

**DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA DIGITAL QUE PERMITA EL CÁLCULO MAWOP
SEGÚN LA NORMA ANNULAR CASING PRESSURE MANAGEMENT FOR
ONSHORE WELLS API RP 90-2 DEL 2016**

**PAULA ANGELICA AVILA SANCHEZ
NATHALIA RONCANCIO PARRA**

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

Director

**Ivan Guillermo Benavides Olaya
Ingeniero de Petróleos**

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

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

Nombre
Firma del Director

Nombre
Firma del Presidente Jurado

Adriangela Chiquinquirá Romero Sánchez
Firma del Jurado

Édison Enrique Jiménez Bracho

Bogotá D.C. Enero de 2021

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García Peña

Vicerrectora Académica y de Investigación

Dra. María Claudia Aponte González

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretaria General

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Decano Facultad de Ingeniería

Ing. Julio César Fuentes Arismendi

Director Programa de Ingeniería de Petróleos

Ing. Juan Carlos Rodríguez Esparza

DEDICATORIA

Dedico este proyecto primeramente a Dios por permitirme tener vida, salud y poder realizar uno de mis grandes sueños ser ingeniera de petróleos.

A mis padres Pedro y Flor, por brindarme su apoyo, amor, comprensión y educación durante esta carrera.

A mis hermanos Dario y Camilo por su ejemplo a seguir; sobre todo a mi hermana Adriana porque es la razón de sentirme orgullosa de culminar mi meta, confió en mí, y durante una larga etapa de mi vida se convirtió en otra mamá y confidente.

A mi mejor amiga Daniela por ser mi confidente, consejera y apoyo durante toda la carrera y durante mi infancia.

A mi novio Juan Diego por su apoyo, ha estado conmigo incluso en los momentos más turbulentos, no fue sencillo culminar con éxito esta etapa, pero siempre estuvo motivándome y ayudándome hasta donde sus alcances lo permitían, siempre me recalco que podía lograrlo perfectamente.

A mis amigos, en especial a Juan Ortiz por ser mi compañero de estudio, peleas, recocha y convertirse en mi mejor amigo durante toda la carrera, sin el este logro no hubiera sido completo. Además, el apoyo de mi grupo de estudio y ocio Ana María, Jessica, Mateo, Sandra y Daniela.

Nathalia Roncancio

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a todas las docentes que hicieron parte de nuestro desarrollo y formación como ingenieras de petróleo tanto académicamente, como en lo personal. A todos aquellos compañero y amigos que estuvieron en toda nuestra etapa de formación.

A nuestro director Ivan Benavides por su paciencia, sabiduría, comprensión, dedicación y amabilidad para guiarnos durante el desarrollo del proyecto y la enseñanza de crecer constantemente en el ámbito profesional y académico.

A la Universidad de América por permitirnos ser parte de ella y abierto las puertas de lograr un gran sueño.

A la empresa ECOPETROL S.A., por haber aceptado nuestro proyecto y depositar confianza en nosotros para el desarrollo del mismo, así como el soporte de información.

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

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	12
INTRODUCCIÓN	13
1. MARCO TEÓRICO	17
1.1. MAWOP	17
1.2. Generalidades del pozo	17
1.2.1. <i>Anulares</i>	18
1.2.2. <i>Barreras.</i>	19
1.3. Generalidades de la norma API RP 90-2 del 2016	20
1.4. Fuentes de presión en anular	21
1.4.1. <i>Presión inducida termalmente</i>	21
1.4.2. <i>Presión impuesta por el operador</i>	21
1.4.3. <i>Presión sostenida en el anular (SCP)</i>	21
1.5. Métodos de cálculo de las presiones optimas de operación de los anulares	22
1.5.1. <i>Default Designación Method</i>	22
1.5.2. <i>Simple De-rating Method</i>	22
1.5.3. <i>Explicit De-rating Method</i>	23
1.6. Presión de tuberías	24
1.6.1. <i>Presión de estallido</i>	24
1.6.2. <i>Presión de colapso</i>	25
2. METODOLOGÍA	27
2.1. Identificación de variables y ecuaciones para cada método (DDM, SDM, EDM)	28
2.1.1. <i>Variables para el cálculo del MAWOP.</i>	28
2.1.2. <i>Aplicación de ecuaciones para el cálculo del MAWOP según los métodos DDM, SDM Y EDM</i>	30
2.2. Diseño de la herramienta digital MW-PIPEDRIVE mediante lenguaje de programación (Visual Basic)	38
2.2.1. <i>Clasificación de variables de entrada y salida</i>	39
2.2.2. <i>Entrada de datos</i>	40
2.2.3. <i>Desarrollo de algoritmos y resultados de la herramienta MW-PIPEDRIVE</i>	45

2.3. Reproducción de escenarios propuesto en la norma API RP 90-2 de 2016 para la validación de la herramienta digital MW-PIPEDRIVE	49
2.3.1. <i>Comparación de resultados de la herramienta con los estipulados en la norma API RP 90-2</i>	50
2.4. Validación de tres (3) casos reales aplicando la herramienta MW-PIPEDRIVE	50
3. RESULTADO Y ANALISIS	52
3.1. Verificación del funcionamiento de la herramienta MW-PIPEDRIVE	52
3.1.1. <i>Análisis método SDM para el cálculo del MAWOP</i>	56
3.1.2. <i>Análisis método DDM para el cálculo del MAWOP</i>	61
3.2. Implementación de la herramienta MW-PIPEDRIVE en escenarios reales operados por ECOPETROL S.A.	64
3.2.1. <i>Calculo del MAWOP para el POZO A</i>	64
3.2.2. <i>Calculo del MAWOP para el POZO B</i>	67
3.2.3. <i>Cálculo del MAWOP para el POZO C</i>	71
4. CONCLUSIONES	76
5. BIBLIOGRAFÍA	78
ANEXOS	79

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. <i>Entrada de fluidos al anular</i>	18
Figura 2. <i>Anular</i>	19
Figura 3. <i>Barreras</i>	20
Figura 4. <i>Estallido</i>	25
Figura 5. <i>Diseño de la herramienta para cálculo de MAWOP</i>	27
Figura 6. <i>Herramienta eRedbook presión de colapso y estallido</i>	29
Figura 7. <i>MAWOP resistencia a la formación</i>	32
Figura 8. <i>Estado Mecánico Pozo AN</i>	33
Figura 9. <i>Presión de colapso para el anular A del pozo AN.</i>	33
Figura 10. <i>Presión de estallido del anular A para el pozo AN</i>	34
Figura 11. <i>Presión de estallido a la tubería externa del anular A del pozo AN</i>	35
Figura 12. <i>Presión de estallido para el anular B del pozo AN</i>	36
Figura 13. <i>Presión de colapso para el anular B del pozo AN</i>	36
Figura 14. <i>Interfaz de la herramienta MW PIPEDRIVE.</i>	39
Figura 15. <i>Datos de entrada</i>	40
Figura 16. <i>Lista desplegable para estado mecánico</i>	41
Figura 17. <i>Dimensiones y resistencias</i>	42
Figura 18. <i>Presiones trabajo del cabezal</i>	42
Figura 19. <i>Datos de entrada MAWOP elemento de completamiento</i>	43
Figura 20. <i>Lista desplegable de registros eléctricos</i>	44
Figura 21. <i>Densidades de los anulares.</i>	45
Figura 22. <i>Factor de desgaste para el estallido y colapso</i>	45
Figura 23. <i>Método EDM</i>	46
Figura 24. <i>Método SDM</i>	47
Figura 25. <i>Resistencia a la formación y Elementos de completamiento.</i>	48
Figura 26. <i>Método EDM</i>	48
Figura 27. <i>Estado mecánico Norma API RP 90-2</i>	56
Figura 28. <i>Resultados método SDM</i>	57
Figura 29. <i>Resultado MAWOP método EDM</i>	59

Figura 30. <i>Datos Ufb, Ufc y TVD para el método EDM</i>	60
Figura 31. <i>Resultados método DDM</i>	61
Figura 32. <i>Interfaz de entrada del pozo A.</i>	65
Figura 33. <i>Interfaz de resultados MW-PIPEDRIVE para el pozo A</i>	66
Figura 34. <i>Interfaz de entrada de datos para el POZO B</i>	69
Figura 35. <i>Interfaz de resultados de la herramienta MW-PIPEDRIVE para el pozo B</i>	70
Figura 36. <i>Interfaz de entrada de datos para el POZO C</i>	72
Figura 37. <i>Interfaz de resultados de la herramienta MW-PIPEDRIVE para el pozo C.</i>	74

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. <i>Condiciones escenario implementado por la norma</i>	49
Tabla 2. <i>Información técnica de los pozos reales</i>	51
Tabla 3. <i>Margen de error para MAWOP según los métodos del escenario de la norma.</i>	52
Tabla 4. <i>Porcentaje de error global de la herramienta MW-PIPEDRIVE</i>	55
Tabla 5. <i>Especificaciones cabezal y elemento de completamiento</i>	56
Tabla 6. <i>Resultados de la herramienta MW-PIPEDRIVE Para el anular “A” método SDM</i>	58
Tabla 7. <i>Resultados MAWOP con el método SDM</i>	58
Tabla 8 <i>Resultados MAWOP con el método EDM</i>	60
Tabla 9. <i>Resultados para el método DDM según la norma</i>	62
Tabla 10. <i>Resultados MAWOP con el método DDM</i>	63
Tabla 11. <i>Comparación MAWOP Norma VS Herramienta.</i>	63
Tabla 12. <i>Especificaciones Cabezal y Formación POZO A</i>	65
Tabla 13. <i>Resultados MAWOP SDM</i>	66
Tabla 14. <i>Comparación MW-PIPEDRIVE vs Ecopetrol S.A para el POZO A.</i>	66
Tabla 15. <i>Especificaciones Cabezal, elemento de completamiento y resistencia a la formación POZO B</i>	68
Tabla 16. <i>Resultados presentados por la herramienta MW-PIPEDRIVE para el pozo B</i>	69
Tabla 17. <i>Comparación MW-PIPEDRIVE VS ECOPETROL S.A para el POZO B.</i>	71
Tabla 18 <i>Especificaciones Cabezal, elemento de completamiento y resistencia a la formación POZO C.</i>	72
Tabla 19. <i>Resultados presentados por la herramienta MW-PIPEDRIVE para el pozo C.</i>	73
Tabla 20. <i>Comparación MW-PIPEDRIVE VS ECOPETROL S.A para el POZO C</i>	74

LISTA DE ABREVIATURAS

TVDz: Profundidad la que se encuentra el zapato de la zona evaluada

FG: Gradiente de fractura de en psi/ft d

MWG: Gradiente del peso del lodo en psi/ft

Pci: Presión de colapso de la tubería interna evaluada

Pye: Presión de estallido de la tubería externa que se está evaluando

Pyev: Presión de estallido del casing que se esté evaluando

Pysup: Presión de estallido del casing superficie

Pcis: Presión de colapso de la tubería interna a la de superficie

Pw: Presión de diseño del cabezal

Pcc: Presión de diseño de elemento de completamiento

ΔPcc : Diferencial de presión del elemento de completamiento

MIYP: Valor nominal de estallido

Ufb: Factor de estallido determinado por el porcentaje de desgaste

$\Delta Pwcb$: Diferencial de presiones hidrostáticas de los anulares que se presentan en un pozo.

Phinside: Presión hidrostática del fluido o lodo del anular interno.

Phoutside: Presión hidrostática del fluido o lodo del anular externo.

MCP: Valor nominal de colapso

Ufc: Factor de colapso determinado por el porcentaje de desgaste

RESUMEN

Los pozos son contenedores de presión y se diseñan para soportar cierta cantidad de presión, es por esto que la existencia de presión en las tuberías de revestimiento es un problema cuando este esfuerzo sobrepasa la capacidad de diseño del hueco para contenerla.

En este trabajo de grado se presenta el diseño de una herramienta digital que simula los valores de la máxima presión permitida en cabeza de pozo, para garantizar la integridad del pozo según la norma **ANNULAR CASING PRESSURE MANAGEMENT FOR ONSHORE WELLS API RP 90-2 del 2016**, la cual determina las causas de la existencia de presión en el anular y los métodos para calcularla. Por otro lado, en este proyecto se establecen las ecuaciones y variables que sean necesarias para el cálculo del **MAWOP**; Además, se desarrolla la secuencia lógica que debe seguir la herramienta para determinar la presión de colapso, presión de estallido, y el **MAWOP** (cabezal, elementos de completamiento, formación expuesta).

Con la programación de la herramienta **MW-PIPEDRIVE**, la verificación y validación de esta se realiza mediante la simulación de la situación hipotética de (1) escenario presentado en la norma, reproducciones que resultaron exitosas. Posteriormente, se realiza la evaluación de (3) pozos reales en tierra por medio de la herramienta **MW-PIPEDRIVE**, los cuales arrojan como resultado el **MAWOP** para cada pozo empleado con un grado alto de exactitud. Finalmente, a simulación de los (4) escenarios cumplen con el requerimiento que exige el estándar técnico según las condiciones operativas para asegurar la integridad del pozo.

PALABRAS CLAVES: API RP 90-2, herramienta digital, altas presiones, cabeza pozo, espacio anular, casing, tubing, integridad de pozo, **MAWOP**

INTRODUCCIÓN

La industria petrolera es la que más peligro conlleva; tanto para el personal que se encuentra en superficie, como también para el medio ambiente donde se ejecuta la explotación.

Por esto, es importante establecer medidas que soporten la integridad de los pozos y dar soluciones orientadas a reducir el riesgo de derrames no controlados de fluidos de yacimiento durante la vida del proceso de extracción. Para esto se diseñan sistemas de barreras de pozo, las cuales serán instaladas para soportar todas las cargas a las que estas puedan estar expuestas y así poder mantener su función durante toda la vida útil de este. En consecuencia, los sistemas de barreras en el que se centra este proyecto son los requisitos de presión y temperatura que debe haber en cada anular del pozo para operar con seguridad.

La contención de fluidos producidos o inyectados se logra con el uso de un sistema de barreras físicas. Estas barreras son el revestimiento, el cemento, empaques y otros elementos de sellado. Estas defensas están diseñadas para proporcionar la capacidad de contener fluidos bajo las cargas y condiciones que se encontraran durante la construcción del pozo y a través de la vida útil del mismo. Con todo esto la existencia de presión en un espacio anular es problema cuando la presión excede la capacidad máxima diseñada permitida de presión operante en la cabeza del pozo, o cuando un cambio en la presión indica una pérdida potencial de la integridad del pozo. Es importante monitorear la presión anular de la tubería en las perforaciones onshore, incluyendo su etapa de producción, inyección, observación, monitoreo y almacenamiento.

La norma **API RP 90-2** del **2016** propone tres métodos que pueden ser utilizados para monitorear la máxima presión permitida en cabeza de pozo (MAWOP), comienza por el método más sencillo pero el menos preciso. Es un método que fija una presión al momento de conocer el MAWOP dependiendo del anular que se va a evaluar, si el anular que se va a estudiar es el de superficie se tomara de referencia una presión de 100 psi (700Kpa), pero si, los que se van a estudiar son los anulares que se encuentren internos al nombrado anteriormente se tendrá como referencia 200 psi(1400Kpa), por esto, este método es el menos tomado en cuenta, como no se le ve importancia en condiciones en las que se encuentre el pozo. En este orden de ideas, la norma API RP 90-2 de 2016 involucra un método que es el más usado en la mayoría de los casos (SDM) donde por medio de estudios realizados por American Petroleum Institute se determinó constantes que tienen en cuenta el desgaste que puede tener cada revestimiento para aguantar altas presiones. La implementación de este método se viene usando en Colombia solo en los últimos años y es

claro la ausencia de herramienta de cálculo automático en las empresas operadoras, que permita el cálculo del MAWOP bajo condiciones de integridad y cumplimiento de la norma.

Anteriormente se introdujo una serie de dudas sobre cuanta presión soporta un anular y la cantidad de barreras en cada uno para asegurar su integridad. Por esta razón, se han realizado una serie de estudios para el entendimiento de este fenómeno. En este proyecto, se resaltan dos antecedentes; el primero expone el caso en la cuenca Tarim en china que lleva como nombre “Investigación práctica del ciclo de vida completo de la integridad del pozo HTHP, en el campo petrolífero de Tarim” donde se presenta un aumento de presión en el anular debido a una entrada de fluidos en este por falla en la sarta de la tubería, una alta complejidad geológica, fracturas naturales y domos salinos. Para ello realizaron estudios en la cuenca encontrando una alta influencia de fluidos gasíferos y proponen varias soluciones como la optimización de la estructura del pozo, revestimiento con anti desgaste, sistema de lechada para cementaciones profundas, tecnología en la integridad de barreras antes de entrar en la fase de producción, para así, garantizar la integridad de los pozos. El informe de Liu, explica los posibles orígenes del aumento de presión en el anular, facilitando la comprensión de esta problemática. [1]

Como segundo escenario, se tomó de referencia un proyecto llamado “Soluciones de gestión y control de la integridad de pozos”, en este se busca la generación de gestión y control de la integridad de pozos a través de los datos operativos y de diseño del pozo, a partir de los cuales se generó una herramienta digital; uno de los criterios considerados fue la norma API RP 90-1 del 2006. Para ello se desarrolló el cálculo del MAWOP, mediante el uso del Método Simple De rating (SDM) que realiza los cálculos MAWOP. El objetivo principal de esta herramienta es educativo donde el usuario tiene acceso a una fácil interpretación del estado del pozo, con la capacidad de actuar en caso de pérdida de estabilidad del pozo. Este proyecto gestiona todos los estándares y normas que cumplen con el control de pozos; adicionalmente, efectúa un seguimiento exhaustivo del estado de los pozos para evitar accidentes como: derrames en superficie, daño a la salud del personal, entre otras. Este trabajo sirve como preámbulo para el desarrollo de la herramienta ya que los autores crearon un software digital para la integridad de pozos tomando como referencia las normas NORSOK D010 y API RP 90 del 2006. Sin embargo, el programa se creó 5 años (2015) y la norma se actualizó en el 2016 [2].

Acerca de encontrar posibles soluciones para desastres estudiados, este proyecto planteo como objetivo general **diseñar una herramienta digital que permita el cálculo MAWOP tomando**

como referencia la norma **API RP 90-2 del 2016**, lo que permitirá realizar una comparación que determine la máxima presión permitida en cabeza de pozo, y así poder mejorar el control de pozos, a la hora contribuir con buenas prácticas en integridad de pozos. Por esto, la investigación que aquí se realizara se delimita por unos objetivos específicos que se presentan en el orden correspondiente, aquí presentado:

- Identificar las variables y ecuaciones que permitan el cálculo del **MAWOP**.
- Diseñar la herramienta digital cuyo resultado permita el cálculo del **MAWOP** para los pozos contemplados en la normal **API RP 90-2 del 2016**.
- Verificar el funcionamiento correcto de la herramienta mediante la reproducción de escenarios operativos indicados en la normal **API RP 90-2 del 2016**.
- Comparar los requerimientos y diseño según la norma **API RP 90-2 del 2016** en los anulares de pozos aleatorios de referencia respecto a las condiciones operativas actuales.

Con el cumplimiento de los objetivos específicos y el objetivo general, se logrará el diseño e implementación de una herramienta digital que calcula el MAWOP en los anulares de los pozos, basada en la norma API RP-90-2 del 2019, aporta mejores prácticas y optimizando los procesos que permiten identificar y solucionar la falla en los anulares que afectan la integridad de los pozos. Reduciendo así las catástrofes petrolíferas causadas por baja integridad de los pozos.

En términos generales el proyecto de grado se conforma por un total de (4) capítulos correspondientes a un Marco teórico, donde se verá reflejado las generalidades de control de pozos respecto a los anulares, causas por las cuales se presenta presión en el anular, presión de estallido y colapso y especificación de los métodos; en el segundo capítulo se reflejara la Metodología de la investigación y datos, donde se presentaran los objetivos específicos, el primero de estos se encuentra en la sección 2.1 identificación de variables y ecuaciones para cada método (DDM,SDM,EDM), el segundo objetivo se localiza en la unidad 2.2. diseño de la herramienta digital MW-PIPEDRIVE mediante lenguaje programación (Microsoft Excel-Visual Basic), el tercer objetivo se verá reflejado en el subtítulo 2.3. reproducción de escenarios propuestos en la norma API RP 90-2 de 2016 para la validación de la herramienta digital MW-PIPEDRIVE y el último objetivo reposa en la parte 2.4 Validación de tres (3) casos reales aplicando la herramienta MW-PIPEDRIVE; en el tercer capítulo, se muestran los resultados de la investigación y análisis, donde se refleja la información y resultados obtenidos del funcionamiento de la herramienta,

teniendo en cuenta los escenarios propuestas por la norma API RP 90-2 y los (3) tres escenarios reales propuestos por Ecopetrol S.A.; finalmente, se darán las conclusiones del proyecto.

1. MARCO TEÓRICO

Este capítulo corresponde al entorno de referencia general en el que se desarrolla y se consolida la información teórica que sustenta la presente investigación. Lo que es fundamental para comprender los conceptos utilizados a lo largo del trabajo actual. Además, son importantes para entender la evaluación física de cada variable, tanto de entrada como de salida, de la herramienta MW-PIPEDRIVE, desarrollo central de este proyecto de investigación.

En las siguientes secciones, se muestra una breve descripción de las generalidades de control de pozo, las causas por las que puede existir presión en un anular, métodos para cálculos del MAWOP, y presiones de estallido y de colapso durante la ejecución del proyecto. Esta sección se lleva a cabo en base a todas las estipulaciones que se enuncian en la norma API RP 90-2.

1.1. MAWOP

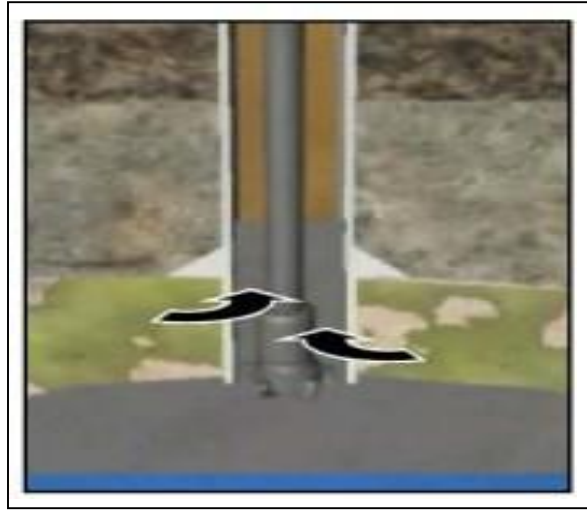
Como primera instancia se debe conocer que es este parámetro y para qué sirve. Por esto Maximum allowable wellhead operating pressure (MAWOP) o la máxima presión operativa permitida en cabeza de pozo es un valor determinado a base de ecuaciones matemáticas descritas en este capítulo, esta presión nos indica la máxima presión que puede tener un pozo para mejores prácticas y optimiza los procesos que permiten identificar el potencial de falla de contención de fluidos en los anulares por pérdida de integridad en los pozos.

1.2. Generalidades del pozo

“El control de pozos es uno de los desafíos más grandes que enfrentan los operadores durante las etapas de perforación y terminación de un pozo, Durante estas etapas existe la probabilidad de que se origine un brote debido a un desbalance entre la presión de formación y presión hidrostática del fluido de control.” [3]

Figura 1.

Entrada de fluidos al anular



Nota. La figura representa la entrada de fluidos al pozo. Tomado de: Conceptos Generales de Control de Pozos.<http://132.248.52.100:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/1103/A4.pdf?sequence=4>

“Si los brotes son detectados a tiempo, aplicando las medidas inmediatas y correctas para manejarlo en superficie no causa daños industriales, ecológicos o al personal. Pero en caso contrario, se incrementa los tiempos y costos de la intervención.” [3]

“Las operaciones en pozos con presión involucran dos consideraciones primarias:

Seguridad y Eficiencia. Siempre que la presión sea un factor de riesgo, existirá peligro para el personal y el equipo.” [3]

“En condiciones óptimas, el control del pozo radica en tener la presión del fondo del pozo constante, durante la entrada de fluidos y hasta su desalojo.”

“Se considera que un pozo se encuentra fuera de control únicamente cuando existe un flujo no intencional desde el pozo de fluido de la perforación, combustible, gas o agua sobre la superficie del suelo o cuando la autoridad regulatoria lo determine.” [3]

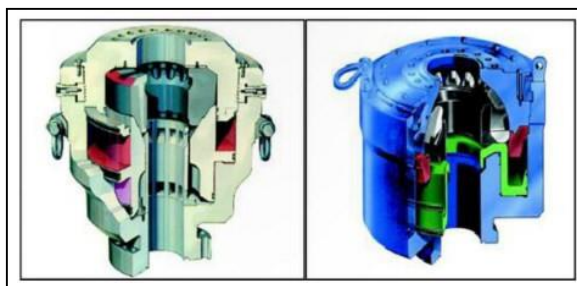
1.2.1. Anulares

“Los anulares, representados en la **Figura 2**, son dispositivos para controlar la presión en la cabeza de pozo. Hay algunos modelos que reciben la potencia del proyecto de explotación; donde la misma presión estimula y provee de una fuerza de sellado adicional. La mayoría se cierran en la parte superior del pozo y alrededor de la tubería de perforación” [2].

“El BOP es un elemento de obturación circular hecho en goma. Dispone de un pistón, un cuerpo y un cabezal. Cuando se bombea el fluido hidráulico en la cámara de cierre, el elemento de sellado es empujado hacia adentro, cerrando tubería.” [2]

Figura 2.

Anular



Nota. La figura representa un anular. Tomado de: Solucion de gestion y control de la integridad de pozos.Requisitos. http://oa.upm.es/36500/1/PFC_Carmen_Garcia-Miguel_Martinez.pdf

1.2.2. Barreras

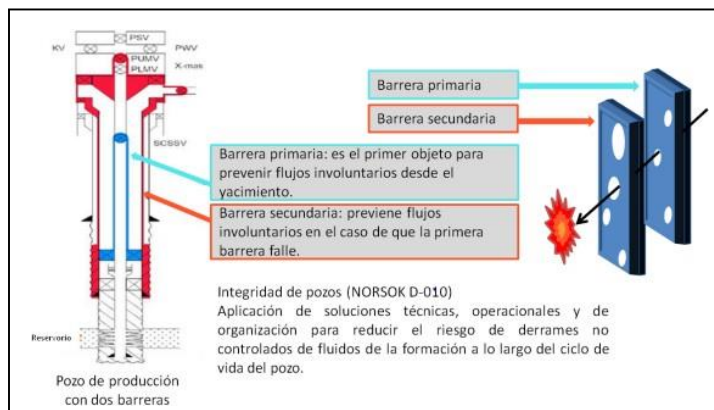
« Es una cobertura de uno o varios elementos de barrera de pozos dependientes entre sí, que impiden que los fluidos o gases fluyan involuntariamente desde la formación a otra formación o a la superficie. Las barreras se tienen que diseñar para “garantizar la integridad de pozos durante todo su ciclo de vida”. Las barreras de pozo deben ser diseñadas para evitar los flujos al interior y los escapes al exterior, y diseñadas de manera que su rendimiento pueda ser probado y verificado. »

« “Las barreras de pozo se pueden definir en serie de paralelo, como primaria o secundaria, temporal o permanente, activa o positiva, o como física o no física. Las barreras de pozo serán diseñadas, fabricadas e instaladas para: soportar todas las cargas a las que pueda ser expuestas y mantener su función durante todo el ciclo de vida útil del pozo.” » [2]

« La ubicación física, el estado de integridad y las condiciones de las barreras deben ser conocidos en todo momento. El diseño de barrera de pozo debe ser construido de modo que, aunque haya un fallo en un elemento barrera (WBE) no se produzca derrames. La barrera de pozo incluye uno o varios elementos barrera, los criterios de aceptación técnicos y operativos para cada WBD se define en la NORSOK D-10 como se muestra en la **Figura 3.** » [2]

Figura 3.

Barreras



Nota. La figura representa las barreras que se colocan en un pozo. Tomado de: Solucion de gestion y control de la integridad de pozos.

http://oa.upm.es/36500/1/PFC_Carmen_Garcia-Miguel_Martinez.pdf

1.3. Generalidades de la norma API RP 90-2 del 2016

« Esta práctica recomendada está destinada a servir como guía para gestionar la presión en los anulares en pozos onshore. Los pozos en tierra están sujetos a causas desde su construcción y operación en pozos offshore (discutidos en la norma API 90). La construcción de un pozo en tierra es proporcional a cada anular del revestimiento en la cara del pozo. » [4]

“Los pozos están diseñados para permitir la operación bajo presión. La existencia de presión en un espacio anular contenido solo se convierte en problema si esta excede la máxima presión operativa en cabeza de pozo (MAWOP) o cuando un cambio en la presión indica una posible pérdida de integridad de pozo.” [4]

“Esta norma recomienda como se debe monitorear la presión anular tanto por revestimientos, tuberías, almacenamiento.

Aplicada para pozos donde:

- Presión inducida termalmente
- Presión impuesta por el operador
- Presión sostenida en el anular (SCP)” [4]

“Proceso es aplicado desde el inicio de vida del pozo, que empieza en el proceso de la construcción y se extiende hasta el inicio de proceso de abandono de los pozos, excluyendo cualquier periodo de intervención de pozo o actividades de workover. “ [4]

“El aislamiento de zonas de flujo potencial durante la construcción de pozo (zonas que pueden ser fuente de presión de tubería anular sostenida).” [4]

“Esta norma abarca 3 métodos para el control de la presión anular: Default Designation Method(DDM), Simple De-rating Method (SDM) y Explicit De-rating Method (EDM) el cual empieza por el más sencillo hasta el más complejo, dando ejemplos para que cada operador pueda monitorear las presiones en el anular y así brindar una integridad de pozo.” [4]

1.4. Fuentes de presión en anular

“La presión en el anular se clasifica según la fuente de presión como lo son: presión inducida termalmente, presión impuesta por el operador o presión sostenida en el anular. Existe la posibilidad de fuentes concurrentes.” [4]

A continuación, se explicará cada una de las fuentes de presión:

1.4.1.Presión inducida termalmente

« Es el resultado de la expansión de los fluidos atrapados (líquido y/0 gas) en un sistema cerrado causado por un aumento de temperatura en la cara del pozo cuando se inicia la producción o inyección. Esta presión puede ser extraída o se puede retener, según el diseño del pozo. Una vez ya extraída, no se espera la proyección de la presión inducida termalmente. » [4]

1.4.2.Presión impuesta por el operador

« Un operador puede imponer presión en el anular por varios propósitos operacionales como lo son gast lift, inyección, asistencia en el monitoreo de la presión dentro del anular o por otras razones. Esta presión puede ser temporal o permanente, operación planeada o en función del pozo, al igual que la presión inducida termalmente no se espera que la presión impuesta por el operador se reconstruya una vez que se extrae o se abandona. » [4]

1.4.3.Presión sostenida en el anular (SCP)

« Es el resultado de un flujo desde la formación en comunicación abierta con el anular (ausencia de una barrera, o la falla de una barrera que crea un patrón de flujo involuntario). Un flujo puede resultar de una fuga de empaque, presión hidrostática inadecuada, fuga de conexión tubular, pérdida de presión hidrostática, o como resultado de un anular mal cementado. La fuente de un SCP puede ser de una formación presurizada incluyendo una formación productora de hidrocarburos, formaciones productoras de agua, zonas de gas o aguas someras. » [4]

1.5. Métodos de cálculo de las presiones óptimas de operación de los anulares

«El anular que se está evaluando para conocer su MAWOP puede ser evaluado por los siguientes métodos, que van desde el más simple hasta el más complejo:

- Default Designación Method(DDM)
- Simple De-rating Method: (SDM)
- Explicit De-rating Method (EDM).

El método elegido dependerá del historial y de los datos disponibles. Pueden utilizarse diferentes métodos en pozos del mismo campo o en diferentes anulares del mismo pozo. » [4]

Posteriormente, se dará una breve explicación de los tres (3) métodos:

1.5.1.Default Designación Method

«El DDM es el más conservador y más simple de los métodos aplicados; permite una reducción en la clasificación que se aplica a lo largo de un arreglo grande de pozos. No requiere de datos ni de análisis para ser aplicado. Si bien el DDM es el menos preciso de los métodos, es apropiado para pozos que operan a bajos niveles de presión anular. » [4]

“El DDM proporciona un método simple para determinar el MAWOP. Utilizando el enfoque DDM, el componente del revestimiento para el anular que se está evaluando es:

- 100 psi (700 kPa) para el anular más exterior, y
- 200 psi (1400 kPa) para todos las demás anulares.” [4]

1.5.2.Simple De-rating Method

El SDM es apropiado para pozos donde la historia está bien documentada, donde es conocida la erosión, corrosión y/o desgaste significativo de la sarta de perforación o que han operado a altas temperaturas que requieren un análisis más detallado. » [4]

«Utiliza un enfoque para el anular que se esté evaluando, teniendo en cuenta el revestimiento interior y exterior que compone al anular, el MAWOP es evaluado en el siguiente orden:

- 50 % de la presión de estallido (MIYP) del revestimiento que se esté evaluando.

- 75 % de la presión de colapso (MCP) del revestimiento interno del que se está evaluando.
- 80 % de la presión de estallido (MIYP) del revestimiento externo del que se está evaluando. » [4]

“El MIYP y MCP para la tubería o el revestimiento puede ser calculado de acuerdo a la norma API 5C3. Cuando la tubería o el revestimiento se componen de dos o más pesos o grados, la combinación de peso o grado produce los valores más bajos de MIYP y MCP estos valores deben ser usados en el componente de reducción de clasificación tubular del MAWOP. En situaciones donde la resistencia de la conexión es menor que la del cuerpo de la tubería, se deben utilizar las calificaciones de la conexión.” [4]

«Para la clasificación del componente de tubular del MAWOP, un factor de seguridad expresado como porcentaje del MIYP y El MCP del revestimiento se utiliza simplemente para reducir la clasificación. Este factor de seguridad toma en cuenta las siguientes consideraciones:

- La clasificación de presión mínima de otros elementos dentro del revestimiento, como empaques, cemento, roscas, entre otros.
- Efectos operativos y ambientales desconocidos (erosión o corrosión de la tubería);
- Desgaste desconocido del revestimiento.

Para el cálculo de MAWOP para un elemento, se utiliza un factor de seguridad de 50 del MIYP para el revestimiento evaluado. Un porcentaje más bajo del MIYP (30) se permite para el revestimiento exterior, ya que es la última barrera» [4]

1.5.3. Explicit De-rating Method.

«El EDM requiere extensos datos y análisis, pero proporciona el valor de **MAWOP** más preciso cuando se tienen datos extraídos de registros eléctricos. Este proporciona confianza para permitir el funcionamiento continuo de un pozo a presiones anulares altas. » [4]

“Si una tubería del casing tiene un desgaste significativo de la tubería de perforación, sospecha o se sabe que tiene erosión o corrosión, o está operando bajo alta temperatura, el operador debe considerar el uso del método de rating explícito (EDM) para aplicar una reducción del espesor de la pared o de las propiedades del material al calcular el MIYP y el MCP.” [4]

«Utilizando el enfoque EDM para la tubería o revestimiento interno y externo, el componente de clasificación tubular de MAWOP para el anular que se evalúe es el mínimo de uno de los siguientes:

- 80 % del MIYP ajustado del revestimiento externo;

- 80 % del MCP ajustado del revestimiento interno;
- 100 % del MIYP ajustado del siguiente revestimiento externo (proporciona un factor adicional de seguridad);
- 100 % del MCP ajustado del revestimiento exterior, (el revestimiento interno del siguiente anular exterior adyacente) (proporciona un factor adicional de seguridad).» [4]

“Para el componente de clasificación tubular de MAWOP, la clasificación del MIYP para los revestimiento o tubería interna y externa se consigue mediante reducir explícitamente el espesor nominal de la pared debido a los daños ocasionados por la corrosión, la erosión, la perforación, el cableado, y ranuras de tubos; u otras formas de desgaste.” [4]

«Además, los factores de seguridad adecuados se seleccionan y se aplican a completar el ajuste tanto de MIYP como de MCP. El MIYP y el MCP para el revestimiento o tubería puede ser calculada de acuerdo con API 5C3. En situaciones en las que la resistencia de la conexión sea inferior a la sarta de la tubería, las calificaciones de la conexión deben ser utilizadas. » [4]

1.6. Presión de tuberías

« la presión de las tuberías ha sido materias de muchas y fuertes discusiones, de extensos estudios y de diversas pruebas de laboratorio, que han permitido evolucionar en el conocimiento del comportamiento mecánico de las tuberías. Es por ello que diferentes instituciones se han abocado a la tarea de reconocer y recomendar prácticas para estandarizar el proceso de fabricación como la medición de su desempeño mecánico o capacidad de resistencia, y hasta la práctica para un buen manejo de los mismos. » [5]

1.6.1. Presión de estallido

«La resistencia a la presión interna o estallido, refleja la cantidad de esfuerzo que resiste la estructura metálica a un diferencial de presión interno. La resistencia a la presión interna de los revestimientos está basada en los siguientes principios:

- La resistencia al estallido de la conexión debe ser igual o mayor que la de la tubería.
- Para conexiones API, particularmente la Buttress, es posible que la resistencia al estallido de la conexión sea inferior a la de la tubería. » [5]

« El desempeño de las tuberías con respecto al estallido se calcula en base al procedimiento recomendado por el API, dadas las siguientes variables:

- Diámetro Externo de la tubería, D
- Espesor de la tubería, t

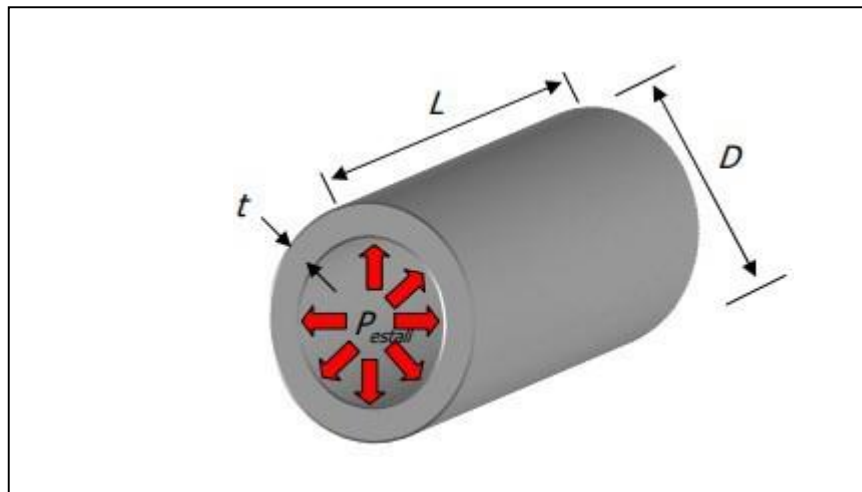
- API o mínimo esfuerzo de cedencia de la tubería,

El cálculo de la presión interna necesaria para que el tubo estalle de acuerdo con el procedimiento recomendado por el API se realiza con la siguiente ecuación: » [5]

$$P_{estallido} = 0,0875 \left(\frac{2\sigma_{API} t}{D} \right)$$

Figura 4.

Estallido



Nota. La figura representa presión de estallido que se ejerce a la tubería. Tomado de: Analisis de deformacion y el colapso de la tuberia de revestimiento en los campos del piedemonte operado por BP. <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2008/125446.pdf>

1.6.2. Presión de colapso

« La resistencia al colapso está relacionada con la capacidad de la tubería en mantener su forma, con un diferencial de presión aplicado desde su parte externa. El desempeño del revestimiento con respecto a la resistencia al colapso está basado en los siguientes principios:

- La resistencia al colapso de las conexiones siempre se asume mayor al de la tubería.
- La resistencia al colapso incluye la resistencia a la presión de fluido que se encuentra en el exterior y el interior de la tubería y a la tensión axial. La deformación del área transversal debido a cargas no uniformes debe ser tratada por separado.

- El efecto de doblado de la tubería con respecto a la resistencia al colapso es tomado como una carga axial equivalente, donde la carga equivalente es el máximo esfuerzo de doblado aplicado a la sección entera.

- Las cargas axiales que son aplicadas en la tubería pueden afectar la resistencia al colapso en forma positiva si es de compresión y negativa si es de tensión. En el diseño se debe tener en cuenta la de tensión, ya que es la que más impacta las cargas operacionales de la tubería. » [5]

« El desempeño de la resistencia a la compresión se calcula con base al procedimiento recomendado por el API, dadas las siguientes variables:

- Presión interna, p_i
- Esfuerzo Axial, z
- Diámetro Externo de la tubería, D
- Espesor de la tubería, t
- API o mínimo esfuerzo de cedencia de la tubería,

Para calcular el colapso de una tubería no vacía con una presión interna p_i se tiene la siguiente ecuación: » [5]

$$P_o = P_{colapso} + \left(1 + \frac{2}{D/t}\right) P_i$$

Para encontrar el detalle de cómo se obtiene la presión de colapso, se especifica en la norma API 5C3.

2. METODOLOGÍA

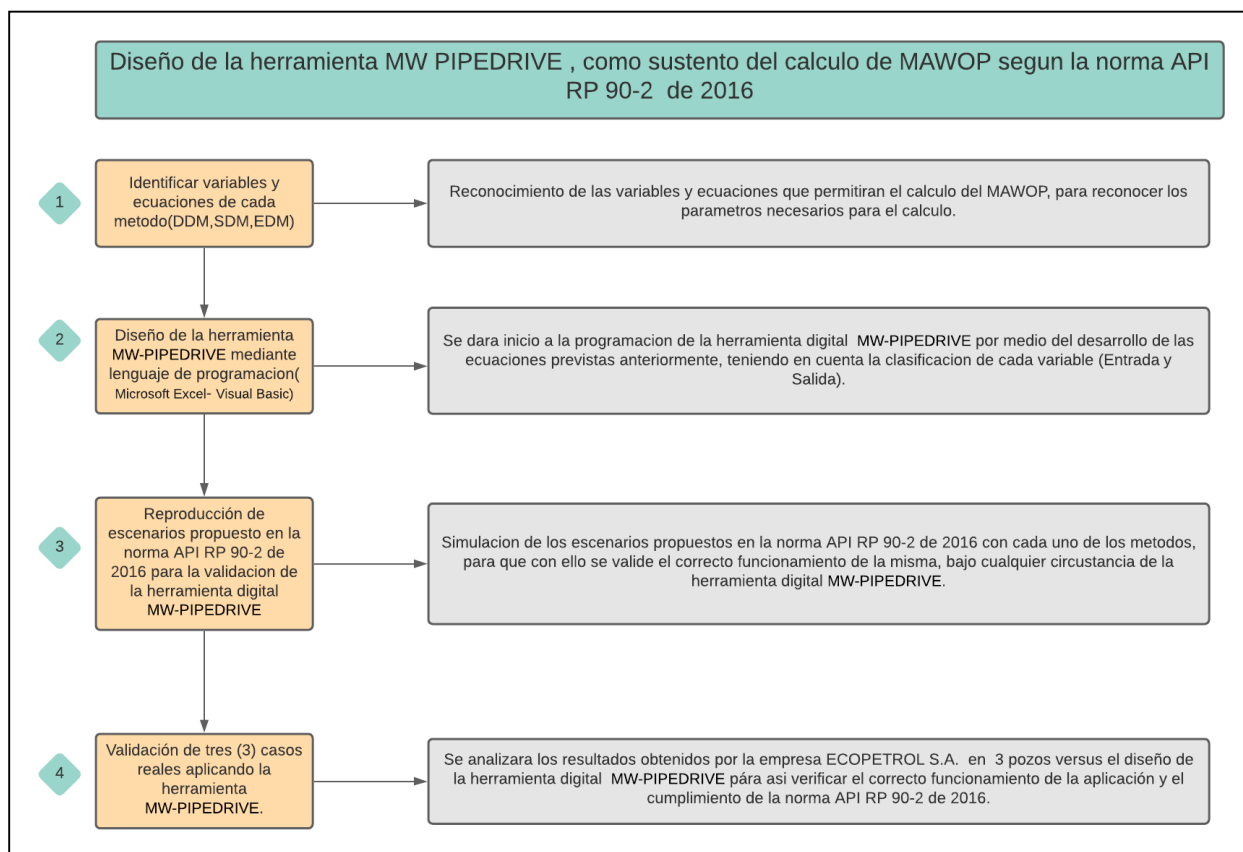
La herramienta digital MW-PIPEDRIVE será un mecanismo que permitirá la automatización de los parámetros para el cálculo del **MAWOP** en la vida útil de un pozo petrolífero. Para lograr el diseño de la herramienta, es primordial seguir una serie de pasos y orden que permita el cumplimiento de este proyecto.

Con el fin de desarrollar y validar la herramienta, es esencial ejecutar cuatro pasos, estos posibilitan una metodología acorde a los objetivos específicos generando un cumplimiento con el objetivo principal del proyecto. A continuación, se entrará en detalle de los cuatro pasos para ejecutar dicho objetivo.

La ilustración de los pasos, se presenta en la **Figura 5**, en el que se especifica el orden que debe llevar cada uno, para poder ejecutar el diseño de la herramienta digital:

Figura 5.

Diseño de la herramienta para cálculo de MAWOP



Nota. Esquema de secuencia para el procedimiento de desarrollo de la herramienta MW-PIPEDRIVE

2.1. Identificación de variables y ecuaciones para cada método (DDM, SDM, EDM)

Para calcular el MAWOP es necesario indicar que existen dos variables que facilitarían el cálculo dando así las condiciones de presión máximas a las que el pozo se puede someter. Esas variables se conocen como presión de estallido y presión de colapso.

Para establecer las variables indicadas anteriormente, se necesita explicar un suceso de ecuaciones que permitan conocer la presión máxima permitida en cabeza de pozo para cada anular en situaciones reales, teniendo en cuenta que, según la norma, es obligatorio contemplar las fuentes por la cual existe presión en el anular y las condiciones en las que se encuentra el pozo para escoger alguno de los tres métodos.

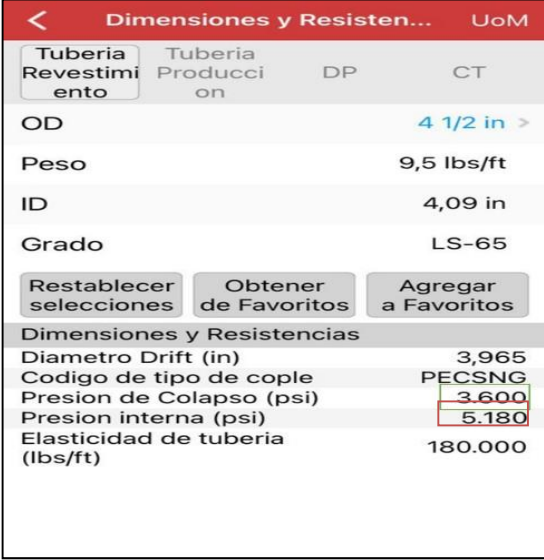
2.1.1. Variables para el cálculo del MAWOP.

Existen variables que ayudan a calcular el **MAWOP** como se ha mencionado anteriormente, a lo que se refiere, a un modelo matemático de las variables, donde se encuentran las especificaciones técnicas necesarias para una integridad de pozo óptima para operaciones específicas.

Estas variables más conocidas como presión de estallido y de colapso, son las que me permitirán calcular el MAWOP, para el método SDM y EDM. Para obtener estas presiones no fue necesario realizar cálculos debido a que la aplicación eReedBook de Halliburton que puede ser descargada por el AppStore o PlayStore proporciono dichas presiones con respecto a su biblioteca de revestimientos y tuberías. En la siguiente **Figura 6** se refleja como el aplicativo da el resultado de la presión de colapso y estallido. Para esto esta herramienta cuenta con gran cantidad de combinaciones de diámetro externo, peso y grado para tener las mayores resistencias de tuberías con conexiones API. Este aplicativo se convirtió en la base de nuestra biblioteca de tuberías para la herramienta MW PIPEDRIVE.

Figura 6.

Herramienta eRedbook presión de colapso y estallido



The screenshot shows a mobile application interface with a red header bar containing a back arrow, the title "Dimensiones y Resisten...", and "UoM". Below the header, there are two tabs: "Tuberia Revestimiento" (selected) and "Tuberia Produccion". The main content area displays the following data:

DP	CT
OD	4 1/2 in >
Peso	9,5 lbs/ft
ID	4,09 in
Grado	LS-65

Below the data, there are three buttons: "Restablecer selecciones", "Obtener de Favoritos", and "Agregar a Favoritos". A section titled "Dimensiones y Resistencias" contains the following data:

Diametro Drift (in)	3,965
Codigo de tipo de cople	PECSNG
Presion de Colapso (psi)	3.600
Presion interna (psi)	5.180
Elasticidad de tuberia (lbs/ft)	180.000

Nota. La figura representa la biblioteca que contiene la aplicación con respecto a la clasificación de las tuberías con conexiones API. Aplicación digital: eRedbook

Sin embargo, existen otro tipo de variables que se necesitan para obtener el MAWOP por alguno de estos valores, por esto, se dará una explicación de cada uno de ellos a continuación:

2.1.1.a. Presión de trabajo de cabezal. Este valor está determinado por el operador en el momento en el que se compra el cabezal, por esto, es necesario que para el cálculo del MAWOP del cabezal el usuario seleccione por medio de una lista desplegable de las presiones de trabajo de cabezal más comunes en Colombia el valor del pozo que está evaluando.

2.1.1.b. Presión de diseño del componente. Con este dato se podrá determinar el cálculo del MAWOP para un elemento de completamiento, este valor lo determina o es dado por el proveedor de estos dispositivos. Este se dejará libre para que el usuario digite el valor que tiene este elemento.

2.1.1.c. Densidad de la salmuera. La salmuera normalmente está dentro del tubing en el cual se encuentra el elemento de completamiento por lo tanto es necesario conocer esta densidad para

poder ayudar al cálculo del MAWOP del elemento del completamiento.

2.1.1.d. Presión del yacimiento. Esta nos facilitara el cálculo para la presión que se tiene debajo de componente. Y con esta, calcular la presión diferencial sobre el componente a evaluar. Como se muestra en la siguiente ecuación. [4]

$$\Delta p_{cc} = P_{columna\ encima\ del\ componente} - P_{columna\ hidrostática}$$

2.1.1.e. TVD Yacimiento. Este valor se usará para saber el diferencial que se tiene entre la profundidad del yacimiento y del empaque. Todo esto para determinar la presión diferencial sobre el componente a evaluar. Es digitado por el usuario.

2.1.1.f. TVD Empaque. Como anteriormente se explicó, este valor será usado para conocer la presión diferencial sobre el componente a evaluar. Es digitado por el usuario.

2.1.1.g. Gradiente de fractura. Este ayuda a calcular el MAWOP para la resistencia a la formación, este valor ya está determinado, y el usuario deberá digitarlo en la herramienta.

2.1.1.h. Gradiente de peso de lodo. Este valor se determina conociendo la densidad del lodo que se encuentra dentro del anular. El usuario debe digitar la densidad del peso del lodo para que esta lo calcule.

2.1.1.i. Factor de desgaste estallido (Ufb). Este valor se conoce al momento de correr un registro eléctrico teniendo un rango de 1 a 100%, esto para determinar MIYP Adj.

2.1.1.j. Factor de desgaste colapso (Ufc). Este valor se conoce al momento de correr un registro eléctrico teniendo un rango de 1 a 100%, esto para determinar MICP Adj.

2.1.2. Aplicación de ecuaciones para el cálculo del MAWOP según los métodos DDM, SDM Y EDM

La norma API RP 90-2 de 2016 es explícita con los cálculos que se deben realizar para poder obtener la presión máxima permitida en el cabezal del pozo (MAWOP) para cada uno de los tres

métodos (DDM, SDM y EDM), e indica un margen de seguridad de los componentes que existen dentro del sistema que contiene la presión aplicable a los tres métodos.

La elección del método estará sujeta a historial del pozo y datos que se tengan disponibles, sin embargo, se puede combinar de forma que en un mismo campo se utilicen diferentes métodos para diferentes anulares del mismo pozo, con el fin de extraer el máximo provecho de la información obtenida en cada campo y pozo. Teniendo en cuenta la madures del pozo o campo, así como los datos recolectados a través del tiempo se procede a la elección del método representativo de esta información.

2.1.2.a. Método Default Designación Method (DDM). El DDM es el más simple y el menos utilizado, consiste en desclasificar los análisis y datos previos del pozo, para pozos que operen a bajos niveles de presión anular.

Para conocer el valor del MAWOP, se tiene en cuenta cual anular se está evaluando; por ello, para el anular exterior se asume que el MAWOPanular externo de 100 psi. [4]

Y, Para todos los demás anulares que contenga el pozo el valor del MAWOPanular interno se asume un valor de 200 psi.

2.1.2.b. Método Simple De-rating Method (SDM). El segundo método es el más utilizado debido a su alta precisión y sus sencillos cálculos; SDM toma en cuenta la historia del pozo, la cual está bien documentada, sin embargo, este método no es aplicable para aquellos pozos en donde la corrosión es motivos de preocupación; debido a que no toma en cuenta el factor de perdida de grosor de tubing, pero considera presiones iniciales dentro del tubular diferentes a cero. Su metodología comprende el cálculo del MAWOP tomando en cuenta componentes dentro del anular del tubing, cabezal y resistencia de la formación (formaciones expuestas).

El cálculo del MAWOP para formaciones expuestas o resistencia de la formación tiene en cuenta los gradientes a los que se somete el tubular contra la cara de la formación cada vez que se sienta un zapato de perforación, así como el gradiente de fractura del cemento, debido a la fuerza de compresión por parte de la formación a la cara del pozo, como se ve reflejado en la siguiente ecuación. [4]

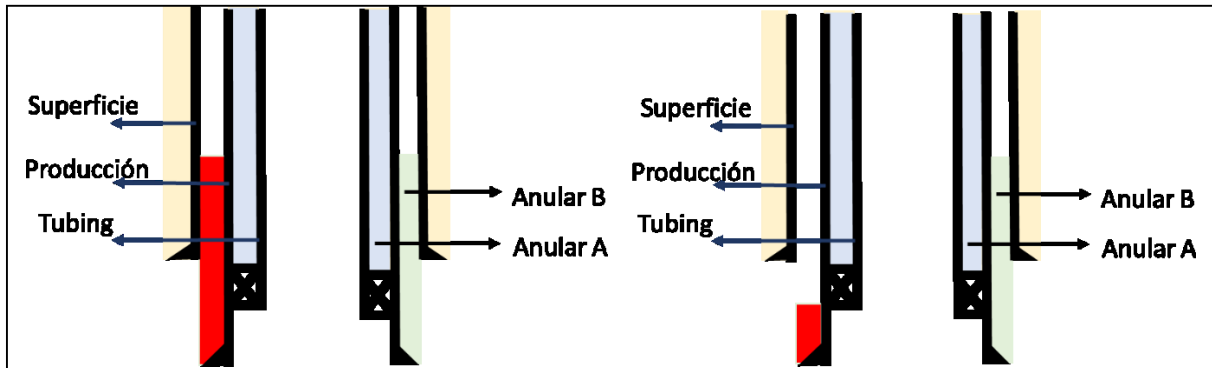
$$MAWOP = 0.8 * (TVDz[FG - MWG])$$

Para esto es necesario tener en cuenta el anular que se encuentra en la zona de interés (Formación Productora) y conocer hasta donde llega el tope del cemento de este anular. Como se

muestra en la **Figura 7**, el anular B está comprendido entre el casing de producción y el casing de superficie, como se observa en el estado mecánico de la izquierda de la **Figura 7**, el tope del cemento se encuentra por encima del zapato del casing de superficie, por tal motivo, el cemento no permite que el fluido que se encuentra dentro del anular este expuesto a la formación; caso contrario al estado mecánico de la derecha de la **Figura 7**, donde se observa que el tope del cemento no llega ni sobrepasa al zapato del casing de superficie, de esta forma, el fluido que está dentro del anular estará expuesto a la formación y en ese momento se calcula el MAWOP para resistencia a la formación.

Figura 7.

MAWOP resistencia a la formación

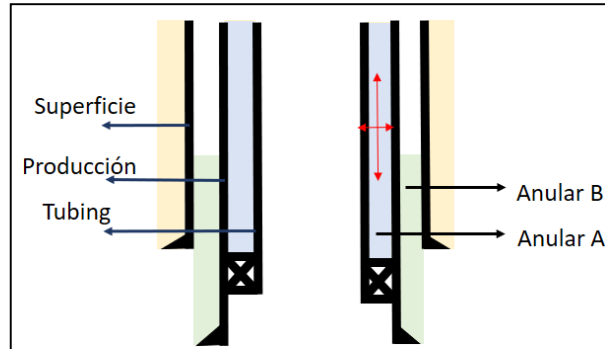


Nota. La figura representa los estados mecánicos donde se puede calcular el MAWOP a la formación.

El método de SDM plantea el cálculo del MAWOP para cada sección dentro del anular y se evalúa los revestimientos que componen un anular. Para los siguientes cálculos tomaremos como referencia Pozo AN representado en la **Figura 8**.

Figura 8.

Estado Mecánico Pozo AN



Nota. La figura representa el estado mecánico del pozo AN.

En el Pozo AN se calcula el MAWOP para el anular A de la siguiente forma:

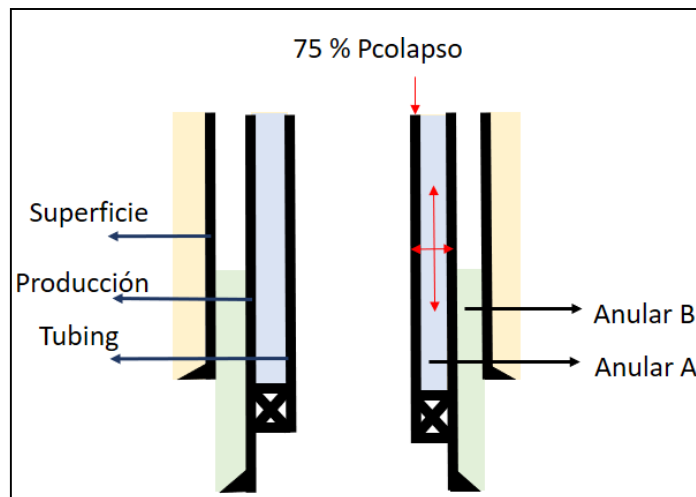
Para la tubería interna al anular que se está evaluando se calcula de la siguiente manera: [4]

$$MAWOP = 0.75 * P_{ci}$$

Como se representa en la **Figura 9**, para el anular A del pozo AN, se tiene en cuenta, que la tubería más interna de este anular va a tender a colapsarse por tal motivo, la norma API RP 90-2 de 2016 le evalúa el 75 % de la presión de colapso de la tubería más interna como se evidencia en la **Figura 9**.

Figura 9.

Presión de colapso para el anular A del pozo AN.



Nota. La figura representa la tubería donde se calcula el colapso para el anular A del pozo AN.

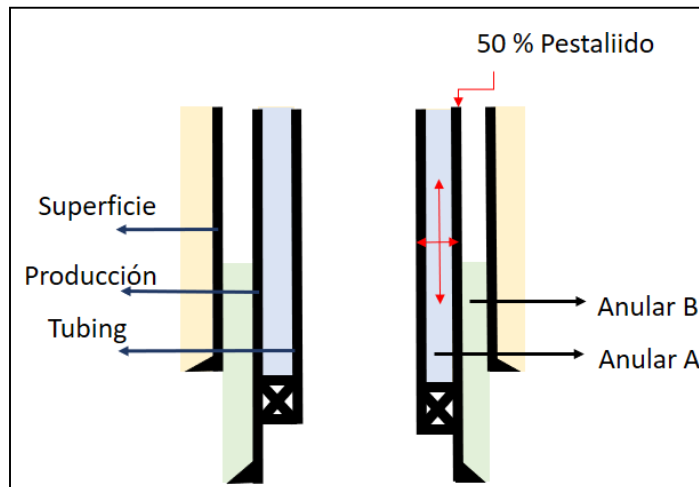
Para la tubería del anular que se está evaluando su MAWOP es calculado con la siguiente ecuación: [4]

$$MAWOP = 0.5 * P_{yev}$$

En la **Figura 10**, para el anular A es necesario conocer el estallido de la siguiente tubería que compone al anular (Casing Producción), por tal motivo la norma API RP 90-2 recomienda calcular el 50% de presión de estallido de esta tubería.

Figura 10.

Presión de estallido del anular A para el pozo AN



Nota. La figura representa la tubería que se le calcula el colapso para el anular A.

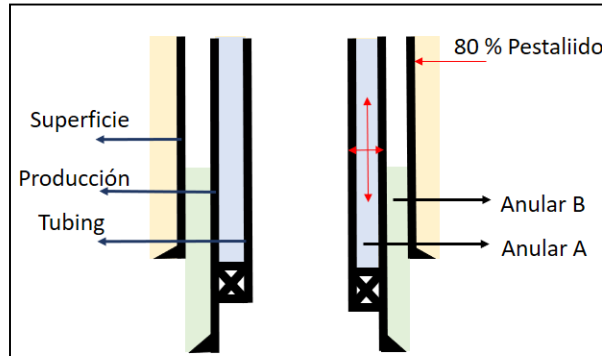
Para la tubería externa del anular que se está evaluando su ecuación se determina de la siguiente manera: [4]

$$MAWOP = 0.8 * P_{ye}$$

En la **Figura 11**, se observa como la norma API RP 90-2 de 2016 considera que si la tubería (Casing Producción) externa del anular A se estalla, considera el 80% presión estallido de la siguiente tubería (Casing Superficie).

Figura 11.

Presión de estallido a la tubería externa del anular A del pozo AN



Nota. La figura representa el cálculo para la tubería externa al anular A.

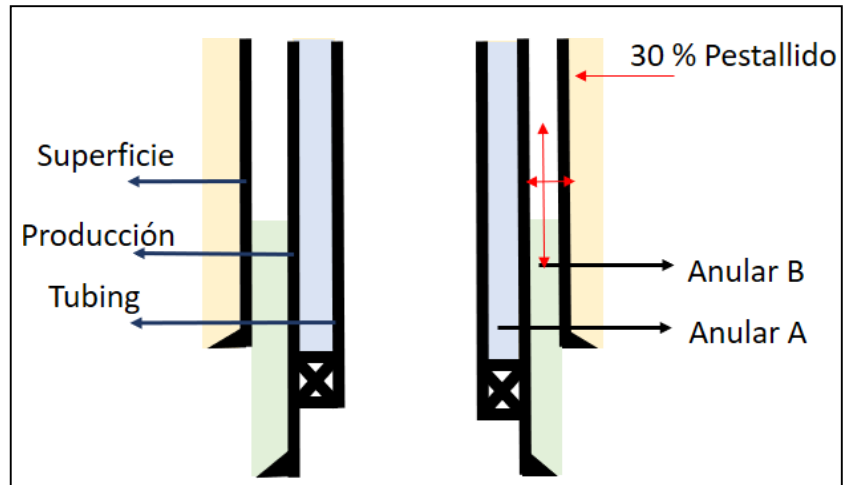
Las ecuaciones anteriores me determinaron el MAWOP para los anulares internos, el anular externo se determina de manera diferente, puesto que, este anular solo está expuesto a dos tuberías. A continuación, se mostrará cómo se determina el MAWOP para el anular externo del pozo. [4]

$$MAWOP = 0.3 * P_{ysup}$$

Se tiene en cuenta que el anular que esta entre el casing de superficie y algún otro casing, es el anular más externo del pozo, por este motivo el casing de superficie no tendrá otra barrera más que el cemento si este llega a estallarse, debido a esto, la norma API RP 90-2 de 2016 recomienda calcularle el 30% del estallido al casing de superficie para saber hasta qué punto el pozo empieza a ver integridad como se muestra en la **Figura 12.**

Figura 12.

Presión de estallido para el anular B del pozo AN



Nota. La figura representa para que tubería se calcula el MAWOP al estallido.

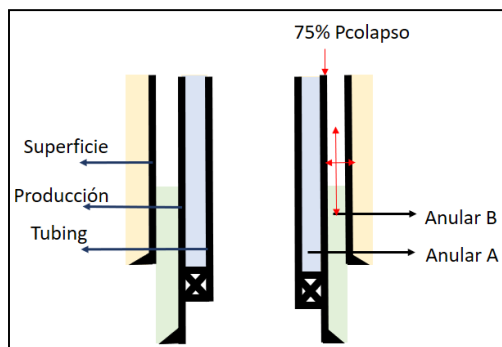
En la siguiente ecuación se tiene en cuenta la presión de colapso del revestimiento interno al de superficie. [4]

$$MAWOP = 0.75 * P_{cis}$$

Para el anular B como se observa en la **Figura 13**, está comprendido entre el casing de producción y el casing de superficie, como anteriormente se había mencionado la tubería más interna del anular va intentar colapsarse por esto se le calcula el 75% de la presión de colapso del casing de producción.

Figura 13.

Presión de colapso para el anular B del pozo AN



Nota. La figura representa para que tubería se calcula el MAWOP al colapso.

Como se explicaba anteriormente este método tiene en cuenta el MAWOP para el cabezal; por ello, para evaluar la máxima presión que se puede presentar en el cabezal se determinó la siguiente ecuación. [4]

$$MAWOP = 0.8 * P_w$$

En un pozo donde se coloque tubing normalmente estos traen elementos de completamiento, la norma tiene en cuenta la presión que pueden aguantar estos elementos por esto para calcular el MAWOP de cada elemento es evaluado de la siguiente manera: [4]

$$MAWOOP = 0.8 * (P_{cc} - \Delta P_{cc})$$

Para calcular el ΔP_{cc} se tienen en cuenta la presión hidrostática del fluido que se encuentra dentro del tubing y la presión hidrostática que se encuentra debajo del elemento de completamiento, en la siguiente ecuación se expondrá más a detalle. [4]

$$\Delta P_{cc} = P_{htubing} - P_{hdebajodelcomponente}$$

$$P_{encima\ del\ componente} = 0,052 * p_{salmuera\ o\ fluido\ de\ completamiento} * TVD$$

$$P_{debajo\ del\ componente} = p_{yacimiento} - (0,052 * p_{oil} * \Delta TVD)$$

$$\Delta TVD = TVD_{pyacimiento} - TVD_{donde\ se\ encuentre\ el\ elemento}$$

2.1.2.c.Método Explicit De-rating Method (EDM). El método EDM considera el porcentaje de desgaste en el espesor de la pared del tubing dentro del espacio anular por defecto de fuerzas elásticas de compresión o desgasta, esto lo hace el método más exacto, adicionalmente requiere de una información detallada y actualizada del pozo y se apoya en registros como el caliper, ultrasónico, electromagnéticos, con el fin de obtener una medida de desgaste.

El cálculo del MAWOP se realiza en la zona en donde se registra mayor desgaste del espesor, o en el peor caso que se encuentre y se ajusta el valor de la presión mínima de colapso y estallido. Para esto se lleva acabo el siguiente procedimiento. Para el cálculo del MIYPadj se tiene en cuenta la tubería externa a la que se está evaluando, y este cálculo se realiza de la siguiente manera [4]

$$MIYP_{adj} = (MIYP * U_{fb}) - \Delta P_{wcb}$$

Por consiguiente, se realizó un diferencial de presión reflejado en la siguiente ecuación [4]

$$\Delta P_{wcb} = P_{hinside} - P_{houtside}$$

$$\Delta P_{wcb} = (0,052 * P_{anularinterno} * TVD) - (0,052 * P_{anularexterno} * TVD)$$

Después de ello, se determinará un valor de colapso mínimo, este es determinado a la tubería interna o evaluada, se determina como se muestra en la siguiente ecuación: [4]

$$MCP_{adj} = (MCP * U_{fc}) - \Delta P_{wc}$$

La ecuación para el cálculo de ΔP_{wcc} se obtiene de la misma forma que la de ΔP_{wcb} .

Cuando se corre un registro electromagnético es posible conocer el U_{fb} y U_{fc} de todas las tuberías y cuando es un sónico o calíper solo es posible conocer este factor por la tubería donde se corrió el registro.

2.2. Diseño de la herramienta digital MW-PIPEDRIVE mediante lenguaje de programación (Visual Basic)

La herramienta digital MW-PIPEDRIVE determinará los parámetros para el cálculo del **MAWOP** en pozos onshore según la norma **API RP 90-2 de 2016**, la cual se diseñará mediante lenguaje de programación y esquemas algorítmicos que determinan la plataforma Visual Basic.

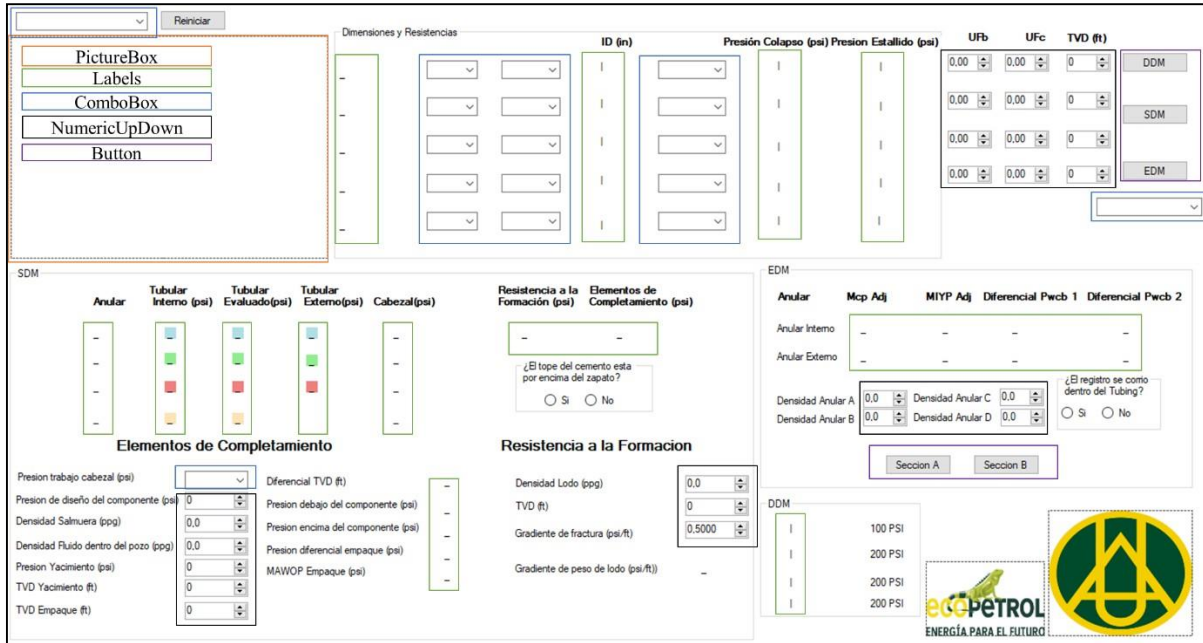
Para el diseño de esta, fue necesario diseñar una interfaz, y acomodar cada método en un espacio. Por tal motivo fue necesario por medio de un `ComboBox1` iniciar el funcionamiento de esta por medio de una lista desplegable y un `PictureBox1` para que esta misma pudiera mostrar los estados mecánico que el usuario escoja.

Para la reproducción de la herramienta fue necesario por medio de `ComboBox` generar listas desplegables donde el usuario pueda escoger las especificaciones de la tubería, y presión de trabajo del cabezal como se presenta en la **Figura 14**. Además, se adicionaron `NumericUpDown` donde el usuario podrá digitar los valores específicos del pozo como lo son presión de diseño del componente, densidad de la salmuera, densidad del fluido dentro del pozo, presión de yacimiento, TVD yacimiento, TVD empaque, densidad del lodo, gradiente de fractura, el factor de desgaste de las tuberías y las densidades de los fluidos que se encuentran dentro de los anulares.

Sin embargo, fue necesario disponer de `Labels` donde la herramienta dispondrá de estos para arrojar los resultados de todos los cálculos como se refleja en la **Figura 14**.

Figura 14.

Interfaz de la herramienta MW PIPEDRIVE.



Nota. La figura representa la interfaz de la herramienta con los elementos que esta contiene. Para el desarrollo del proyecto se requiere de esquemas básicos que tienen cierta secuencia. Los esquemas se denominarán: datos de entrada, análisis operacional, ejecución de algoritmos y por último datos de salida.

2.2.1. Clasificación de variables de entrada y salida

Ahora bien, es fundamental identificar los datos requeridos para ser ingresados en la interfaz de entrada de la herramienta, para que, una vez integrados, la herramienta esté en capacidad de realizar los cálculos de diseño correspondiente de acuerdo con la programación generada. De la misma forma, es preciso determinar los datos o variables de salida, que serán tomados como los parámetros del acumulador a diseñar. La clasificación de las variables de entrada y salida se presenta en la **Figura 15.**

Figura 15.

Datos de entrada

Dimensiones y Resistencias		ID (in)	Presión Colapso (psi)	Presión Estallido (psi)
Tubing	OD PESO		GRADO	
Producción	OD PESO		GRADO	
Superficie	OD PESO		GRADO	

Nota. Esta figura representa los datos de entrada que deben ser registrados por el usuario para dar inicio a la ejecución.

En la figura anterior se puede observar las variables entrada que utiliza la herramienta para el cálculo del **MAWOP** para cada uno de los tres métodos. Lo primero será escoger el estado mecánico del pozo y con esto se desplegará cuadro con la cantidad de tubería que tenga el estado mecánico para que el usuario ingrese los datos (Diámetro externo, Peso, Grado) de cada tubería para conocer su presión de estallido y colapso. Los datos de entrada están dispuestos de manera que se pueda proporcionar por el operador o en su defecto toma en cuenta sugerencias para las variables que pueden llegar a ser consideradas constantes por defecto de diseño de tubulares o de anulares antes prescritos por el diseño de los mismos.

Así mismo se solicitan los datos de entradas solicitados por la norma **API RP 90-2 del 2016** los cuales hacen referencia a los estándares necesarios para cumplir la normativa y los rangos operacionales sobre los cuales se tomaran decisiones con respecto a los resultados obtenidos por la herramienta. Los que determinan la operatividad optima de los anulares mediante el cálculo del **MAWOP** para cada uno de los anulares.

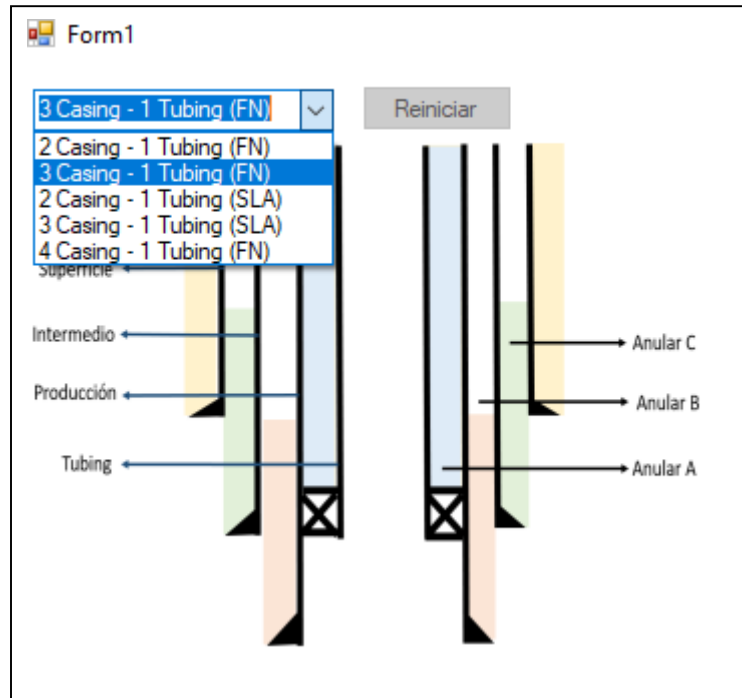
De esta manera se determina las variables de salida de la herramienta digital, que resume el resultado del cálculo del **MAWOP** para el anular o conjunto de anulares evaluados como se muestra en él.

2.2.2. Entrada de datos

Lo primero que se solicita es escoger la cantidad de revestimiento que contiene el pozo por medio de una lista desplegable que dará como resultado la imagen del estado mecánico escogido por el usuario. Como se muestra en la siguiente **Figura 16.**

Figura 16.

Lista desplegable para estado mecánico



Nota. Esta figura representa la lista desplegable que el usuario debe escoger según el pozo que va a entrar en estudio.

Una vez escogido el estado mecánico, se procede a ingresar las especificaciones de cada revestimiento o tubing por medio de listas desplegables, teniendo en cuenta los revestimientos o tubing escogidos en el estado mecánico se tendrá que dar especificación para cada uno de esto, al usuario ingresar estos valores se podrá saber su Presión de Estallido y Presión de Colapso, como se muestra en la **Figura 17.**

Figura 17.

Dimensiones y resistencias

Dimensiones y Resistencias		ID (in)		Presión Colapso (psi)	Presion Estallido (psi)	
Tubing	1 5/8	2.4	1.38	C-90	13900	13280
Producción	5	15	4.408	L-80	7250	8290
Intermedio	5 1/2	15.5	4.95	K-55	4040	4800
Superficie	5 5/8	26.7		GRADO		

Nota. Esta figura representa la tabla de especificaciones que tiene cada una de las tuberías del pozo que se está evaluando.

Lo anterior, es un procedimiento que se debe realizar para los (3) método. A continuación, se dará detalle de los datos de entrada que se necesitan según sea el método.

- Método SDM

Para el método SDM, al momento de calcular el MAWOP para el cabezal el usuario tendrá que desplegar una lista donde se encuentra las presiones de trabajo de cabezal más comunes, como se ve en la **Figura 18.**

Figura 18.

Presiones trabajo del cabezal

Presion trabajo cabezal (psi)	<input type="text"/>
Presion de diseño del componente (psi)	2000
Densidad Salmuera (ppg)	3000
Densidad Fluido dentro del pozo (ppg)	5000
	10000
	15000
Presion Yacimiento (psi)	0
TVD Yacimiento (ft)	0

Nota. Esta figura muestra la lista desplegable de las presiones de trabajo de cabezal más comunes.

Y para los elementos de completamiento el usuario tendrá que digitar la presión de diseño del componente, la densidad de la salmuera o fluido de completamiento que se encuentra en el tubing, presión de yacimiento, la densidad del fluido dentro del pozo, la TVD a la que se encuentra el yacimiento y el empaque. Como se muestra en la **Figura 19**.

Figura 19.

Datos de entrada MAWOP elemento de completamiento

Presion de diseño del componente (psi)	0
Densidad Salmuera (ppg)	0,0
Densidad Fluido dentro del pozo (ppg)	0,0
Presion Yacimiento (psi)	0
TVD Yacimiento (ft)	0
TVD Empaque (ft)	0

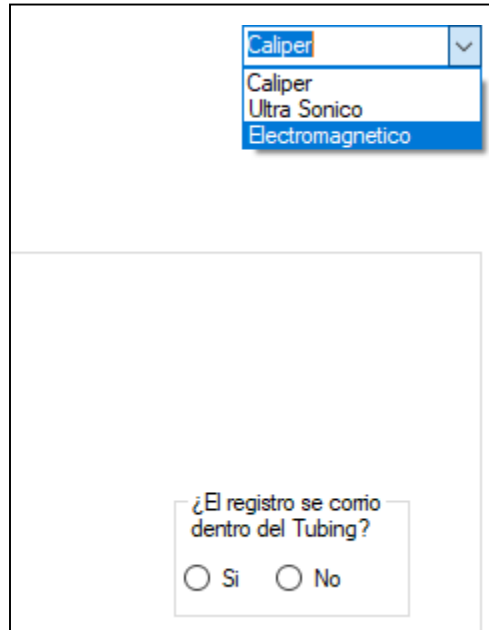
Nota. Esta figura representa los datos de entrada que el usuario debe ingresar para realizar el cálculo del MAWOP del elemento de completamiento.

- Método EDM

Para el método EDM, este es utilizado cuando en el pozo se corren registros eléctricos, para así tener valores más exactos acerca del estado en el que se encuentra la tubería, y el peor caso, donde la tubería está más desgasta con ellos, se podrá saber la profundidad donde es el peor caso y el factor de desgaste en ese punto que tiene la tubería. En este método es necesario que el usuario especifique que tipo de registró se corrió dentro del pozo por medio de una lista desplegable y responder la pregunta “¿el registro se corrió dentro del tubing?”, como se representa en la **Figura 20**.

Figura 20.

Lista desplegable de registros eléctricos



The image shows a software interface with a dropdown menu. The dropdown is currently open, showing three options: 'Caliper', 'Ultra Sonico', and 'Electromagnetico'. The 'Caliper' option is selected. Below the dropdown, there is a question in Spanish: '¿El registro se corio dentro del Tubing?'. There are two radio buttons below the question, labeled 'Si' and 'No', both of which are currently unselected.

Nota. Esta figura representa la lista desplegable de los registros eléctricos que se pueden correr en un pozo para conocer el Ufc y Ufb

Luego de conocer los pasos anteriores, la herramienta estipulará la cantidad de anulares a los que se le podrá calcular el MAWOP, el usuario debe digitar las densidades de cada anular solicitados por la herramienta, el factor de desgaste por estallido (Ufb) y el factor de desgaste por colapso (Ufc) que tienen un valor desde el 1 al 100%, y el TVD en donde el factor de desgaste es más representativo. En la **Figura 21**, se mostrará como el usuario debe digitar las densidades según sea el caso.

Figura 21.

Densidades de los anulares.

Anular	Mcp Adj	MIYP Adj	Diferencial Pwcb 1	Diferencial Pwcb 2
Anular Interno	0	0	0	0
Anular Externo	0	0	0	0

Densidad Anular A: 0,0
 Densidad Anular B: 0,0
 Densidad Anular C: 0,0
 Densidad Anular D: 0,0

¿El registro se corio dentro del Tubing?
 Si No

Seccion A Seccion B

Nota. Esta figura representa el espacio donde el usuario debe digitar la densidad de cada anular para el pozo a evaluar.

Teniendo en cuenta que falta digitar los factores de desgaste y TVD se verán reflejados al lado de la descripción de las tuberías que contenga el pozo como se muestra en la **Figura 22.**

Figura 22.

Factor de desgaste para el estallido y colapso

Dimensiones y Resistencias		ID (in)	Presión Colapso (psi)	Presion Estallido (psi)	UFb	UFc	TVD
Tubing	2 7/8	6,5	2.441	L-80	11160	10570	
Producción	5 1/2	17	4.892	P-110	7480	10640	0,00
Intermedio 1	10 3/4	55,5	9,76	P-110	5950	8860	0,00
Intermedio 2	13 3/8	68	12,415	K-55	1950	3450	0,00
Superficie	18 5/8	87,5	17,755	K-55	630	2250	

Nota. Esta figura representa el espacio donde el usuario debe digitar los factores de desgaste para las tuberías a las que el dato sea conocido.

2.2.3. Desarrollo de algoritmos y resultados de la herramienta MW-PIPEDRIVE

En esta sección se muestra el detalle del cuerpo principal de la herramienta digital. Acá, se desarrollarán todos los cálculos que permitirán calcular la máxima presión permitida en cabeza

de pozo. Debido a que su programación se da como una secuencia lógica y matemática en donde se verán reflejados (3) cálculos principales para el método SDM, y, (2) cálculos principales para el método EDM, los cuales se derivan de las dimensiones y resistencias de cada tubería presentada en el pozo a evaluar (Presión estallido y Presión de colapso)

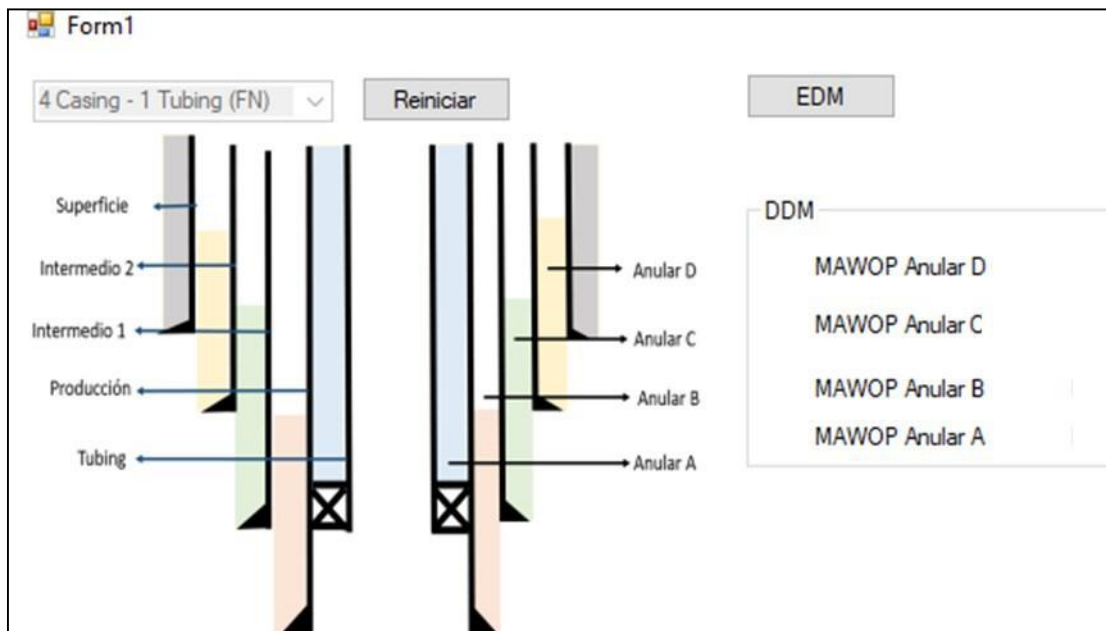
A continuación, se presentarán los cálculos y procedimientos necesarios para realizar el diseño de la herramienta con respecto a los datos de entrada nombrados anteriormente y el cálculo de las variables intermedias nombradas en el punto 2.1.2.

2.2.3.a. Método EDM. En esta sección se especifica el MAWOP de cada anular, teniendo en cuenta que para este método se asume un valor.

Para realizar la secuencia lógica de este método, es necesario haber escogido el estado mecánico del pozo para que este puede reflejar los valores según la cantidad de anulares que presente. En la **Figura 23** se evidencia la secuencia.

Figura 23.

Método EDM



Nota. Esta figura representa como se ve despliega el método DDM dependiendo el estado mecánico del pozo.

2.2.3.b. Método SDM. Para el cálculo del MAWOP por este método, es esencial tener la presión de estallido y colapso, estas se obtienen al momento que el usuario da las especificaciones de la tubería. Estas presiones deben ser consignado en el funcionamiento de la reproducción de

este método. Por lo tanto, la herramienta calcula el MAWOP de cada anular dependiendo la cantidad de anulares que presenta, y la posición en la que se encuentran los anulares como se determinó en la sección anterior.

La casilla que lleva como nombre Tubular Evaluado es la tubería que se encuentra en el medio de dos anulares; la siguiente casilla nombrada como Tubular interno es la tubería interna de la casilla nombra anteriormente, y por último la casilla Tubular externo es la tubería externa a él tubular evaluado. Para reproducir este método es necesario el uso de un botón que reciba una secuencia lógica de la presión de estallido y colapso y calcule el MAWOP para cada anular. Igualmente, se calcular el MAWOP para el cabezal con el dato de entrada explicado anteriormente. En la **Figura 24** se muestra las casillas que tendrá que calcular la herramienta una vez tenga los datos necesarios.

Figura 24.

Método SDM

SDM				
Anular	Tubular Interno (psi)	Tubular a Evaluado (psi)	Tubular Externo (psi)	Cabezal (psi)
Anular A				-
Anular C				-
Anular B				-
Anular D				-

Nota. Esta figura representa el espacio que la secuencia algorítmica debe completar para este método.

Seguido de esto es necesario conocer si el pozo produce por Flujo Natural O Levantamiento Artificial. Asumiendo que es Flujo Natural, el pozo va a tener cualquier elemento de completamiento al que se le tendrá que calcular un MAWOP para este. La herramienta tendrá la secuencia de calcular este valor una vez el usuario haya completo los datos de entrada necesarios para este proceso. Si la tubería que está en la formación productora se encuentra expuesta a la formación se tendrá que calcular un MAWOP para esta, por ello, la herramienta después de

analizado los datos ingresados por el usuario tiene la capacidad de dar el resultado para este cálculo. En la **Figura 25** se verá el detalle de lo nombrado anteriormente.

Figura 25.

Resistencia a la formación y Elementos de completamiento.

Resistencia a la Formación (psi)	Elementos de Completamiento (psi)
-	-

Nota. Esta figura representa el espacio que el algoritmo debe de completar una vez los datos de entrada sean digitados.

2.2.3.c. Método EDM. Como se explica anteriormente, para realizar este método es necesario que el usuario ingrese los datos de entrada nombrados en el capítulo anterior, para que así la herramienta por medio de un botón realice los cálculos enunciados en la sección 2.1.2. en la Figura 26 se representa los espacios que la herramienta debe calcular para dar los resultados de este método.

Figura 26.

Método EDM

EDM		
Anular	Mcp Adj	MIYP Adj
Anular Interno	0	0
Anular Externo	0	0

Nota. Esta figura representa el espacio que tiene la herramienta para desarrollar un algoritmo que calcule el método EDM.

2.2.3.d. Resultados de diseño de la herramienta MW-PIPEDRIVE. Como procedimiento final, es obligatorio que la herramienta para los dos segundos métodos (SDM Y EDM) escoja el

menor valor calculado, puesto que este será el MAWOP representativo del pozo a evaluar.

2.3. Reproducción de escenarios propuesto en la norma API RP 90-2 de 2016 para la validación de la herramienta digital MW-PIPEDRIVE.

Cuando la herramienta digital MW-PIPEDRIVE este programa es necesario entrar en una fase de validación para comprobar su funcionamiento. Para empezar con la validación se verifica con (1) escenario que plantea la norma **API RP 90-2 de 2016** donde se describe:

Los grados de la tubería de revestimiento, diámetros (interno y externo) de la tubería de revestimiento, densidad del fluido que está presente en cada anular, TVD a la que se encuentra cada revestimiento, la presión de estallido y la presión de colapso.

En la norma **API RP 90-2 de 2016**, el mismo caso es evaluado por cada método descrito por la misma. Para el SDM se evalúa solamente el MAWOP para el anular A, y para el elemento de completamiento, y para el método EDM evalúa el MAWOP para el anular B teniendo en cuenta que la norma describe las presiones de colapso y estallido para cada tubería que tiene el pozo de esta.

Lo más importante de la validación de la herramienta digital MW-PIPEDRIVE, es ingresar los datos como lo realiza la norma **API RP 90-2 de 2016**, donde especifica cómo se realiza el cálculo para cada escenario. Cuando se realiza el ingreso de los datos y se efectúe la reproducción de la macro de la herramienta digital MW-PIPEDRIVE se obtendrá los resultados más cercanos a la norma específica. A continuación, mostraremos las condiciones del escenario según la norma en la **Tabla 1**.

Tabla 1.

Condiciones escenario implementado por la norma

Well Data		Fluid Density ppg	Depth TVD, ft	Yield psig	Collapse psig
Tubing	2 7/8 in., 6.5 #, L-80	2.6(whilw flowing)	9000	10,570	11,160
"A" annulus		13.0			
Production casing	5 1/2in., 17#, P-110		10000	10,640	7480
"B" annulus		12.0			
Intermediate casing 1	10 3/4in., 55.5#, P- 110		5000	8860	5950

Tabla 1. *Continuación*

"C" annulus		10.0			
Intermediate casing 2	13 3/8in., 68#, K-55		1000	3450	1950
"D" annulus		9.0			
Surface Casing	18 5/8in., 87.5#, k- 55		500	2250	630

Nota. Esta tabla representa las condiciones que la norma estipula para el escenario a evaluar.

2.3.1. Comparación de resultados de la herramienta con los estipulados en la norma API RP 90-2

Una vez los datos de cada escenario descrito por la norma API RP 90-2 de 2016 sean ingresados a la herramienta, esta arroja un resultado, mostrando así el MAWOP determinado para cada anular.

Cuando los resultados de la herramienta MW-PIPEDRIVE sean enseñados, se confrontará la exactitud de los datos de salida con respecto a los estipulados en la norma base de este proyecto. Se procede entonces a calcular la desviación del resultado con el teórico, y de este modo se comprueba el correcto funcionamiento de la herramienta MW-PIPEDRIVE como fuente de cálculos para determinar el MAWOP de cada anular que contiene un pozo. Para establecer su funcionamiento se busca que el error en cada MAWOP del anular sea menor al cinco por ciento (5%) siempre y cuando el pozo no tenga un historial de falta de integridad alto, se infiere que este tipo de pozo tendrá que ser sometido a un análisis más profundo para determinar su MAWOP.

2.4. Validación de tres (3) casos reales aplicando la herramienta MW-PIPEDRIVE

Como resultado final de este trabajo, se realizará la aplicación del siguiente tres (3) escenarios operativos determinados por la empresa ECOPETROL S.A. utilizando la herramienta AC-GLOR. Para ello, se introducirá en la herramienta MW-PIPEDRIVE los datos presentados en la **Tabla 2** de pozos reales en operación y se procede a ejecutar el MAWOP de cada uno de estos dependiendo la cantidad de anular que estos tengan. Una vez se tengan los datos de salida por la herramienta (MAWOP de cada anular, MAWOP cabezal, MAWOP elementos de completamiento, MAWOP formación) se verificará la verdadera situación de cada pozo a analizar.

Tabla 2.*Información técnica de los pozos reales*

INFORMACION TÉCNICA POZO A							
Revestimiento	Diámetro (in)	Peso (lb/ft)	Grado	Tope (ft)	Zapato (ft)	Presión de Colapso (Psi)	Presión de Estallido (Psi)
Casing de Superficie	9 5/8"	40	J55	0	609	2570	3950
Casing de Producción	6 5/8"	24	N80	0	29,19	5760	7440
	6 5/8"	20	J55	29,19	3542	2970	4180
	6 5/8"	24	N80	3542	5681	5760	7440
Tubing	2 7/8"	6.4	J55	0	2634	7680	7260
	2 7/8"	6.4	N80	2634	4472	11160	10570
	2 3/8"	4	J55	4472	5004	9980	9840
INFORMACION TÉCNICA POZO B							
Revestimiento	Diámetro (in)	Peso (lb/ft)	Grado	Tope (ft)	Zapato (ft)	Presión de Colapso (Psi)	Presión de Estallido (Psi)
Casing de Superficie	9,625	32,3	H-40	18	1503	1370	2270
Intermedio	7	26	N-80	18	6874	5410	7240
PKR R3						5000	
Tubería de producción	2 7/8	6 1/2	N-80	18	6491	11160	10570
INFORMACION TÉCNICA POZO C							
Revestimiento	Diámetro (in)	Peso (lb/ft)	Grado	Tope (ft)	Zapato (ft)	Presión de Colapso (Psi)	Presión de Estallido (Psi)
Casing 9-5/8"	9,625	43,5	N80	0	8023	3810	6330
Casing 7"	7	29	P110	0	8023	8510	11220
Tubing 3-1/2"	3,5	9,3	N80	25	1024	10530	10160

Nota. Esta tabla representa las condiciones de los pozos reales suministrado por ECOPETROL S.A.

En base a lo anterior, se realizan dos procesos. Primero es verificar si el pozo se encuentra en los escenarios descritos por la norma API RP 90-2, y el segundo, si no cumple, analizar y sugerir un método donde al pozo se le pueda determinar su MAWOP para no perder la integridad del pozo.

3. RESULTADO Y ANALISIS

Este trabajo de investigación es guiado por la metodología y los datos nombrados en el capítulo anterior. Una vez que la herramienta para el cálculo del MAWOP MW-PIPEDRIVE es programada, comienza la etapa de verificación. Esta fase se inicia con la comparación de los resultados obtenidos en la herramienta digital con los presentados en la norma API RP 90-2 de 2016. La norma define un escenario operativo realizado por tres métodos, con características específicas que se encuentran en la **Tabla 1**.

Adicionalmente, se implementa en la herramienta tres (3) escenarios reales. Para esto, se ilustra las condiciones operativas de cada uno de los pozos, se reproducen en la herramienta MW-PIPEDRIVE, y al obtener el resultado se verifica el cumplimiento de la norma en los pozos determinados. Con esto, se examina los resultados obtenidos y se presentan recomendaciones para que estos pozos cumplan con lo establecido por la norma API RP 90-2.

3.1. Verificación del funcionamiento de la herramienta MW-PIPEDRIVE

Para la etapa de verificación se digitaron en la herramienta MW-PIPEDRIVE, los datos de entrada estipulados en la norma que se muestran en la Tabla 1, con el fin, que los resultados arrojados por la herramienta digital no excedan un error del 5% respecto con la máxima presión permitida en cabeza de pozo. Una vez introducidos los datos, la herramienta realiza una secuencia lógica matemática, donde se calcula el MAWOP para cada anular evaluado, empaques o formaciones expuestas resultados que se ven reflejados en Figura 3, Así como los valores teóricos comparados con los valores calculados para cada uno de los métodos, se comienza con el método DDM.

Tabla 3.

Margen de error para MAWOP según los métodos del escenario de la norma.

MAWOP DDM (psi)	
"A" Anular Norma	200
"A" MW-PIPEDRIVE	200
ERROR	0%
"B" Anula Norma	200
"B" MW-PIPEDRIVE	200
ERROR	0%

Tabla 3. Continuación

"C" Anular Norma	200
"C" MW-PIPEDRIVE	200
ERROR	0%
"D" Anular Norma	100
"D"MW-PIPEDRIVE	100
ERROR	0%
MAWOP SDM (psi)	
"A" Anular Norma	
Tubular Interno Norma	8370
Tubular Interno MW-PIPEDRIVE	8370
ERROR	0%
Tubular Evaluado Norma	5320
Tubular Evaluado MW-PIPEDRIVE	5320
ERROR	0%
Tubular Externo Norma	7088
Tubular Externo MW-PIPEDRIVE	7088
ERROR	0%
Cabezal Norma	4000
Cabezal MW-PIPEDRIVE	4000
ERROR	0%
Empaque Norma	4500
Empaque MW-PIPEDRIVE	4505,6
ERROR	1%
MAWOP EDM (psi)	
"B" Anular interno Norma	
MIYP adj 10 3/4 Norma	6030
MIYP adj 10 3/4 MW-PIPEDRIVE	6034,08
ERROR	1%

Tabla 3. Continuación

MCP adj 5 1/2 Norma	5320
MCP adj 5 1/2 MW-PIPEDRIVE	5325,76
ERROR	1,00%
"B" Anular Externo Norma	
MIYP adj 13 3/8 Norma	3090
MIYP adj 13 3/8 MW-PIPEDRIVE	3087,5
ERROR	0,99%
MCP adj 10 3/4 Norma	5300
MCP adj 10 3/4 MW-PIPEDRIVE	5295,5
ERROR	0,99%

Nota. Esta tabla representa el margen de error global para el cálculo del MAWOP con la herramienta MW-PIPEDRIVE por los métodos DDM, SDM y EDM en comparación con los resultados de la norma API RP 92-1 del 2016.

En la tabla mostrada anteriormente, se evidencia los resultados obtenidos por la herramienta digital MW-PIPEDRIVE, al reproducir el escenario operativo que se encuentra en los ejemplos descritos en los anexos de la norma API RP 90-2 del 2016. Tabla en la cual se puede evidenciar los resultados del MAWOP para todos los anulares presentes en el pozo por el método en el caso del método DDM este análisis resulta de la asignación de presiones a los anulares; para el método SDM se evalúa únicamente el cálculo del MAWOP para el anular A tal cual como se describe en la norma y para el método EDM se evalúa solo el anular B. Además, se presenta un porcentaje de error el cual permite analizar la desviación que presentan los cálculos del MAWOP con la herramienta con relación a los presentados en la norma API RP 90-2 del 2016.

En primera instancia el funcionamiento de la herramienta es óptimo debido a que ningún error mostrado anteriormente supera el 5%, y teniendo en cuenta que el margen de error más alto es 1,001% encontrado por el método EDM. Esto se debe a que muestra una pequeña desviación que

tiene el cálculo del MIYPadj con un valor de 6030 a 6034,08 y MCPadj 5320 a 5325,76. Este margen de error se debe a que la herramienta no redondea cifras decimales, y en la norma API RP 90-2 de 2016 todos sus valores se llevan a un valor exacto.

Igualmente, en la **Tabla 4**, se muestra un resumen general del porcentaje de error que alcanzo la herramienta MW-PIPEDRIVE para cada uno de los cálculos por los tres métodos, adicionalmente se muestra el error global que presenta la herramienta durante la realización de la secuencia lógica para el cálculo del MAWOP con el escenario descrito en la norma API RP 90-2 del 2016-

Tabla 4.

Porcentaje de error global de la herramienta MW-PIPEDRIVE

	DDM	SDM	EDM
Promedio de Error	0%	0%	0,99%
Promedio de Error global herramienta MW-PIPEDRIVE			0,33%

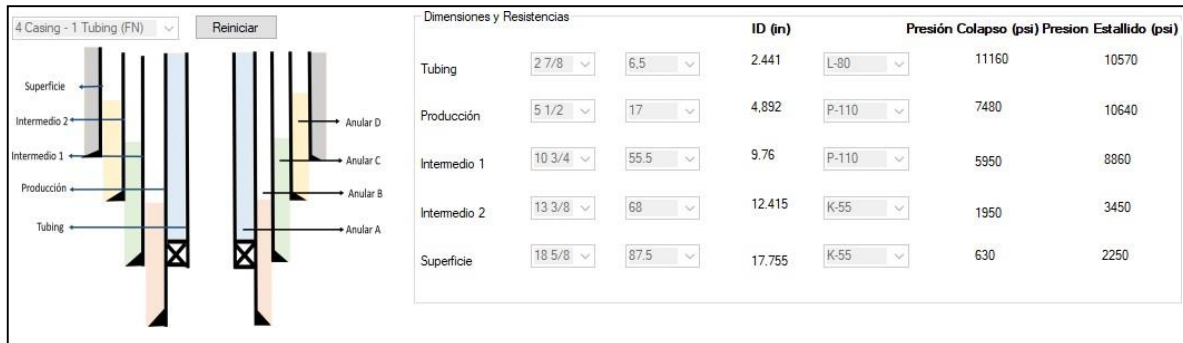
Nota. Esta tabla representa el porcentaje de error general que tiene la herramienta.

Según muestra la **Tabla 4** el error global de la herramienta no supera el 1%, deduciéndose que esta tiene un buen funcionamiento para calcular el escenario operativo indicado en la norma API RP 90-2 de 2016. Para la siguiente parte del proyecto de investigación se realiza un análisis detallado para cada uno de los métodos (DDM, SDM Y DDM) y con esto verificar cada resultado y que variables generan un porcentaje de error.

Para dar inicio a la reproducción de los tres escenarios en primera instancia se debe escoger el estado mecánico del pozo el cual corresponde por indicaciones de la norma, a un pozo con cuatro casing y un tubing, luego ingresar las dimensiones (Diámetro externo, peso y grado) de cada tubería de revestimiento como se indica en la **Tabla 1**. En la **Figura 27** se refleja el estado mecánico, la presión de colapso y estallido calculados.

Figura 27.

Estado mecánico Norma API RP 90-2



Nota. Esta figura representa el estado mecánico y las presiones de colapso y estallido de la tubería de revestimiento del escenario operativo de la norma.

3.1.1. Análisis método SDM para el cálculo del MAWOP

Para este método se valida el cálculo del MAWOP en el escenario operativo descrito en la norma, donde sus componentes y especificaciones son presentadas en la **Tabla 1**, sumado a los parámetros de la presión del cabezal y descripciones del elemento de completamiento en la **Tabla 5**. Los resultados obtenidos por la herramienta MW-PIPEDRIVE se muestran a continuación en la **Figura 28**.

Tabla 5.

Especificaciones cabezal y elemento de completamiento

Presión de trabajo del cabezal(psi)	5000
Presión de trabajo del componente(psi)	10000
Densidad de salmuera(ppg)	13
Densidad del fluido dentro del pozo(ppg)	2,6
Presión de yacimiento	500

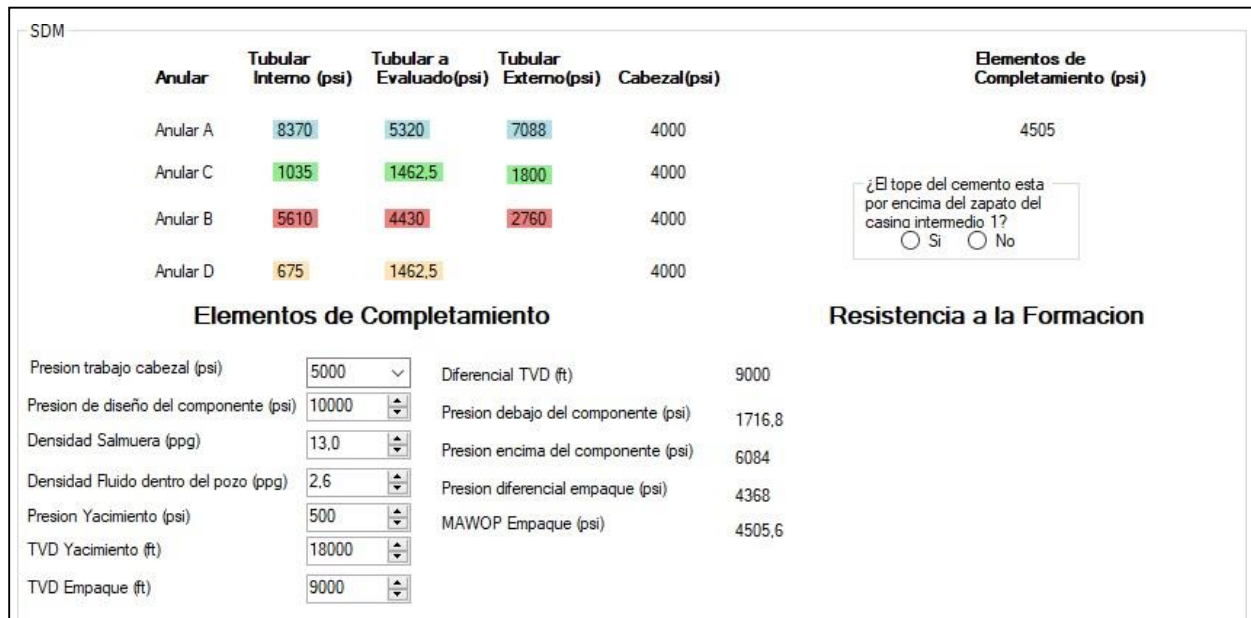
Tabla 5. Continuación

TVD Yacimiento	18000
TVD Empaque	9000

Nota. Esta tabla representa las especificaciones del escenario descrito por la norma.

Figura 28.

Resultados método SDM



Nota. Esta figura representa los resultados obtenidos para el método SDM según las especificaciones y características de la tabla 1.

Los datos de salida se obtienen de las ecuaciones de la sección 2.1.2 en la parte b. La norma solo calcula el MAWOP para el anular “A”, cabezal y elemento de completamiento, pero no calcula, a diferencia de la herramienta que reproduce el MAWOP para cada anular presentado en el pozo. Es decir que norma muestra un resumen de los cálculos del MAWOP mientras que la herramienta MW-PIPEDRIVE muestra todos los cálculos de MAWOP posibles para el pozo. Una vez estos datos han sido ingresados a la herramienta MW-PIPEDRIVE se observa los siguientes resultados para cada anular.

Tabla 6.

Resultados de la herramienta MW-PIPEDRIVE Para el anular “A” método SDM

MAWOP SDM (psi)	
“A” Anular Norma	
Tubular Interno MW-PIPEDRIVE	8370
ERROR	0%
Tubular Evaluado MW-PIPEDRIVE	5320
ERROR	0%
Tubular Externo MW-PIPEDRIVE	7088
ERROR	0%
Cabezal MW-PIPEDRIVE	4000
ERROR	0%
Empaque MW-PIPEDRIVE	4505
ERROR	0%

Nota. Esta tabla representa los resultados arrojados por la herramienta para el método SDM

Según los resultados descritos del método SDM en la norma API RP 90-2 en comparación por los obtenidos por la herramienta, es notable la exactitud del cálculo para el MAWOP del anular “A” tal que el porcentaje de error es del 0%. Adicionalmente en la **Tabla 7** se evidencian los resultados arrojados por la herramienta para los demás anulares, pero estos no pueden ser comparados con un valor técnico debido a que la norma solo tiene en cuenta el anular “A”, y presenta el cálculo del MAWOP exclusivamente para el anular “A” por el método SDM

Tabla 7.

Resultados MAWOP con el método SDM

MAWOP SDM (psi)	
"A" Anular Norma	
Tubular Interno MW-PIPEDRIVE	5610
Tubular Evaluado MW-PIPEDRIVE	4430
Tubular Externo MW-PIPEDRIVE	2760
"B" Anular Norma	
Tubular Interno MW-PIPEDRIVE	1035
Tubular Evaluado MW-PIPEDRIVE	1462,5

Tabla 7. Continuación

Tubular Externo MW-PIPEDRIVE	1800
"C" Anular Norma	
Tubular superficie MW-PIPEDRIVE	5610
Tubular intermedio 2 MW-PIPEDRIVE	4430

Nota. Esta tabla representa los resultados arrojados por la herramienta para el anular “B”, “C” Y “D” según el método SDM

3.1.2. Análisis método EDM para el cálculo del MAWOP

Este método reprodujo un escenario operativo con los datos de entrada descritos en la Tabla 1 propuesto en la norma API RP 90-2 del 2016. Adicional a estos es necesario conocer el factor de desgaste para las tuberías. El factor de desgaste está delimitado por el desgaste de la tubería por estallido y el desgaste por colapso, el desgaste para el estallido (U_{fb}) es de 0,91 y para el colapso (U_{fc}) es de 0,89, valores que se introdujeron en la herramienta manualmente. Los resultados calculados por la herramienta MW-PIPEDRIVE para el anular “B” en respuesta a la información suministrada se presentan en el la **Figura 29**. La norma del 2016 solo calcula el MAWOP para el anular “B”.

Figura 29.

Resultado MAWOP método EDM

Anular	Mcp Adj	MIYP Adj	Diferencial Pwcb 1	Diferencial Pwcb 2
Anular Interno	5325,76	6034,08	520	0
Anular Externo	5295,5	3087,5	52	0

Densidad Anular A	0,0	Densidad Anular C	10,0
Densidad Anular B	12,0	Densidad Anular D	9,0

¿El registro se como dentro del Tubing?
 Si No

Seccion A Seccion B

Nota. Esta figura representa los resultados obtenidos por el método EDM para el anular “B”

Como se muestra en la figura anterior los datos de entrada para este método son las densidades de los fluidos que están alrededor del anular que se está evaluando. En este caso el registro eléctrico se corre en la tubería de producción por lo que la norma contempla el cálculo solo para el anular “B”. Es necesario digitar los factores de desgaste y los TVD de cada tubería de revestimiento descrito en la **Tabla 1** como se muestra en la **Figura 30**.

Figura 30.

Datos Ufb, Ufc y TVD para el método EDM

Dimensiones y Resistencias		ID (in)	Presión Colapso (psi)	Presión Estallido (psi)	Ufb	Ufc	TVD
Tubing	2 7/8	6.5	2.441	L-80	11160	10570	
Producción	5 1/2	17	4.892	P-110	7480	10640	0.89, 10000
Intermedio 1	10 3/4	55.5	9.76	P-110	5950	8860	0.91, 5000
Intermedio 2	13 3/8	68	12.415	K-55	1950	3450	0.91, 1000
Superficie	18 5/8	87.5	17.755	K-55	630	2250	

Nota. Esta figura representa los datos ingresados a la herramienta según los descriptos por la norma.

Para este método el cálculo del MCPadj es simulado en el peor de los casos según la norma, esto sucede cuando la tubería se encuentre libre por lo tanto el diferencial $P_{wcb}=0$. Esto se logra cuando el fluido que se encuentra dentro del anular tiene la misma densidad que el fluido fuera de él.

Los datos de salida se obtienen de las ecuaciones de la sección 2.1.2 en la parte de c. La herramienta MW-PIPEDRIVE en este caso solo tendrá en cuenta los cálculos para el anular “B” como lo estipula norma puesto que por falta de datos no se permite calcular a demás anulares. En la **Tabla 8** se muestra los resultados obtenidos por la herramienta.

Tabla 8

Resultados MAWOP con el método EDM

MAWOP EDM (psi)	
"B" Anular Interno Norma	
MIYPadj 10 3/4 MW-PIPEDRIVE	6034,08
MCPadj 5 1/2 MW-PIPEDRIVE	5325,76
"B" Anular Externo Norma	

Tabla 8. Continuación

MIYPadj 13 3/8 MW-PIPEDRIVE	3087,5
MCPadj 10 3/4 MW-PIPEDRIVE	5295,5

Nota. Esta tabla representa los resultados arrojados por la herramienta para el anular “B”, según el método EDM

Como se muestra en la Tabla 3, en la sección correspondiente a los resultados obtenidos por el método EDM, se encontró un porcentaje de error del 1%, correspondiente al cálculo del MAWOP para el anular “A”, en sus componentes correspondientes al MIYP ajustado y MCP ajustado, esta diferencia entre los valores teóricos y reales calculados por la herramienta, es consecuencia del ajuste de decimales que realiza la norma API RP 90-2 del 2016, con relación a la capacidad de la herramienta MW-PIPEDRIVE la cual no redondea ni aproxima ningún decimal. Sin embargo, el porcentaje de error obtenido es inferior al 5%, con lo cual se valida el funcionamiento correcto de la herramienta digital en la reproducción del escenario propuesto por la norma API RP 90-2 del 2016 para el método EDM.

3.1.3. Análisis método DDM para el cálculo del MAWOP

Este método valida el escenario operativo con datos de entrada presentados en el **cuadro 1** propuesto en la norma API RP 90-2 del 2016. Los resultados calculados por la herramienta MW-PIPEDRIVE en respuesta a la información suministrada se presentan en la **Figura 31**.

Figura 31.

Resultados método DDM



Nota. Esta tabla representa los resultados obtenidos por la herramienta para el método DDM

A diferencia de los métodos anteriores este método asume valores para cada anular sin tener la necesidad de realizar algún cálculo. La única secuencia lógica que debe seguir la herramienta es dependiendo el estado mecánico que se escoja por el usuario, determinar la cantidad de anulares que tiene el pozo, para poder asignar valores de presión a los anulares.

Los valores de salida de la herramienta para el cálculo del MAWOP son exactamente iguales a los valores de salida de MAWOP presentados por la norma los cuales se evidencian en la **Tabla 9**. como explica la metodología en la sección 2.1.2. Para este método se realiza una asignación de valores (100 psi anular superficie y 100 psi para los demás) de esta manera los valores teóricos y calculados son idénticos y el margen de error es del 0%.

Tabla 9.

Resultados para el método DDM según la norma

Well Data		Well Data	
		Measured pressure psig	MAWOP psig
Tubing	2 7/8 in., 6.5 #, L-80	500 flowing	N/A
"A" Anular		240	200
Production casing	5 1/2 in., 17#, P-110		
"B" Anular		0	200
Intermediate casing 1	10 3/4 in., 55.5#, P-110		
"C" Anular		0	200
Intermediate casing 2	13 3/8 in., 68#, K-55		
"D" Anular		0	100
Surface Casing	18 5/8 in., 87.5#, k-55		

Nota. Esta tabla representa los resultados obtenidos por la norma API RP 90-2

Los datos de salida se explican en la sección 2.1.2. en la parte a. Para este método no se realiza ningún tipo de cálculo, por lo tanto, no se obtiene ningún porcentaje de error. En la **Tabla 10** se da a conocer los resultados obtenidos por la herramienta digital.

Tabla 10.*Resultados MAWOP con el método DDM*

MAWOP DDM (psi)	
"A" MW-PIPEDRIVE	200
"B" MW-PIPEDRIVE	200
"C" MW-PIPEDRIVE	200
"D" MW-PIPEDRIVE	100

Nota. Esta tabla representa los resultados obtenidos por la herramienta para el método DDM.

Para terminar esta sección se muestra el MAWOP para cada anular, teniendo en cuenta que para el anular "A" se calculó por el método SDM, el anular "B" se estableció por el método EDM y los demás anulares son determinados por el método DDM. Una vez calculados o establecidos los valores de MAWOP por cada anular, se establece como referencia el menor valor por anular de cada uno de los métodos. En la **Tabla 11** se muestra la comparación de los MAWOP por anular escogidos por la norma y los determinados por la herramienta digital.

Tabla 11.*Comparación MAWOP Norma VS Herramienta.*

Well Data		MAWOP Norma (psi)	MAWOP MW-PIPEDRIVE (psi)
Tubing	2 7/8 in., 6.5 #, L-80	N/A	N/A
"A" Anular		4000	4000
Production casing	5 1/2 in., 17#, P-110		
"B" Anular		3090	3087,5
Intermediate casing 1	10 3/4 in., 55.5#, P-110		
"C" Anular		200	200
Intermediate casing 2	13 3/8 in., 68#, K-55		
"D" Anular		100	100
Surface Casing	18 5/8 in., 87.5#, k-55		

Nota. Esta tabla representa la comparación de resultados obtenidos por la Norma API RP 90-2 VS MW-PIPEDRIVE.

Como se evidencia en la Tabla 11 los valores obtenidos por la herramienta digital MW-PIPEDRIVE no desvarían en gran medida de los teóricos suministrados por la norma API RP 90-

2 del 2016. Presentando un error global promedio de la herramienta igual a 0,003%, valor que ratifica el correcto funcionamiento de la herramienta.

3.2. Implementación de la herramienta MW-PIPEDRIVE en escenarios reales operados por ECOPETROL S.A.

En esta parte del presente proyecto se da inicio al desarrollo del cuarto objetivo, mostrando los resultados obtenidos por la herramienta digital. Se enmarca la implementación de la herramienta MW-PIPEDRIVE en escenarios reales que operan por ECOPETROL S.A. y así verificar el cumplimiento de la norma API RP 90-2. La culminación del proyecto se basa principalmente en el cálculo del MAWOP para cada anular y la determinación del valor mínimo obtenido para el cálculo del MAWOP de referencia para el pozo evaluado.

Debido a que ECOPETROL S.A. solo utiliza el método SDM (Simple De-rating Method) para el cálculo del MAWOP, la validación de la herramienta será entonces, para cada escenario real evaluada por el método SDM. En la **Tabla 2** se muestra la información técnica de los (3) escenarios reales a evaluar. Con base en esos datos se procede a realizar los cálculos del MAWOP para cada anular por pozo a través de la herramienta MW-PIPEDRIVE y posteriormente verificar el cumplimiento de la norma.

A continuación, se describe detalladamente la validación de la herramienta MW-PIPEDRIVE para cada pozo y poder comparar los resultados de ECOPETROL S.A. y de la misma.

3.2.1. Cálculo del MAWOP para el POZO A.

La reproducción de este escenario se realiza con base a la información presentada en la **Tabla 2** y **Tabla 12**. Donde se encuentran todos los valores de las variables que la herramienta MW-PIPEDRIVE, necesita para ejecutar los cálculos relacionados al cálculo del MAWOP. Después de tener los datos de entrada, se procede a ingresarlos en la herramienta digital como se muestra en la **Figura 32**.

Tabla 12.

Especificaciones Cabezal y Formación POZO A

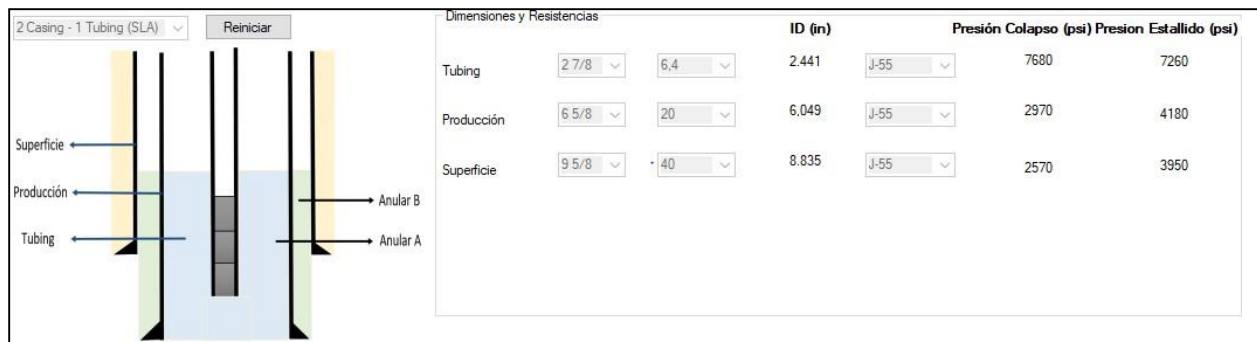
Presión de trabajo del cabezal(psi)	3000
Gradiente de Fractura FG (psi/ft)	0,85488
Densidad del lodo (ppg)	8,3
TVD zapato superficie (ft)	609

Nota. Esta tabla representa las características del cabezal y la formación expuesta para el pozo A.

Esta información está basada en que el pozo “A” es un pozo con sistema de levantamiento artificial, en el cual se dispuso el tope del cemento por debajo del tope del zapato del revestimiento siguiente. Es un pozo construido con dos casing y un tubing. Por esta razón la herramienta procederá a calcular el MAWOP para resistencia a la formación y cabezal, pero no MAWOP para elemento de completamiento.

Figura 32.

Interfaz de entrada del pozo A.



Nota. Esta figura representa los datos de entrada contemplados en el cuadro 2.

En el momento que los datos son ingresados a la herramienta MW-PIPEDRIVE, los datos de salida se muestran a continuación en la **Tabla 14** y la interfaz de los resultados de la herramienta se representan en la **Figura 33**. En estos se muestran los resultados que arrojó la herramienta, y a su vez determinar el mínimo valor de MAWOP.

Figura 33.

Interfaz de resultados MW-PIPEDRIVE para el pozo A

Anular	Tubular Interno (psi)	Tubular Evaluado (psi)	Tubular Externo (psi)	Cabezal (psi)	Resistencia a la Formación (psi)
Anular A	5760	2090	3160	2400	206,18304
Anular B	1185	2227,5		2400	

¿El tope del cemento esta por encima del zapato del casino de superficie?
 Si No

Elementos de Completamiento

Presion trabajo cabezal (psi)

Resistencia a la Formacion

Densidad Lodo (ppg)

TVD Zapato Superficie (ft)

Gradiente de fractura (psi/ft)

Gradiente de peso de lodo (psi/ft)

Nota. Esta figura representa los datos de salida reproducidos por la herramienta MW-PIPEDRIVE.

Tabla 13.

Resultados MAWOP SDM

MAWOP SDM (psi)	
"A" ANULAR POZO A	
Tubular Interno MW-PIPEDRIVE	5760
Tubular Evaluado MW-PIPEDRIVE	2090
Tubular Externo MW-PIPEDRIVE	3160
"B" ANULAR POZO A	
Tubular superficie MW-PIPEDRIVE	1185
Tubular intermedio 2 MW-PIPEDRIVE	2227,5
MAWOP Resistencia a la Formación	
Resistencia a la Formación	206,18304

Nota. Esta tabla representa los resultados arrojados por la herramienta para el cálculo del MAWOP por el método SDM.

Según los resultados obtenidos en la **Tabla 14**, se puede observar en primera medida el MAWOP calculado para cada anular según su estado mecánico y las características del pozo "A".

Teniendo en cuenta lo previsto anteriormente, para darle un MAWOP general al pozo se toma como referencia el valor mínimo de todos los MAWOP calculados. Para este pozo “A” ese valor MAWOP corresponde a 206,18304 psi. Por ende, esta será nuestra máxima presión permitida en cabeza de pozo para no perder la integridad de pozo reportada para el pozo “A”.

A Continuación, en la **Tabla 15** se realiza una comparación de los resultados obtenidos por ECOPETROL S.A. vs MW-PIPEDRIVE, junto con el error de los resultados que tuvo la herramienta en comparación por los valores calculados manualmente por los ingenieros de la empresa.

Tabla 14.

Comparación MW-PIPEDRIVE vs Ecopetrol S.A para el POZO A.

MAWOP SDM (psi)			
"A" ANULAR POZO A			
	MW-PIPEDRIVE	ECOPETROL S.A.	%ERROR
Tubular Interno MW-PIPEDRIVE	5760	5760	0%
Tubular Evaluado MW-PIPEDRIVE	2090	2090	0%
Tubular Externo MW-PIPEDRIVE	3160	3160	0%
"B" ANULAR POZO A			
Tubular Superficie MW-PIPEDRIVE	1185	1185	0%
Tubular Producción MW-PIPEDRIVE	2227,5	2228	0,99%
MAWOP Resistencia a la Formación			
Resistencia a la Formación	206,18304	205,461984	1%
MAWOP Cabezal			
Cabezal	2400	2400	0%

Nota. Esta tabla representa la comparación resultados por MW-PIPEDRIVE vs ECOPETROL S.A. y la desviación obtenida por la herramienta.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos por ECOPETROL S.A. vs MW-PIPEDRIVE ningún valor supera el 1%, porcentaje que hace referencia a la situación anteriormente descrita en la validación del escenario propuesto por la norma API RP 90-2 del 2016, en donde este error recae en la capacidad de la herramienta en obtener valores para cálculo del MAWOP con todos sus decimales, concluyendo que la herramienta tiene un grado de exactitud alto para la reproducción de escenarios reales.

3.2.2. Calculo del MAWOP para el POZO B

Según la información presentada en las **Tablas 2 y 15**, se procede a simular el escenario operativo del Pozo B, el cual cuenta con el tope del cemento por debajo del tope del revestimiento siguiente, razón por la cual se calculó el MAWOP de resistencia a la formación,, además es un pozo de flujo natural, como se explica en la metodología de este trabajo de grado para los pozos que cuenten con este mecanismo de producción se deberá calcular MAWOP por elemento de completamiento por medio de la herramienta MW-PIPEDRIVE.

Cuando los datos de entrada correspondientes al diámetro de la tubería, peso y grado, se tengan diligenciados en la herramienta como se muestra en la **Figura 34**, la herramienta ejecuta la secuencia lógica para determinar el MAWOP, con estos resultados se validará el funcionamiento efectivo de la herramienta para el cálculo del MAWOP.

Tabla 15.

Especificaciones Cabezal, elemento de completamiento y resistencia a la formación POZO B

Presión de trabajo del cabezal(psi)	2000
Presión de diseño del componente(psi)	5000
Densidad de Salmuera (ppg)	8,4
Densidad del fluido dentro del pozo (ppg)	7,4
Presión de Yacimiento	3400
TVD Yacimiento	6000
TVD Empaque	5500
Gradiente de Fractura FG (psi/ft)	1,008
Densidad del lodo (ppg)	8,4
TVD zapato superficie (ft)	876

Nota. Esta tabla representa las características del cabezal, elemento de completamiento y la formación expuesta para el pozo B.

Figura 34.

Interfaz de entrada de datos para el POZO B

Dimensiones y Resistencias		ID (in)	Presión Colapso (psi)	Presión Estallido (psi)
Tubing	2 7/8 6.5	2.441	N-80 11160	10570
Producción	7 26	6.276	N-80 5410	7240
Superficie	9 5/8 32.3	9.001	H-40 1370	2270

Nota. Esta figura representa los datos de entrada para el pozo B.

Como se observa en la **Figura 27** el pozo produce por flujo natural debido a que su estado mecánico tiene empaque en el tubing. Por esta razón se analiza el MAWOP para el elemento de completamiento.

Igualmente, como en la sección 3.2.1, a continuación, se muestra los resultados obtenidos en la **Tabla 16** y la interfaz de la herramienta al momento de calcular el MAWOP como se muestra en la **Figura 35**.

Tabla 16.

Resultados presentados por la herramienta MW-PIPEDRIVE para el pozo B

MAWOP SDM (psi)	
MW-PIPEDRIVE	
"A" ANULAR POZO A	
Tubular Interno MW-PIPEDRIVE	8370
Tubular Evaluado MW-PIPEDRIVE	3620
Tubular Externo MW-PIPEDRIVE	1816
"B" ANULAR POZO A	
Tubular superficie MW-PIPEDRIVE	681
Tubular producción MW-PIPEDRIVE	4057,5
MAWOP Resistencia a la Formación	
Resistencia a la Formación	400,29696

Tabla 16. Continuación

MAWOP Cabezal	
Cabezal	1600
MAWOP Elemento de Completamiento	
Resistencia a la Formación	4957

Nota. Esta tabla representa los resultados obtenidos por la herramienta MW-PIPEDRIVE para el pozo B.

Figura 35.

Interfaz de resultados de la herramienta MW-PIPEDRIVE para el pozo B

SDM

Anular	Tubular Interno (psi)	Tubular Evaluado (psi)	Tubular Externo (psi)	Cabezal (psi)	Resistencia a la Formación (psi)	Elementos de Completamiento (psi)
Anular A	8370	3620	1816	1600	400,29696	4952
Anular B	681	4057,5		1600		

¿El tope del cemento esta por encima del zapato del casing de superficie?
 Si No

Elementos de Completamiento

Presion trabajo cabezal (psi)

Presion de diseño del componente (psi)

Densidad Salmuera (ppg)

Densidad Fluido dentro del pozo (ppg)

Presion Yacimiento (psi)

TVD Yacimiento (ft)

TVD Empaque (ft)

Resistencia a la Formacion

Diferencial TVD (ft)

Presion debajo del componente (psi)

Presion encima del componente (psi)

Presion diferencial empaque (psi)

MAWOP Empaque (psi)

Densidad Lodo (ppg)

TVD Zapato Superficie (ft)

Gradiente de fractura (psi/ft)

Gradiente de peso de lodo (psi/ft)

Nota. Esta figura representa los resultados ajorados para el pozo B según MW-PIPEDRIVE

Como se observan los resultados obtenidos en la **Tabla 16**, se puede notar el resultando de la secuencia matemática para el MAWOP dependiendo la cantidad de anulares y empaques que este contiene. Teniendo en cuenta lo previsto anteriormente para el pozo A, el MAWOP general para el pozo B es 400,29696 psi. Valor mínimo encontrado para el cálculo de MAWOP en el pozo “B”. Seguidamente, en la **Tabla 17** se realiza una comparación de los resultados obtenidos por ECOPETROL S.A. vs MW-PIPEDRIVE, determinando el porcentaje de error que presenta la herramienta.

Tabla 17.*Comparación MW-PIPEDRIVE VS ECOPETROL S.A para el POZO B.*

MAWOP SDM (psi)			
"A" ANULAR POZO B			
	MW-PIPEDRIVE	ECOPETROL S.A.	%ERROR
Tubular Interno MW-PIPEDRIVE	8370	8370	0%
Tubular Evaluado MW-PIPEDRIVE	3620	3620	0%
Tubular Externo MW-PIPEDRIVE	1816	1816	0%
"B" ANULAR POZO B			
Tubular Superficie MW-PIPEDRIVE	681	681	0%
Tubular Producción MW-PIPEDRIVE	4057,5	4057,5	0%
MAWOP Resistencia a la Formación			
Resistencia a la formación	400,29696	400	1%
MAWOP Cabezal			
Cabezal	1600	1600	0%
MAWOP Elemento de Completamiento			
Resistencia a la Formación	4952	4952	0%

Nota. Esta tabla representa la comparación resultados por MW-PIPEDRIVE vs ECOPETROL S.A. y el porcentaje de error que esta representante.

Según los resultados obtenidos por ECOPETROL S.A. vs MW-PIPEDRIVE ningún valor supera el 1%, concluyendo que la herramienta tiene un grado de exactitud alto. Sin embargo, el error que se puede evidenciar, el cual hace relación al cálculo del MAWOP para resistencia a la formación, corresponde a la cualidad e la herramienta anteriormente nombrada, en donde se toman todos los decimales producto de las operaciones internas que realiza la herramienta y no, del redondeo de presiones como si lo hace los valores presentados por la empresa ECOPETROL.

3.2.3. Cálculo del MAWOP para el POZO C

Para la implementación de la herramienta MW-PIPEDRIVE en el tercer escenario operativo, al igual que en los otros dos anteriores, es necesario que toda la data de entrada presentada en la **Tabla 2** y la **Tabla 18** este ingresada en la herramienta. Una vez ingresados los datos a la herramienta digital, esta realiza secuencias lógicas necesarias para determinar el anular, que cumple con los requisitos para que el pozo este en operación y así mismo cumplir con los estándares de la norma API RP 90.2 la cual es la base del presente trabajo.

Tabla 18

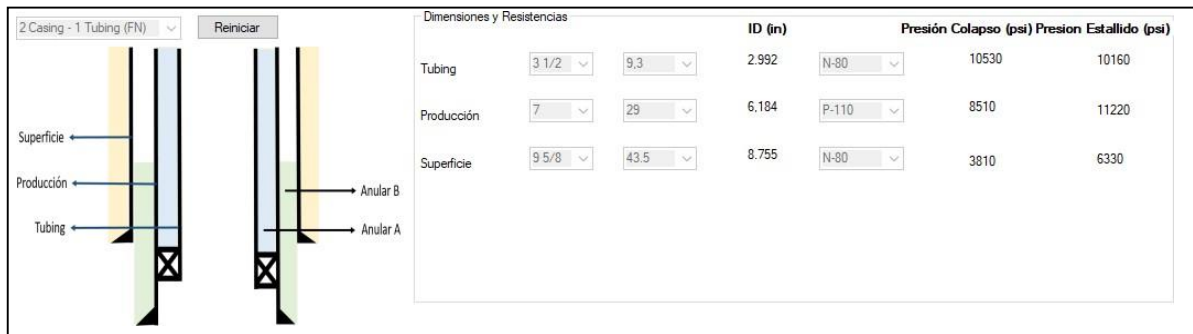
Especificaciones Cabezal, elemento de completamiento y resistencia a la formación POZO C.

Presión de trabajo del cabezal(psi)	5000
Presión de diseño del componente(psi)	6000
Densidad de Salmuera (ppg)	8,4
Densidad del fluido dentro del pozo (ppg)	8,3
Presión de Yacimiento	32000
TVD Yacimiento	6780
TVD Empaque	6751
Gradiente de Fractura FG (psi/ft)	0,6815
Densidad del lodo (ppg)	8,8
TVD zapato superficie (ft)	1025

Nota. Esta tabla representa las características del cabezal, elemento de completamiento y la formación expuesta para el pozo B.

Figura 36.

Interfaz de entrada de datos para el POZO C



Nota. Esta figura representa los datos de entrada para el pozo C.

Con base a los datos mostrados anteriormente y a través de los cálculos desarrollados por la herramienta MW-PIPEDRIVE; esto provoca una serie de parámetros que satisfacen los requerimientos para el POZO C y lo estipulado en la norma. La simulación de la herramienta arroja

los siguientes resultados descritos en la **Tabla 19** y la interfaz de la herramienta al momento de calcular el MAWOP como se muestra en la **Figura 37**.

Tabla 19.

Resultados presentados por la herramienta MW-PIPEDRIVE para el pozo C.

MAWOP SDM (psi)	
MW-PIPEDRIVE	
"A" ANULAR POZO C	
Tubular Interno MW-PIPEDRIVE	7897,5
Tubular Evaluado MW-PIPEDRIVE	5610
Tubular Externo MW-PIPEDRIVE	5064
"B" ANULAR POZO C	
Tubular superficie MW-PIPEDRIVE	1899
Tubular producción MW-PIPEDRIVE	6382,9
MAWOP Resistencia a la Formación	
Resistencia a la formación	183,598
MAWOP Cabezal	
Cabezal	4000
MAWOP Elemento de Completamiento	
Resistencia a la formación	5011

Nota. Esta tabla representa los resultados obtenidos por la herramienta MW-PIPEDRIVE para el pozo C.

Figura 37.

Interfaz de resultados de la herramienta MW-PIPEDRIVE para el pozo C.

Anular	Tubular Interno (psi)	Tubular Evaluado (psi)	Tubular Externo (psi)	Cabezal (psi)	Resistencia a la Formación (psi)	Elementos de Completamiento (psi)
Anular A	7897,5	5610	5064	4000	183,598	5011
Anular B	1899	6382,5		4000		

¿El tope del cemento esta por encima del zapato del casina de superficie?
 Si No

Elementos de Completamiento		Resistencia a la Formacion	
Presion trabajo cabezal (psi)	5000	Diferencial TVD (ft)	30
Presion de diseño del componente (psi)	6000	Presion debajo del componente (psi)	3212,948
Densidad Salmuera (ppg)	8,4	Presion encima del componente (psi)	2948,4
Densidad Fluido dentro del pozo (ppg)	8,3	Presion diferencial empaque (psi)	-264
Presion Yacimiento (psi)	3200	MAWOP Empaque (psi)	5011,2
TVD Yacimiento (ft)	6780	Densidad Lodo (ppg)	8,8
TVD Empaque (ft)	6750	TVD Zapato Superficie (ft)	1025
		Gradiente de fractura (psi/ft)	0,6815
		Gradiente de peso de lodo (psi/ft)	0,4576

Nota. Esta figura representa los resultados ajorados para el POZO C según MW-PIPEDRIVE

Con los resultados mostrados previamente en la **Tabla 16**, se puede notar el resultando de la secuencia de la herramienta para el MAWOP dependiendo la cantidad de anulares que este contiene, empaques que este contiene. Tomando en consideración lo previsto anteriormente para los pozos anteriores, el MAWOP general para el pozo B es 183,598 psi. Por ello, este es el valor de referencia en cabeza de pozo para no perder la integridad del pozo.

A continuación, en la **Tabla 20** se realiza una comparación de los resultados obtenidos por ECOPETROL S.A. vs MW-PIPEDRIVE, determinando el porcentaje de error que presenta la herramienta.

Tabla 20.

Comparación MW-PIPEDRIVE VS ECOPETROL S.A para el POZO C

MAWOP SDM (psi)			
"A" ANULAR POZO C			
	MW-PIPEDRIVE	ECOPETROL S.A,R	%ERRO
Tubular Interno MW-PIPEDRIVE	7897,5	7897,5	0%
Tubular Evaluado MW-PIPEDRIVE	5610	5610	0%

Tabla 20. Continuación

Tubular Externo MW-PIPEDRIVE	5064	5064	0%
"B" ANULAR POZO C			
Tubular superficie MW-PIPEDRIVE	1899	1899	0%
Tubular producción MW-PIPEDRIVE	6382,9	6382,5	1%
MAWOP Resistencia a la Formación			
Resistencia a la formación	183,598	184,06419	1%
MAWOP Cabezal			
Cabezal	4000	4000	0%
MAWOP Elemento de Completamiento			
Resistencia a la formación	5011	5011	0%

Nota. Esta tabla representa la comparación resultados por MW-PIPEDRIVE vs ECOPETROL S.A. y el porcentaje de error que esta representante.

Según los resultados obtenidos por ECOPETROL S.A. vs MW-PIPEDRIVE ningún valor supera el 1%, lo que lleva a la conclusión la alta precisión que maneja la herramienta.

En relación a el análisis de resultados obtenidos por la herramienta MW-PIPEDRIVE y en comparación con los resultados suministrados por le empresa ECOPETROL S.A, la herramienta digital diseñada para el cálculo del MAWOP, cumple los estándares necesarios para su implementación en pozos reales colombianos. Con errores no mayores a 1% la herramienta digital desempeña su función en la búsqueda de la máxima presión operativa permitida en cabeza de pozo, satisfaciendo la necesidad de esta información, en la toma de daciones de la integridad de los pozos. La herramienta ME-PIPIDRIVE no solo funciona, sino que tiene una venta operacional amplia con una desviación inferior al 1% de la realidad del pozo.

4. CONCLUSIONES

Respecto a la validación de la herramienta MW-PIPEDRIVE, de manera global, se observó que el error promedio de reproducción de los (3) tres escenarios operativos fue del 0.003 %; lo que nos conlleva a deducir menos del 1 % de error. Si el error promedio es menor al 5%, como se estipuló en la metodología, se puede concluir que la herramienta es adecuada para la implementación en pozos reales operativos en tierra.

Según la validación del escenario descrito por la norma API RP 90-2 de 2016 dentro de la herramienta, el error del cálculo del MAWOP para el elemento de completamiento fue de 2% respecto al valor teórico de la norma; esto debido a la aproximación de valores que realiza el estándar técnico de la norma en sus cálculos. Permitiendo concluir que la herramienta MW-PIPE DRIVE tiene más exactitud al contemplar los cálculos con su totalidad de decimales, dando más confianza a los resultados del MAWOP.

Según la validación del escenario descrito por la norma API RP 90-2 de 2016 dentro de la herramienta, el error máximo obtenido fue 2% y corresponde al MAWOP para el elemento de completamiento; esto debido a la aproximación de valores que realiza el estándar técnico de la norma en sus cálculos. Permitiendo concluir que la herramienta MW-PIPEDRIVE tiene más exactitud al contemplar los cálculos con su totalidad de decimales, dando más confianza a los resultados del MAWOP.

Para el cálculo del MAWOP del anular B correspondiente al pozo C (escenario descrito por ECOJETROL) se encuentra delimitado entre dos casing. El casing de producción tiene un diámetro 7 pulgadas, peso 29 lb/ft y un grado de tubing P110, teniendo esta especificación la presión de estallido y de colapso son 11220 psi y 8510 psi arrojados por la herramienta y mi casing de superficie cuenta con un diámetro 9-5/8 pulgadas, peso 43.5 lb/ft y grado N80 los resultados obtenidos por MW-PIPEDRIVE fueron 3810 psi para la presión de colapso y 6330 psi para la presión de estallido. El resultado del cálculo del MAWOP para este anular teniendo en cuenta el colapso fue de 6382.9 psi, presentando un porcentaje de error del 1% con respecto al valor calculado por ECOJETROL.

Para el cálculo del MAWOP del anular B correspondiente al pozo A (escenario descrito por ECOJETROL) se encuentra delimitado entre dos casings. El casing de producción tiene un diámetro 6-5/8 pulgadas, peso 20 lb/ft y un grado de tubería J55, teniendo esta especificación la presión de estallido y de colapso son 2970 psi y 4180 psi arrojados por la herramienta y un casing

de superficie cuenta con un diámetro 9-5/8 pulgadas, peso 40 lb/ft y un grado de tubing J55 los resultados obtenidos por MW-PIPEDRIVE fueron 2570 psi para la presión de colapso y 3950 psi para la presión de estallido. El resultado del cálculo del MAWOP para este anular teniendo en cuenta el colapso fue de 2227.5 psi, presentando un porcentaje de error del 0.99% con respecto al valor calculado por ECOPETROL.

Para los tres escenarios reales reproducidos por la herramienta MW-PIPEDRIVE se encontró que el menor valor del cálculo del MAWOP correspondió siempre a la resistencia de la formación, presentando en los tres casos un 1% de error con relación a los valores calculados por la empresa ECOPETROL.

La herramienta MW-PIPEDRIVE esta diseñada para calcular la máxima presión operativa permitida en cabeza de pozo, por ende, no toma decisiones, ni da soluciones si en un anular se encuentra presión.

La empresa ECOPETROL calcula la máxima presión operativa permitida en cabeza de pozo por el método SDM, por tal motivo la herramienta MW-PIPEDRIVE solo reproducirá los tres escenarios reales por este método y como resultado se obtuvo un error menor al 1%. Este margen de error representa mayor confiabilidad para la empresa.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. Liu, L. Cao, y J. Xie, "Research and Practice of Full Life Cycle Well Integrity in HTHP Well, Tarim oilfield", *International petroleum Technology Conference*, p. 9, 2019.
- [2] G. Carmen, y M. Miguel, "Solución de gestión y control de la integridad de pozos" Archivo Digital UPM,» febrero 2015. [En línea]. Disponible en: <http://oa.upm.es/36500/>. [Último acceso: 10 Septiembre 2020].
- [3] NRGÍ Broker, "Que es el control de pozo", 09 05 2019. [En línea]. Disponible en: <https://nrgibroker.com/que-es-el-control-de-pozos/>. [Último acceso: 10 10 10].
- [4] American Petroleum Institute, *Annular Casing Pressure Management for Onshore Wells*, Washington, 2016.
- [5] O. N. O. Vargas, "Análisis de la deformación y el colapso de la tubería de revestimiento en los campos del Piedemonte llanero operados por BP",» 2008. [En línea]. Disponible en: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2008/125446.pdf>. [Último acceso: 2020 10 10].
- [6] La Comunidad Petrolera, "La comunidad Petrolera", [En línea]. Disponible en: [https://lacomunidadpetrolera.com/2010/05/esfuerzos-internos-o-presion-de.html#:~:text=Esfuerzos%20internos%20o%20presi%C3%B3n%20de%20estallido%3A%20Es%20la%20m%C3%A1xima%20presi%C3%B3n,que%20el%20revestidor%20puede%20resistir](https://lacomunidadpetrolera.com/2010/05/esfuerzos-internos-o-presion-de.html#:~:text=Esfuerzos%20internos%20o%20presi%C3%B3n%20de%20estallido%3A%20Es%20la%20m%C3%A1xima%20presi%C3%B3n,que%20el%20revestidor%20puede%20resistir.). [Último acceso: 10 09 2020].
- [7] Schlumberger, "Glossary Schlumberger", [En línea]. Disponible en: https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/c/collapse_pressure.aspx#:~:text=Presi%C3%B3n%20a%20la%20cual%20una,perfectamente%20redonda%20es%20relativamente%20alta.. [Último acceso: 10 09 2020].

ANEXOS

ANEXO 1.

FUNCIONAMIENTO DE LA HERRAMIENTA DIGITAL eRedBook

Halliburton proporciona una aplicación digital que permite encontrar todas las dimensiones y resistencias a partir propiedades conocidas como diámetro externo, peso y grado. A continuación, se muestra la interfaz de la herramienta.



En esta se puede observar las diferentes opciones de la aplicación, las cuales son necesarias para el desarrollo de la herramienta MW-PIPEDRIVE para generar una biblioteca de Dimensiones y Resistencias donde me darán el valor principal para la herramienta como lo son la presión de colapso y estallido. A continuación, se presenta un ejemplo del ingreso de una tubería de revestimiento, como se realiza usualmente.

Dimensiones y Resisten... UoM

Tubería Revestimiento Tubería Producción DP CT

OD Seleccionar >

Peso

ID

Grado

Restablecer selecciones Obtener de Favoritos Agregar a Favoritos

Dimensiones y Resisten... UoM

Tubería Revestimiento Tubería Producción DP CT

OD 5 1/2 in >

Peso Seleccionar >

ID Seleccionar >

Grado Seleccionar >

Restablecer Obtener Agregar

OK

4 1/2
5
5 1/2
5 5/8
5 3/4
6

Dimensiones y Resisten... UoM

Tubería Revestimiento Tubería Producción DP CT

OD 5 1/2 in >

Peso 20 lbs/ft >

ID Seleccionar >

Grado Seleccionar >

Restablecer Obtener Agregar

OK

14
15,5
17
20
23
26
26,8

Dimensiones y Resisten... UoM

Tubería Revestimiento Tubería Producción DP CT

OD 5 1/2 in >

Peso 20 lbs/ft

ID 4,778 in

Grado LS-65

Restablecer selecciones Obtener de Favoritos Agregar a Favoritos

Dimensiones y Resistencias

Diametro Drift (in)	4,653
Codigo de tipo de cople	PECSNG
Presion de Colapso (psi)	7,540
Presion interna (psi)	7,740
Elasticidad de tubería (lbs/ft)	379.000

La herramienta MW-PIPEDRIVE considera las dimensiones y resistencias del aplicativo. Una vez ejecutado este proceso, se procede a programar la herramienta digital para así tener una biblioteca de tubería al momento del usuario ingresar valores.