132	2 3/8"	2 3/8"	4,15	1,991	7,02	6042,36	6049,38
1	TUBING JOINT 2 3/8" N-80 4,7 lb/ft EUE N° 12	2 3/8"	2 3/8"	3,06	1,991	28,73	6049,38	6078,11
1	TUBING JOINT 2 3/8" N-80 4,7 lb/ft EUE N° 11	2 3/8"	2 3/8"	3,06	1,991	28,68	6078,11	6106,79
1	PKR TANDEM 5" x 2 3/8" 18 # EUE CENTRO GOMA N° 3	2 3/8"	2 3/8"	4,12	1,94	1,73	6106,79	6108,52
	2,05					6108,52	6110,57	
1	GOMAS ABAJO S/N: 1425371							
1	PUP JOINT 2 3/8" N-80 4,7 lb/ft EUE (5,76 ft)	2 3/8"	2 3/8"	3,06	1,991	5,76	6110,57	6116,33
1	TUBING JOINT 2 3/8" N-80 4,7 lb/ft EUE N° 10	2 3/8"	2 3/8"	3,06	1,991	28,42	6116,33	6144,75
1	TUBING JOINT 2 3/8" N-80 4,7 lb/ft EUE N° 6	2 3/8"	2 3/8"	3,06	1,991	28,80	6144,75	6173,55
1	MANDRIL DE INYECCIÓN 5" x 2 3/8" EUE CON DUMMIE 1" - N° 3 S/N: 18-133	2 3/8"	2 3/8"	4,15	1,991	7,02	6173,55	6180,57
1	TUBING JOINT 2 3/8" N-80 4,7 lb/ft EUE N° 8	2 3/8"	2 3/8"	3,06	1,991	28,24	6180,57	6208,81
1	TUBING JOINT 2 3/8" N-80 4,7 lb/ft EUE N° 7	2 3/8"	2 3/8"	3,06	1,991	28,70	6208,81	6237,51
1	PUP JOINT 2 3/8" N-80 4,7 lb/ft EUE (7, 83ft)	2 3/8"	2 3/8"	3,06	1,991	7,83	6237,51	6245,34
1	PKR HIDRAULICO GD-1 5" x 2 3/8" 18 # EUE (Rotation release) CENTRO GOMA N° 3	2 3/8"	2 3/8"	4,12	1,94	1,90	6245,34	6247,24
	2,86					6247,24	6250,10	
1	GOMAS ABAJO S/N: 18060020							

15	1	TUBING JOINT 2 3/8" N-80 4,7 lb/ft EUE N° 9	2 3/8"	2 3/8"	3,06	1,991	31,49	6250,10	6281,59
14	1	MANDRIL DE INYECCIÓN 5" x 2 3/8" EUE CON DUMMIE 1" - N° 2 S/N: 18-134	2 3/8"	2 3/8"	4,15	1,991	7,02	6281,59	6288,61
13	1	PUP JOINT 2 3/8" N-80 4,7 lb/ft EUE (9,82 ft)	2 3/8"	2 3/8"	3,06	1,991	9,41	6288,61	6298,02
12	1	PUP JOINT 2 3/8" N-80 4,7 lb/ft EUE (9,85 ft)	2 3/8"	2 3/8"	3,06	1,991	9,85	6298,02	6307,87
11	1	TUBING JOINT 2 3/8" N-80 4,7 lb/ft EUE N° 5	2 3/8"	2 3/8"	3,06	1,991	28,43	6307,87	6336,30
10	1	PKR HIDRAULICO GD-1 5" x 2 3/8" 18 # EUE (Rotation release)	2 3/8"	2 3/8"	4,12	1,94	1,90	6336,30	6338,20
		CENTRO GOMA N° 1					2,86	6338,20	6341,06
		GOMAS ABAJO S/N: 18060015							
9	1	TUBING JOINT 2 3/8" N-80 4,7 lb/ft EUE N° 4	2 3/8"	2 3/8"	3,06	1,991	28,46	6341,06	6369,52
8	1	MANDRIL DE INYECCIÓN 5" x 2 3/8" EUE CON DUMMIE 1" - N° 1 S/N: 18-315	2 3/8"	2 3/8"	4,15	1,991	7,03	6369,52	6376,55
7	1	PUP JOINT 2 3/8" N-80 4,7 lb/ft EUE (9,75ft)	2 3/8"	2 3/8"	3,06	1,991	9,34	6376,55	6385,89
6	1	TUBING JOINT 2 3/8" N-80 4,7 lb/ft EUE N° 3	2 3/8"	2 3/8"	3,06	1,991	29,61	6385,89	6415,50
5	1	TUBING JOINT 2 3/8" N-80 4,7 lb/ft EUE N° 2	2 3/8"	2 3/8"	3,06	1,991	28,53	6415,50	6444,03
4	1	TUBING JOINT 2 3/8" N-80 4,7 lb/ft EUE N° 1	2 3/8"	2 3/8"	3,06	1,991	28,26	6444,03	6472,29
3	1	LANDING NIPPLE 2 3/8" PERFIL R 1.81" S/N: 18-117	2 3/8"	2 3/8"	3,25	1,76	0,86	6472,29	6473,15
2	1	PUP JOINT 2 3/8" N-80 4,7 lb/ft EUE (3,04 ft)	2 3/8"	2 3/8"	3,06	1,991	3,04	6473,15	6476,19
1	1	HALF MULE SHOE WLEG 2 3/8" S/N: 1811-01-10-03 V&G	2 3/8"	2 3/8"	3,48	2,05	0,50	6476,19	6476,69

**ANEXO B.
ESTADO MECÁNICO POZO B**

ITM	CAN T.	DESCRIPCIÓN	ROSCA UP	ROSCA BOT	OD (in)	ID (in)	LONG (ft)	PROF (ft) (Tope)	PROF (ft) (Bottom)
39	1	MESA ROTARIA					24,00	0,00	24,00
38	1	HANGER 2 7/8" EUE	2 7/8"	2 7/8"	-	2,440	0,87	24,00	24,87
37	1	LANDING JOINT 2 7/8" N-80 6.5 lb/ft EUE	2 7/8"	2 7/8"	3,660	2,440	30,50	24,87	55,37
36	1	PUP JOINT 2 7/8" N-80 6.5 lb/ft EUE (ft)	2 7/8"	2 7/8"	3,660	2,440	0,00	55,37	55,37
35	206	TUBING JOINT 2 7/8" N-80 6.5 lb/ft EUE	2 7/8"	2 7/8"	3,660	2,440	6390,00	55,37	6445,37
34	1	SLIDING SLEEVE 2 7/8" EUE PERFIL 2,31" GXO (Open Down, Shifting tool B)	2 7/8"	2 7/8"	3,490	2,310	3,96	6445,37	6449,33
33	1	TUBING JOINT 2 7/8" N-80 6.5 lb/ft EUE N° 16	2 7/8"	2 7/8"	3,660	2,440	30,50	6449,33	6479,83
32	1	CROSS OVER 2 3/8" EUE PIN X 2 7/8" EUE BOX	2 7/8"	2 3/8"	3,660	1,991	0,43	6479,83	6480,26
31	1	PUP JOINT 2 3/8" N-80 4,7 lb/ft EUE (6 ft)	2 3/8"	2 3/8"	3,060	1,991	6,00	6480,26	6486,26
30	1	CONECTOR ON-OFF 5" x 2 3/8" EUE SN:	2 3/8"	2 3/8"	3,93	1,870	1,67	6486,26	6487,93
29	1	PUP JOINT 2 3/8" N-80 4,7 lb/ft EUE (4 ft)	2 3/8"	2 3/8"	3,060	1,991	4,00	6487,93	6491,93
28	1	PKR HIDRAULICO GD-1 5" x 2 3/8" 18 # EUE (Rotation Release) TEXLA - CENTRO GOMAS N° 4	2 3/8"	2 3/8"	4,12	1,94	1,89	6491,93	6493,82
		GOMAS ABAJO SN:					2,86	6493,82	6496,68
27	1	TUBING JOINT 2 3/8" N-80 4,7 lb/ft EUE N° 15	2 3/8"	2 3/8"	3,060	1,991	30,50	6496,68	6527,18
26	1	MANDRIL DE INYECCION 5" x 2 3/8" EUE C/ DUMMY 1" N° 4 SN:	2 3/8"	2 3/8"	4,19	1,99	7,00	6527,18	6534,18
25	1	TUBING JOINT 2 3/8" N-80 4,7 lb/ft EUE N° 14	2 3/8"	2 3/8"	3,060	1,991	30,50	6534,18	6564,68
24	1	TUBING JOINT 2 3/8" N-80 4,7 lb/ft EUE N° 13	2 3/8"	2 3/8"	3,060	1,991	30,50	6564,68	6595,18
23	1	TUBING JOINT 2 3/8" N-80 4,7 lb/ft EUE N° 12	2 3/8"	2 3/8"	3,060	1,991	30,50	6595,18	6625,68
22	1	PKR HIDRAULICO TANDEM 5" x 2 3/8" 18 # EUE TEXLA - CENTRO GOMAS N° 3	2 3/8"	2 3/8"	4,12	1,94	1,89	6625,68	6627,57
		GOMAS ABAJO SN:					2,86	6627,57	6630,43
21	1	TUBING JOINT 2 3/8" N-80 4,7 lb/ft EUE N° 11	2 3/8"	2 3/8"	3,060	1,991	30,50	6630,43	6660,93
20	1	TUBING JOINT 2 3/8" N-80 4,7 lb/ft EUE N° 10	2 3/8"	2 3/8"	3,060	1,991	30,50	6660,93	6691,43
19	1	MANDRIL DE INYECCION 5" x 2 3/8" EUE C/ DUMMY 1" N° 3 SN:	2 3/8"	2 3/8"	4,19	1,99	7,00	6691,43	6698,43
18	1	TUBING JOINT 2 3/8" N-80 4,7 lb/ft EUE N° 9	2 3/8"	2 3/8"	3,060	1,991	30,50	6698,43	6728,93
17	1	TUBING JOINT 2 3/8" N-80 4,7 lb/ft EUE N° 8	2 3/8"	2 3/8"	3,060	1,991	30,50	6728,93	6759,43
16	1	PKR HIDRAULICO TANDEM 5" x 2 3/8" 18 # EUE TEXLA - CENTRO GOMAS N° 2	2 3/8"	2 3/8"	4,12	1,94	1,89	6759,43	6761,32
		GOMAS ABAJO SN:					2,86	6761,32	6764,18

15	1	TUBING JOINT 2 3/8" N-80 4,7 lb/ft EUE N° 7	2 3/8"	2 3/8"	3,060	1,991	30,50	6764,18	6794,68
14	1	PUP JOINT 2 3/8" N-80 4,7 lb/ft EUE (10 ft)	2 3/8"	2 3/8"	3,060	1,991	10,00	6794,68	6804,68
13	1	PUP JOINT 2 3/8" N-80 4,7 lb/ft EUE (10 ft)	2 3/8"	2 3/8"	3,060	1,991	10,00	6804,68	6814,68
12	1	MANDRIL DE INYECCION 5" x 2 3/8" EUE C/ DUMMY 1" N° 2 SN:	2 3/8"	2 3/8"	4,19	1,99	7,00	6814,68	6821,68
11	1	TUBING JOINT 2 3/8" N-80 4,7 lb/ft EUE N° 6	2 3/8"	2 3/8"	3,060	1,991	30,50	6821,68	6852,18
10	1	TUBING JOINT 2 3/8" N-80 4,7 lb/ft EUE N° 5	2 3/8"	2 3/8"	3,060	1,991	30,50	6852,18	6882,68
9	1	PKR HIDRAULICO GD-1 5" x 2 3/8" 18 # EUE (Rotation Release) TEXLA - CENTRO GOMAS N° 1	2 3/8"	2 3/8"	4,12	1,94	1,89	6882,68	6884,57
		GOMAS ABAJO SN:					2,86	6884,57	6887,43
8	1	TUBING JOINT 2 3/8" N-80 4,7 lb/ft EUE N° 4	2 3/8"	2 3/8"	3,060	1,991	30,50	6887,43	6917,93
7	1	MANDRIL DE INYECCION 5" x 2 3/8" EUE C/ DUMMY 1" N° 1 SN:	2 3/8"	2 3/8"	4,19	1,99	7,00	6917,93	6924,93
6	1	TUBING JOINT 2 3/8" N-80 4,7 lb/ft EUE N° 3	2 3/8"	2 3/8"	3,060	1,991	30,50	6924,93	6955,43
5	1	TUBING JOINT 2 3/8" N-80 4,7 lb/ft EUE N° 2	2 3/8"	2 3/8"	3,060	1,991	30,50	6955,43	6985,93
4	1	TUBING JOINT 2 3/8" N-80 4,7 lb/ft EUE N° 1	2 3/8"	2 3/8"	3,060	1,991	30,50	6985,93	7016,43
3	1	LANDING NIPPLE 2 3/8" PERFIL R 1,81 SN:	2 3/8"	2 3/8"	1,760	1,070	0,85	7016,43	7017,28
2	1	PUP JOINT 2 3/8" N-80 4,7 lb/ft EUE (4 ft)	2 3/8"	2 3/8"	3,060	1,991	4,00	7017,28	7021,28
1	1	HALF MULE SHOE WLEG 2 3/8"	2 3/8"	N/A	3,48	2,05	0,50	7021,28	7021,78