

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DIGITAL QUE ESTABLEZCA LOS  
CRITERIOS DE DISEÑO DE ACUMULADORES DE CONTROL DE POZOS,  
SEGÚN LA NORMA API 16D DE 2018.**

**CAMILO ANDRÉS JURADO PÁEZ**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BOGOTÁ D.C.  
2020**

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DIGITAL QUE ESTABLEZCA LOS  
CRITERIOS DE DISEÑO DE ACUMULADORES DE CONTROL DE POZOS,  
SEGÚN LA NORMA API 16D DE 2018.**

**CAMILO ANDRÉS JURADO PÁEZ**

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

**Director  
DIEGO CAMILO ARAQUE BARRERA  
Ingeniero de Petróleos**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BOGOTÁ D.C.  
2020**

**Nota de Aceptación**

---

---

---

---

---

---

Presidente del Jurado  
Ing.

---

Jurado  
Ing.

---

Jurado  
Ing.

Bogotá D.C., mayo 2020

## **DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD DE AMÉRICA**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. MARIO POSADA GARCIA-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

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

## CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	18
INTRODUCCIÓN	20
1. MARCO TEÓRICO	23
1.1 GENERALIDADES DEL CONTROL DE POZOS	23
1.1.1 Sistema de control de influjos en el pozo	24
1.1.2 Equipos acumuladores de fluido hidráulico	25
1.2 GENERALIDADES PARA EL DISEÑO DE ACUMULADORES	26
1.2.1 Parámetros para el diseño de acumuladores	27
1.2.2 Condiciones operativas del acumulador	28
1.2.2.2 Condición uno (1)	29
1.2.3 Métodos para el diseño de acumuladores	29
2. METODOLOGÍA Y DATOS	31
2.1 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES Y ECUACIONES DE DISEÑO	33
2.1.1 Variables de diseño del acumulador	33
2.2. APLICACIÓN DE ECUACIONES DE DISEÑO SEGÚN LOS MÉTODOS B Y C	36
2.3 CLASIFICACIÓN DE VARIABLES DE ENTRADA Y SALIDA DE LA HERRAMIENTA AC-GLOR	42
2.4 DISEÑO DE LA HERRAMIENTA AC-GLOR	43
2.4.1 Entrada de datos a la herramienta AC-GLOR	44
2.4.2 Análisis operacional de la herramienta AC-GLOR	45
2.4.3. Desarrollo algorítmico y resultados de la herramienta AC-GLOR	46
2.4.3.1 Condición de carga del acumulador	48
2.4.3.2. Condición de mínima presión de operación (MOP) del acumulador	49
2.4.3.3 Condición de precarga del acumulador	50
2.4.3.4 Resultados de diseño de la herramienta AC-GLOR	51
2.5 SIMULACIÓN DE ESCENARIOS OPERATIVOS PARA LA VALIDACIÓN DE LA HERRAMIENTA AC-GLOR	50
2.6 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LA HERRAMIENTA AC-GLOR CON LOS TEORICOS ESTIPULADOS EN LA NORMA	51
2.7 APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA AC-GLOR EN CUATRO (4) TALADROS DE TIERRA OPERATIVOS	52
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	53
3.1 VERIFICACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA HERRAMIENTA AC-GLOR	53

3.1.1 Análisis de cálculo de la herramienta AC-GLOR de los trece (13) escenarios operativos de la norma api 16d 2018	56
3.1.1.1 Taladro en tierra – Acumulador principal	56
3.2 IMPLEMENTACIÓN DE LA HERRAMIENTA AC-GLOR EN TALADROS REALES QUE OPERAN EN COLOMBIA	83
3.2.1 Diseño de acumulador para taladro 1 – Nabors (1500 HP)	84
3.2.2 Diseño de acumulador para taladro 2 – Nabors (1000 HP)	86
3.2.3 Diseño de acumulador para taladro 3 – Petroworks (1000 HP)	88
3.2.4 Diseño de acumulador para taladro 4 – Petroworks (750 HP)	90
4. CONCLUSIONES	93
5. RECOMENDACIONES	95
BIBLIOGRAFIA	96
ANEXOS	97

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
<b>Figura 1.</b> Sistema de control de pozos	24
<b>Figura 2.</b> Sistema de acumulación de equipos de control de pozo	26
<b>Figura 3.</b> Esquema de secuencia para el procedimiento de desarrollo de la herramienta AC-GLOR	32
<b>Figura 4.</b> Gráfica tipo A de intersección del Método B y el Método C	37
<b>Figura 5.</b> Gráfica tipo B de intersección del Método B y el Método C	38
<b>Figura 6.</b> Gráfica tipo A de curvas sin intersección cuando el Método C tiene una presión de precarga óptima más grande que la del Método B	38
<b>Figura 7.</b> Gráfica tipo A de curvas sin intersección cuando el Método C tiene una presión de precarga óptima más grande que la del Método B	39
<b>Figura 8.</b> Gráfica tipo A de curvas sin intersección cuando el Método B tiene una presión de precarga óptima más grande que la del Método C	39
<b>Figura 9.</b> Gráfica tipo B de curvas sin intersección cuando el Método B tiene una presión de precarga óptima más grande que la del Método C	40
<b>Figura 10.</b> Interfaz de entrada de datos para el taladro 1	85
<b>Figura 11.</b> Interfaz de entrada de datos para el taladro 2	87
<b>Figura 12.</b> Interfaz de entrada de datos para el taladro 3	89
<b>Figura 13.</b> Interfaz de entrada de datos para el taladro 4	91

## LISTA DE TABLAS

	pág.
<b>Tabla 1.</b> Condiciones operativas para escenarios de verificación	53
<b>Tabla 2.</b> Porcentaje de error general de la herramienta AC-GLOR	55
<b>Tabla 3.</b> Variables de entrada para la reproducción del escenario 1	56
<b>Tabla 4.</b> Resultados de la herramienta AC-GLOR para el escenario 1	56
<b>Tabla 5.</b> Variables de entrada para la reproducción del escenario 2,3,4 y 5	58
<b>Tabla 6.</b> Resultados de la herramienta AC-GLOR para el escenario 2	59
<b>Tabla 7.</b> Resultados de la herramienta AC-GLOR para el escenario 3	61
<b>Tabla 8.</b> Variables adicionales de entrada para la reproducción del escenario 3	62
<b>Tabla 9.</b> Resultados de la herramienta AC-GLOR para el escenario 4	62
<b>Tabla 10.</b> Resultados de la herramienta AC-GLOR para el escenario 5	64
<b>Tabla 11.</b> Variables de entrada para la reproducción del escenario 6	66
<b>Tabla 12.</b> Resultados de la herramienta AC-GLOR para el escenario 6	66
<b>Tabla 13.</b> Variables de entrada para la reproducción del escenario 7,8,9,10 y 11	68
<b>Tabla 14.</b> Resultados de la herramienta AC-GLOR para el escenario 7	69
<b>Tabla 15.</b> Variables adicionales de entrada para la reproducción del escenario 8	70
<b>Tabla 16.</b> Resultados de la herramienta AC-GLOR para el escenario 8	71
<b>Tabla 17.</b> Variables adicionales de entrada para la reproducción del escenario 9	73
<b>Tabla 18.</b> Resultados de la herramienta AC-GLOR para el escenario 9	73
<b>Tabla 19.</b> Variables adicionales de entrada para la reproducción del escenario 10	75
<b>Tabla 20.</b> Resultados de la herramienta AC-GLOR para el escenario 10	75
<b>Tabla 21.</b> Variables adicionales de entrada para la reproducción del escenario 11	77
<b>Tabla 22.</b> Resultados de la herramienta AC-GLOR para el escenario 11	78
<b>Tabla 23.</b> Variables de entrada para la reproducción del escenario 12 y 13	79
<b>Tabla 24.</b> Resultados de la herramienta AC-GLOR para el escenario 12	80
<b>Tabla 25.</b> Variables adicionales de entrada para la reproducción del escenario 13	81
<b>Tabla 26.</b> Resultados de la herramienta AC-GLOR para el escenario 13	82
<b>Tabla 27.</b> Datos operativos de taladros sometidos a análisis	83
<b>Tabla 28.</b> Condiciones ambientales de taladros sometidos a análisis	84
<b>Tabla 29.</b> Comparación de resultados para el taladro 1	85
<b>Tabla 30.</b> Comparación de resultados para el taladro 2	87
<b>Tabla 31.</b> Comparación de resultados para el taladro 3	89
<b>Tabla 32.</b> Comparación de resultados para el taladro 4	91

## LISTA DE CUADROS

	pág.
<b>Cuadro 1.</b> Discretización de variables de la herramienta AC-GLOR	42
<b>Cuadro 2.</b> Esquema de organización de datos de entrada en la herramienta AC-GLOR	44
<b>Cuadro 3.</b> Cálculos de condición de carga en la herramienta AC-GLOR	47
<b>Cuadro 4.</b> Cálculos de condición MOP en la herramienta AC-GLOR	48
<b>Cuadro 5.</b> Cálculos de condición de precarga en la herramienta AC-GLOR	48
<b>Cuadro 6.</b> Condiciones operativas para escenarios de verificación	51

## LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
<b>Gráfica 1.</b> Resultados de parámetros óptimos de diseño del escenario 1	57
<b>Gráfica 2.</b> Resultados de parámetros óptimos de diseño del escenario 2	60
<b>Gráfica 3.</b> Resultados de parámetros óptimos de diseño del escenario 3	61
<b>Gráfica 4.</b> Resultados de parámetros óptimos de diseño del escenario 4	63
<b>Gráfica 5.</b> Resultados de parámetros óptimos de diseño del escenario 5	65
<b>Gráfica 6.</b> Resultados de parámetros óptimos de diseño del escenario 6	67
<b>Gráfica 7.</b> Resultados de parámetros óptimos de diseño del escenario 7	70
<b>Gráfica 8.</b> Resultados de parámetros óptimos de diseño del escenario 8	72
<b>Gráfica 9.</b> Resultados de parámetros óptimos de diseño del escenario 9	74
<b>Gráfica 10.</b> Resultados de parámetros óptimos de diseño del escenario 10	76
<b>Gráfica 11.</b> Resultados de parámetros óptimos de diseño del escenario 11	78
<b>Gráfica 12.</b> Resultados de parámetros óptimos de diseño del escenario 12	80
<b>Gráfica 13.</b> Resultados de parámetros óptimos de diseño del escenario 13	82

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
<b>Anexo A.</b> Funcionamiento de la herramienta digital proporcionada por el NIST	98
<b>Anexo B.</b> Descripción de preventoras utilizadas en taladros de análisis	100

## ABREVIATURAS

CRA	Capacidad requerida del acumulador
ANSI	Instituto Nacional Americano de Estándares – <i>American National Standards Institute</i>
ASTM	Sociedad Americana de Pruebas y Materiales - <i>American Society of Testing and Materials</i>
AWS	Sociedad Americana de Soldadura - <i>American Welding Society</i>
BOP	Preventora de Arremetidas - <i>blowout preventor</i>
RCC	Ram Ciego Cortador
UCC	Unidad de Control Central
RCCSG	Ram Corte de Casing
DMAS	Autocorte del Deadman - <i>deadman autoshear</i>
EDS	Secuencia para desconectar de emergencia - <i>emergency disconnect sequence</i>
ESD	Cierre de emergencia (emergency shutdown)
FAT	Prueba De Fábrica - <i>factory acceptance test</i>
FMEA	Modos de falla y análisis de efectos - <i>Failure modes and effects analysis</i>
VFR	Volúmen funcional requerido
VFR <sub>B</sub>	Volúmen funcional requerido para el método B
VFR <sub>C</sub>	Volúmen funcional requerido para el método C
HPU	Unidad de poder Hidráulico - <i>Hydraulic power unit</i>
IEC	Comisión electrotécnica internacional - <i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	Instituto de ingenieros electrónicos y eléctricos - <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LMRP	Conjunto de “riser” sub-marino - <i>lower marine riser package</i>
MUX	Sistema múltiple - <i>multiplex system</i>
NDE	Examen no destructivo - <i>nondestructive examination</i>
NIST	Instituto nacional de estándares y tecnología - <i>National Institute of Standards and Technology</i>
ROV	Vehículo operado remotamente - <i>remotely operated vehicle</i>
RWP	Presión nominal de trabajo - <i>rated working pressure</i>
RC	Relación de cierre de los preventores
EV	Eficiencia Volumétrica
EV <sub>p</sub>	Eficiencia Volumétrica presión-limitada
EV <sub>v</sub>	Eficiencia Volumétrica volúmen-limitado
VB	Volumen de botellas del acumulador
$\rho_0$	Densidad de precarga en la condición de precarga
$\rho_1$	Densidad de precarga en la condición de carga
$\rho_2$	Densidad de precarga en la condición de MOP
$\rho_3$	Densidad de precarga en la condición de descarga total

$\rho_{1BL}$	Densidad del gas en el acumulador para la condición de carga en el método B en una secuencia de baja temperatura
$\rho_{1CL}$	Densidad del gas en el acumulador para la condición de carga en el método C en una secuencia de baja temperatura
$\rho_{1BH}$	Densidad del gas en el acumulador para la condición de carga en el método B en una secuencia de alta temperatura
$\rho_{1CH}$	Densidad del gas en el acumulador para la condición de carga en el método C en una secuencia de alta temperatura
$\rho_{2BL}$	Densidad del gas en el acumulador para la condición de descarga total en el método B en una secuencia de baja temperatura
$\rho_{2CL}$	Densidad del gas en el acumulador para la condición de descarga total en el método C en una secuencia de baja temperatura
$\rho_{XBC}$	Densidad óptima de precarga definida para la intersección de la curva de volumen limitado del método B y la curva de presión limitada del método C.
$\rho_{XCB}$	Densidad óptima de precarga definida para la intersección de la curva de volumen limitado del método C y la curva de presión limitada del método B.
$\rho_{1B}$	Densidad del gas en el acumulador para la condición de carga en el método B
$\rho_{1C}$	Densidad del gas en el acumulador para la condición de carga en el método C
$\rho_{2B}$	Densidad del gas en el acumulador para la condición de MOP en el método B
$\rho_{2C}$	Densidad del gas en el acumulador para la condición de MOP en el método C
$P_{eRWP}$	Presión de cierre en contra de la presión de trabajo del acumulador (RWP)

## GLOSARIO<sup>1</sup>

**ACUMULADOR:** recipiente a presión cargado con gas inerte y utilizado para almacenar líquido hidráulico bajo presión, el cual es usado para la operación y funcionamiento del conjunto de preventoras.

**BOP ANULAR:** preventora que utiliza un elemento de sellado elastomérico para sellar el espacio anular entre cualquier configuración de tubería y cable (exceptuando tubería espiralada y “*Kelly*”) y el hueco. Así mismo, permite sellar el pozo sin tubería en él.

**BOP RAM CIEGO:** BOP que sella el pozo en hueco abierto.

**BOP RAM CIEGO-CORTADOR:** componente de cierre y sellado en un conjunto de preventores que primero cizalla la tubería en el pozo y luego sella el hueco; esto actúa como un Ram ciego si no hay tubería en operación.

**BOP:** equipo instalado en el cabezal de pozo para contener fluidos de formación, ya sea en el espacio anular entre el *casing* y la tubería, o en un hueco abierto, durante las operaciones de perforación de pozos.

**CHOKE MANIFOLD:** válvula(s) conectada(s) al conjunto de BOP que controla el flujo al colector de estrangulación, para controlar la presión proveniente del pozo.

**CIRCUITO DE RETORNO AL TANQUE:** circuito de control hidráulico en el que el fluido utilizado se devuelve al depósito.

**CLASIFICACIÓN DE PRESION DE TRABAJO (RWD):** presión interna máxima que el equipo está diseñado para contener o controlar en condiciones normales de funcionamiento.

**CONJUNTO DE BOP:** elementos mecánicos e hidráulicos que garantizan la integridad del pozo en un evento de desbalance de presiones cuando la primera barrera (fluido de control) falla

**FLUIDO DE CONTROL:** aceite hidráulico, que, bajo presión, acciona la operación de válvulas de control y equipos de control de pozo

**INFLUJO:** flujo incontrolado de fluidos de formación hacia el pozo provocado por un desbalance de presión entre la columna hidrostática y la presión del reservorio.

**LINEA DE MATADO:** línea de alta presión que permite bombear o retirar fluidos del pozo con los BOP cerrados.

**MANIFOLD:** montaje de tuberías, válvulas y accesorios por el que el fluido de una o más fuentes se dirige selectivamente a varios sistemas o componentes.

**MÍNIMA PRESIÓN DE OPERACIÓN (MOP):** diferencial de presión mínimo necesario para que un dispositivo realice con éxito su función prevista en un entorno particular.

**POSICION DE NEUTRO:** posición central de una válvula de control de tres posiciones. La posición bloquea la presión de suministro, evitando la activación de la válvula.

**PRECARGA DEL ACUMULADOR:** carga inicial de gas inerte en un acumulador, que se comprime aún más cuando el fluido hidráulico se bombea en el acumulador, almacenando así energía potencial.

**PRESIÓN CLASIFICADA DE TRABAJO DEL SISTEMA:** presión máxima de diseño a la que se almacena el fluido de control en el conjunto del acumulador.

**PRESIÓN DE RAM DE CORTE:** presión de operación de BOP necesaria para cortar.

**PRESION DE SELLO:** presión del operador BOP necesaria para realizar un sello de pozo.

**RAM DE CORTE DE CASING:** componente de cierre que es capaz de cortar tubería con un pequeño rango de diámetros externos

**RELACIÓN DE CIERRE (RAM BOP):** área transversal efectiva del pistón dividido por el área transversal de la varilla del pistón.

**RISER:** tubería de conexión entre la plataforma y el lecho utilizado para la transmisión de fluido de control entre la superficie y el conjunto de BOP submarino.

**SISTEMA DE CONTROL BOP (UNIDAD DE CIERRE):** sistema de bombas, válvulas, acumuladores, equipos de almacenamiento y mezcla de fluidos, colector, tuberías, mangueras, paneles de control y otros elementos necesarios para operar hidráulicamente el equipo BOP.

**SISTEMA DEADMAN:** sistema de control de emergencia que se activa automáticamente en caso de fallo del sistema de control principal en operaciones costa afuera.

**TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE FLUIDO HIDRÁULICO:** tanque de almacenamiento de fluido hidráulico para la operación el sistema de control BOP.

**TIEMPO DE RESPUESTA:** tiempo transcurrido entre la activación de una función en cualquier panel de control y la ejecución completa de dicha función.

**VÁLVULA CUATRO (4) VÍAS TRES (3) POSICIONES:** válvula de control de cuatro posiciones (normalmente) donde la posición central bloquea el suministro y las otras dos dan salida al fluido.

**VÁLVULA REGULADORA:** dispositivo hidráulico que reduce, aguas arriba, la presión de suministro a una presión deseada (regulada).

**VEJIGA DE PRESIÓN:** membrana que permite acumular presión mediante el almacenamiento de gas inerte.

**VOLUMEN DE FLUIDO HIDRAULICO ALMACENADO:** volumen de fluido recuperable del sistema de acumulación entre la presión de trabajo nominal del sistema y la presión de precarga.

---

<sup>1</sup> API. *AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 16D Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment* 2018. p. 2.

## RESUMEN

**TITULO:** Desarrollo de una herramienta digital que establezca los criterios de diseño de acumuladores de control de pozos, según la norma API 16D de 2018.

**DESCRIPCIÓN:** El desarrollo de una herramienta digital que establezca los criterios de diseño de acumuladores de control de pozos, según la norma API 16D de 2018, está motivada por la necesidad de obtener criterios de diseño de acumuladores, confiables, que garanticen el óptimo funcionamiento de los dispositivos bajo escenarios reales de surgencias de pozos y a su vez, que los equipos se encuentren bajo las especificaciones de la norma internacional. A través de este proyecto de investigación se identifican las variables y ecuaciones pertinentes del diseño de acumuladores. Así mismo se diseña la secuencia lógica que debe seguir la herramienta con el fin de determinar la densidad y entropía del gas inerte en las condiciones de precarga, carga, MOP y descarga total para la determinación de la capacidad requerida y presión de precarga óptima. Una vez programada la herramienta AC-GLOR, la validación y verificación se completa mediante la simulación y reproducción de trece (13) escenarios operativos, simulaciones que resultaron exitosas. Por último, se realiza el análisis de cuatro (4) taladros en tierra reales mediante la herramienta AC-GLOR, la cual arroja como resultado que la presión de precarga establecida en Colombia (1000 psi) no se ajusta a los requerimientos de la norma, por lo que se recomendó establecer una nueva presión de precarga a los taladros en cuestión. No obstante, la totalidad de ellos cumplen a cabalidad con el requerimiento volumétrico que exige el estándar técnico según las condiciones operativas que cada taladro analizado posee.

**PALABRAS CLAVE:** Control pozos, diseños acumuladores, herramienta diseño, API 16D.

## ABSTRACT

**TITLE:** Development of a digital tool that establishes the design criteria for well control accumulators, according to API 16D of 2018.

**DESCRIPTION:** The development of a digital tool that establishes the design criteria for well control accumulators, according to API 16D of 2018, is motivated by the need to obtain design criteria of reliable accumulators, which ensure optimal devices are operating under real well-up scenarios and in turn, that equipment is under the specifications of the international standard. This research project identified the relevant variables and equations of accumulator design. The logical sequence was also performed in order to determine the density and entropy of the inert gas under the preload, load, MOP and total discharge conditions in order to determine a required capacity and optimal preload pressure. For the validation and verification of the operation of the tool is proceeded with programming and development in the AC-GLOR tool of testing five (5) operational scenarios, which were successful. Finally, the analysis of four (4) real ground drills is performed using the AC-GLOR tool, which results in the preload pressure established in Colombia (1000 psi) not conforming to the requirements of the standard, so it was recommended that the preload pressure established in Colombia (1000 psi) does not meet the requirements of the standard, so it was recommended that establish a new preload pressure to the drills in question. However, all of them fully comply with the volumetric requirement required by the technical standard according to the operating conditions that each analyzed hole has.

**KEYWORDS:** Well control, accumulator design, design tool, API 16D.

## INTRODUCCIÓN

Durante las operaciones de perforación y completamiento de pozos de petróleo y gas, producto de un desbalance entre la presión de la formación y la presión hidrostática del fluido de control, existe una probabilidad de que se materialice el riesgo de surgencia de fluidos. En consecuencia, es indispensable implementar sistemas de control de pozos que garanticen las barreras de integridad necesarias para lograr contener el flujo indeseado de fluidos hacia superficie. Los sistemas de control de pozos, típicamente, emplean la energía almacenada en forma de fluido hidráulico presurizado para operar la apertura y cierre de los componentes de las preventoras de influjos. El equipo que se encarga de presurizar y almacenar dicho fluido hidráulico se denomina Acumulador.

Los acumuladores son los dispositivos utilizados en un sistema hidráulico para el almacenamiento de energía, mediante la compresión de un fluido motriz (gas precargado, que suele ser nitrógeno o helio), con fluido hidráulico. La disponibilidad de energía hidráulica entregada por el dispositivo, depende esencialmente de tres parámetros de diseño: volumen o capacidad del acumulador; número de botellas del acumulador y presión de precarga del acumulador.

La importancia en el diseño y la selección adecuada de los acumuladores a utilizar para accionar los equipos que componen el sistema de control de pozos, ha incrementado con la conciencia que han tomado las compañías operadoras y prestadoras de servicios sobre si tienen o no la capacidad para contener eventos de surgencias y arremetidas de fluidos a los pozos. Bajo la premisa de mejoramiento continuo, meta que se han fijado la mayoría de las grandes empresas, existe una gran oportunidad de garantizar integridad en las operaciones de control de pozos al realizar mejoras en cuanto al diseño y la selección de dispositivos y equipos, específicamente los acumuladores.

Contrariamente a que la norma API 16D de 2018, establece los diferentes métodos que pueden implementarse para el diseño de acumuladores, en la actualidad, se ha optado por el método más simple, pero a su vez, el menos preciso. Es un método que fija la presión de precarga en 1000 psi sin importar las condiciones operativas, adicionalmente, calcula la capacidad requerida con base en cálculos de gases ideales, lo cual no sucede en un escenario real. En este orden de ideas, el diseño de un acumulador en cumplimiento con la totalidad de los requerimientos establecidos por la norma API 16D de 2018, involucra un procedimiento de alta complejidad matemática. La implementación de este método de diseño no se ha llevado a cabo por su dificultad, y, además, por la **ausencia de una herramienta en empresas operadoras y prestadoras de servicios, que permita el diseño de acumuladores de control de pozos bajo el cumplimiento de la norma.**

Lo anterior, ha introducido una serie de interrogantes sobre qué tan óptimo es el diseño, y cuán aptos son los acumuladores para enfrentar una situación de control. Por esta razón, un número importante de investigaciones han estado dirigidas a evaluar la exactitud del diseño para verificar si se están satisfaciendo las necesidades operacionales de perforación y completamiento, en lo que respecta el control de pozos. El presente proyecto, de acuerdo con los antecedentes en materia de control de pozos, tomó como punto de partida tres documentos que profundizan en la importancia de manejar el comportamiento de gases como reales para el diseño de acumuladores, métodos para asegurar que el diseño de acumuladores es adecuado, y métodos de diseño algorítmico de acumuladores para pozos costa afuera\*.

En la búsqueda de dar solución a la problemática planteada, el presente proyecto tiene por objetivo general **desarrollar una herramienta que establezca los criterios de diseño de acumuladores de control de pozo, según la norma API 16D de 2018, lo que permitirá la generación de casos de comparación que determinen la funcionalidad de los acumuladores en uso, la formulación de recomendaciones estratégicas para mejorar la selección de estos dispositivos, así como proporcionar un mecanismo que mejorará la capacidad de las compañías de realizar la tarea de diseño y selección de acumuladores, bajo el acercamiento a las condiciones reales de operación.** Así entonces, la presente investigación se encuentra delimitada por los objetivos específicos que se presentan a continuación:

- ✓ Identificar las variables y ecuaciones de gases reales que modelen el funcionamiento y capacidad del acumulador para el cumplimiento de los requerimientos de la norma API 16D de 2018.
- ✓ Diseñar la herramienta digital cuyo resultado sea el volumen mínimo requerido para el diseño del acumulador y la presión óptima de precarga.
- ✓ Verificar el funcionamiento correcto de la herramienta mediante la reproducción de escenarios operativos indicados en la norma API 16D de 2018.
- ✓ Comparar los requerimientos de diseño según la norma API 16D de 2018 de los acumuladores en taladros aleatorios de referencia respecto a las condiciones operativas actuales.

En síntesis, este trabajo de grado se conforma por un total de cuatro (4) capítulos, correspondientes a:

---

\* Se sugiere consultar los siguientes títulos:

1. Current accumulator design methods are inadequate for deep water drilling;
2. Bop subsea hydraulic accumulator energy availability, how to ensure you have what you need;
3. Mathematical prediction and experimental verification of deep water accumulator capacity.

1. Marco teórico, donde se incluyen las generalidades sobre el control de pozos y a las generalidades sobre el diseño de acumuladores;
2. Metodología de la investigación y datos, que contiene la identificación de ecuaciones y variables pertinentes, y una explicación detallada sobre el procedimiento seguido para diseñar la herramienta;
3. Resultados de la investigación y análisis, donde se presenta la información obtenida de la verificación del funcionamiento de la herramienta, en cuanto a la reproducción de escenarios operativos, y los resultados de la comparación realizada en los taladros aleatorios seleccionados;
4. Conclusiones de la investigación.

## 1. MARCO TEÓRICO

Este capítulo corresponde al marco de referencia conceptual en el que se desarrolla y se consolida la información teórica que fundamenta la presente investigación. La cual es fundamental para entender los conceptos que se trataran a lo largo del presente trabajo. Adicionalmente, son esenciales para comprender el dimensionamiento físico de cada variable, tanto de entrada como de salida, de la herramienta AC-GLOR, desarrollo central de este proyecto de investigación.

A continuación, se presenta una breve descripción sobre las generalidades del control de pozos, que incluye los sistemas de control de pozos y los equipos acumuladores de fluido hidráulico. Adicionalmente, se presenta una sección sobre las generalidades para el diseño de acumuladores, en la que se hace referencia a los parámetros y los métodos de diseño de acumuladores. Dicha sección se encuentra realizada con base en todas las estipulaciones que se anuncian en la norma API 16D de 2018.

### 1.1 GENERALIDADES DEL CONTROL DE POZOS

El control de pozos corresponde a una secuencia de procedimientos que tienen el objetivo de prevenir el flujo no controlado de fluidos de la formación, hacia la superficie. Abarca operaciones para realizar cierres en un pozo, deteniendo la migración de fluidos al interior del mismo, y compensando la presión de la formación con la presión hidrostática, mediante el acondicionamiento de la densidad del fluido de control (lodo de perforación).

El flujo no controlado de fluidos desde la formación hacia el pozo, se denomina influjo, el cual puede ocurrir de dos maneras durante las operaciones de perforación, completamiento y *workover*. La primera forma de ocurrencia se conoce como arremetida generada por una condición de bajo balance, que se produce cuando la presión hidrostática de la columna del lodo es menor que la presión de poro de la formación. La segunda modalidad en la que se induce un influjo, se debe a que las condiciones dinámicas en el pozo, como el *swabbing* o el efecto pistón, producen una disminución considerable en la presión de fondo, que, al caer por debajo de la presión de poro, induce la arremetida de fluidos de formación.

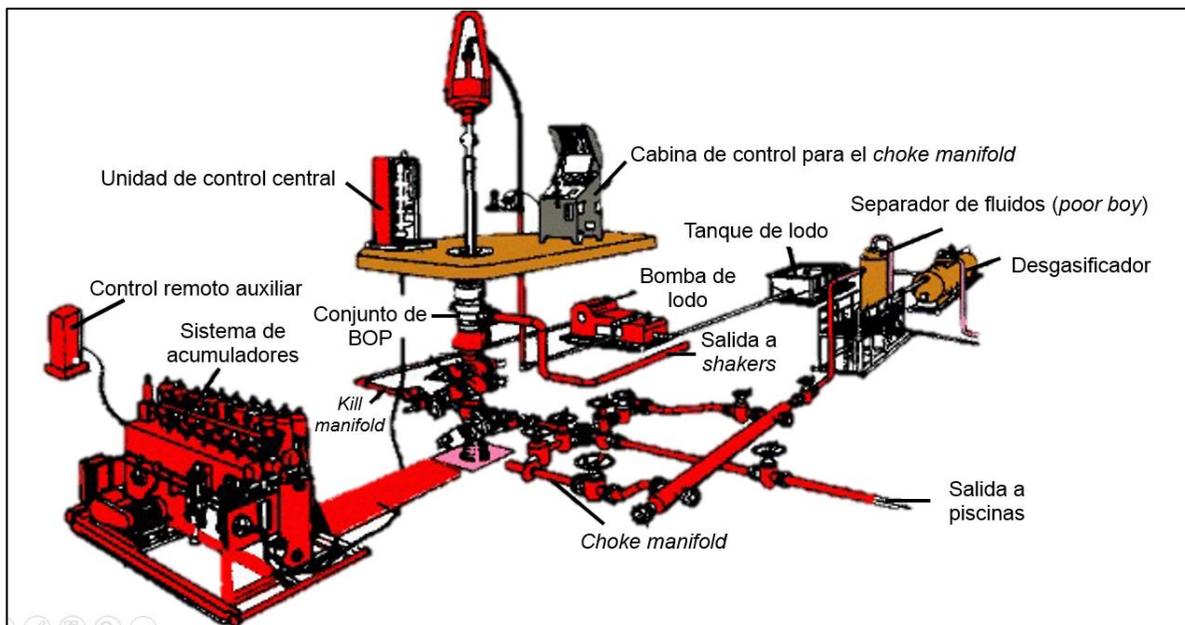
Los influjos pueden ser fácilmente detectados a partir de indicadores positivos o señales de advertencia, dentro de los cuales están incluidos: cambios bruscos en los parámetros de perforación, aumento de la velocidad de flujo de retorno, disminución de la presión de circulación, aumento en la velocidad de la bomba, aumento en el volumen de los tanques de retorno (también conocido como ganancia en los tanques), lodo cortado por gas, aumento del efecto de arrastre generado por las condiciones de fricción en el pozo, cambio en las propiedades del lodo durante la circulación, y aumento del peso de la sarta generado por la disminución del factor de flotabilidad.

Ante la presencia de estos indicadores positivos y/o señales de advertencia, se hace necesario confirmar que efectivamente existe un influjo, mediante el chequeo de flujo en el pozo (presencia de flujo con bombas apagadas), y la verificación del aumento del caudal en la línea de retorno y del incremento del nivel en los tanques. Una vez confirmado el escenario operativo descrito, el pozo debe ser cerrado mediante las preventoras de influjos (BOP), mientras se realiza el procedimiento para reacondicionar el fluido de control.

**1.1.1 Sistema de control de influjos en el pozo.** Es una unidad de potencia hidráulica de alta presión, que permite, como barrera secundaria de integridad, sellar el pozo. Durante el cierre del pozo, se espera restaurar las propiedades del fluido de control quien, como barrera primaria de integridad, permitirá garantizar el restablecimiento de la condición de balance; y así evitar un escenario de descontrol durante las operaciones en el pozo.

Un sistema típico de control de pozos, incluye todo un conjunto de equipos que permiten cumplir con los criterios operativos y económicos específicos de la operación. Estos equipos corresponden a preventores (BOP), válvulas de restricción de flujo, estranguladores (*choke*), juego de válvulas de control de presión (*manifold*), separadores de fluidos (*poor boy*), y acumuladores. A continuación, en la **Figura 1** se presenta un esquema general de un sistema de control de pozos.

**Figura 1.** Sistema de control de pozos.



**Fuente:** CHOONG, K. *Basics of well control*. [En línea]. 2013. Disponible en: <https://www.scribd.com/doc/150835309/Basic-of-Well-Control-ppt>

**1.1.2 Equipos acumuladores de fluido hidráulico.** Los acumuladores, desempeñan un papel fundamental en las operaciones de control, puesto que son los dispositivos que accionan el funcionamiento de las barreras secundarias del pozo, las cuales permitirán cerrarlo y controlarlo de forma segura. Según la norma internacional ASME se define un acumulador como un recipiente a presión cargado con gas inerte y utilizado para almacenar fluido hidráulico bajo presión<sup>2</sup>. El diseño y el funcionamiento de los equipos acumuladores de fluido hidráulico se ha desarrollado bajo las premisas establecidas por el estándar 53 de la norma API<sup>3</sup>:

- ✓ Se requiere la utilización de un gas inerte como nitrógeno o helio, para los acumuladores de precarga;
- ✓ No se utilizará aire atmosférico ni oxígeno;
- ✓ El gas utilizado se ajustará al diseño del acumulador requerido para el escenario de operación;
- ✓ Los acumuladores submarinos se descargarán bajo la superficie marina antes de recuperar el conjunto de preventores en superficie o incluirán un dispositivo de alivio para evitar la sobre presurización de todo el circuito.

El funcionamiento de un sistema de acumulación, presentado en la **Figura 2**, comienza con la presurización del fluido hidráulico que se encuentra en los tanques de reserva, a través de las bombas, eléctrica como fuente primaria y neumática como fuente secundaria. El fluido se presuriza desde la presión mínima de operación (MOP) hasta la presión máxima de operación.

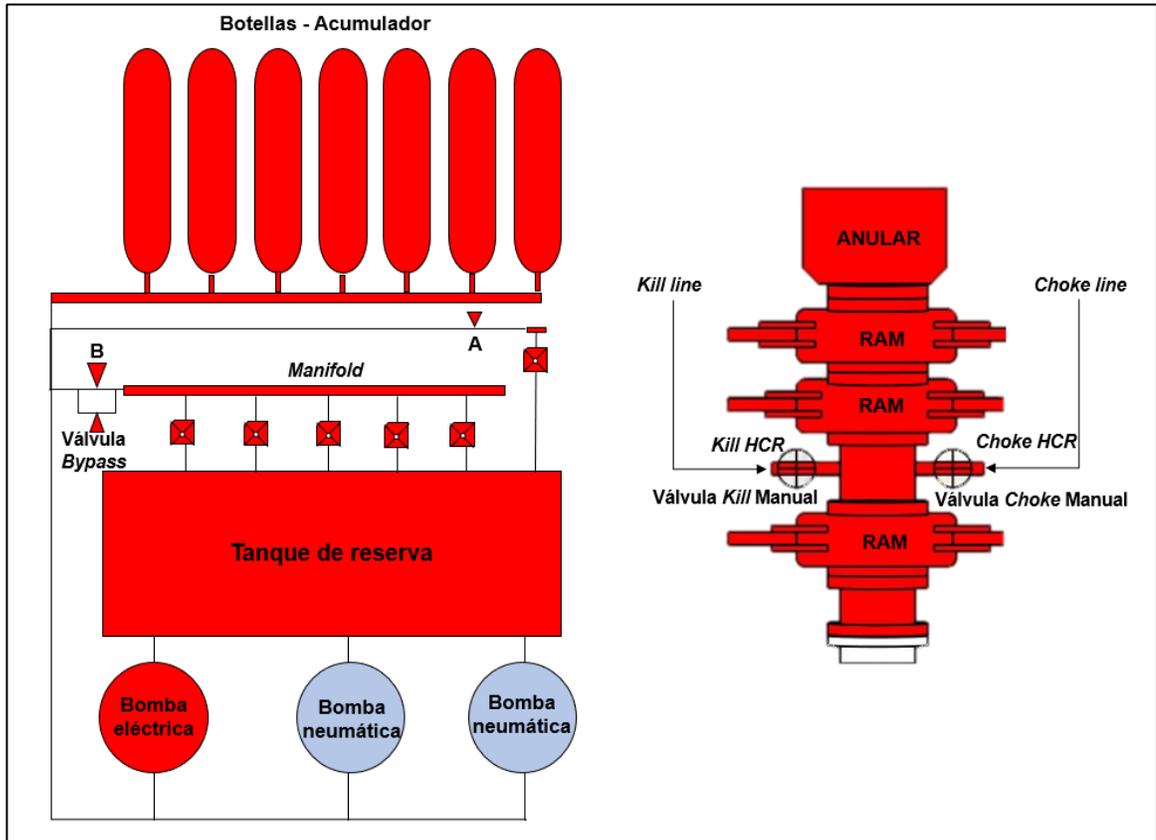
Una vez el fluido hidráulico comienza entrar a las botellas del acumulador, éste comprime el gas inerte alojado en el dispositivo, y el efecto posterior de expansión del gas inerte genera la expulsión de dicho fluido del módulo con la presión de trabajo, a través de las válvulas de cuatro (4) vías tres (3) posiciones. Así entonces, se acciona el sistema de apertura o de cierre de los preventores, los cuales sellaran el pozo en eventos de descontrol por influjos o de condiciones operativas normales. Para que la operación sea segura, es necesario contar con ciertos paneles de control los cuales deben estar ubicados directamente en el acumulador y en una ubicación de fácil acceso para toda la cuadrilla. Este panel debe contar con tres (3) barómetros (acumulador, manifold y anular), funciones “a doble mano”, bypass de la válvula reguladora del manifold para poder cortar tubería, y, por último, testigos que permitan conocer las posiciones de las válvulas de cuatro (4) vías tres (3) posiciones (**Figura 2**).

---

<sup>2</sup> ASME. *AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS*. 2018. p. 11.

<sup>3</sup> API. *AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 53 Well Control Equipment Systems for Drilling Wells*. 2018. p. 24.

**Figura 2.** Sistema de acumulación de equipos de control de pozo.



**Fuente:** S.A. ACCUMULATOR (KOOEMEY). *Oil Well Cementing, Well Control*. [En línea]. 2019. Disponible en: <http://www.drillingformulas.com/accumulator-koomey/>

## 1.2 GENERALIDADES PARA EL DISEÑO DE ACUMULADORES

Los acumuladores, como dispositivos de almacenamiento de presión hidráulica, tienen características específicas dadas las condiciones operativas del pozo en análisis. Es decir, sus parámetros de diseño tienen que satisfacer los requerimientos concretos de la operación que se esté llevando a cabo.

Para ello, es de vital importancia realizar un diseño acorde a las condiciones a las cuales el dispositivo será sometido, y que, de la misma manera, cumpla con la normatividad establecida para dicho diseño.

Colombia, dentro de su marco legislativo, establece mediante el decreto 1073 del 2015 y el artículo 2.2.1.1.1.5 “Estándares y normas para la exploración y explotación de los yacimientos convencionales continentales y costa afuera”; que todas las actividades de exploración y explotación de los hidrocarburos se deben ejecutar bajo las normas técnicas y estándares nacionales e internacionales. Entre ellas, nombra particularmente las normas NORSHOK para integridad de pozos, y todos

los estándares desarrollados por el instituto americano del petróleo (API) en operaciones de perforación y reacondicionamiento de pozos.

Para que entonces, los diseños de los acumuladores se encuentren bajo las regulaciones, es necesario regir los cálculos bajo las estipulaciones que anuncia el API, concretamente la especificación técnica 16D del 2018. En dónde se anuncian, procedimientos, métodos y variables a considerar para el diseño de acumuladores de control de pozos, con el fin de que la planeación y la ejecución de las operaciones sean seguras y efectivas.

**1.2.1 Parámetros para el diseño de acumuladores.** Los dispositivos de almacenamiento hidráulico, como su nombre lo indica, tienen una capacidad de acopio determinada, este parámetro, que especifica el máximo volumen que puede almacenar, se vuelve en la variable de diseño más importante, al igual que la presión con la que dicho dispositivo debe ser precargado.

La capacidad requerida del acumulador es el volumen necesario (a una temperatura y presión de precarga dada) que debe tener el dispositivo para poder proveer al sistema su debido volumen funcional requerido. Es decir, la capacidad que tenga el acumulador será definida como el volumen que éste albergará como volumen de fluido hidráulico funcional para la operación de los sistemas de control de pozo, como preventoras y válvulas de cierre.

Como se ha visto anteriormente, un acumulador se define básicamente por un solo valor físico, el cual es su capacidad; pero dicha cantidad está determinada por otras características que pueden llegar a definir un estado termodinámico de los fluidos que éste puede contener. Un ejemplo de dichas características es la presión, la cual se puede definir como la relación existente entre la aplicación de una fuerza sobre un área. Para términos de este trabajo tendremos en cuenta los dos tipos de presión a considerar:

- ✓ Presión absoluta: Presión referenciada en contra de una situación de vacío
- ✓ Presión diferencial: La diferencia de presión existente entre dos puntos de referencia
- ✓ Presión manométrica: Diferencial de presión relativo a la presión ambiental de referencia

De la misma manera en que se define la presión como unidad física, ésta se puede asociar directamente a características netas del funcionamiento del acumulador. Las presiones que definen dicho dispositivo son dos a saber: RWP y MOP.

La RWP es la presión nominal de trabajo, es decir que es la máxima presión interna a la cual el equipo está diseñado para contener o controlar bajo condiciones operativas normales; mientras que la MOP es la mínima presión de operación,

definida como el mínimo diferencial de presión requerido por el dispositivo para desempeñar exitosamente su función específica en un ambiente particular.

La presión es entonces uno de los parámetros más importantes a tener en cuenta durante el diseño de acumuladores como equipos de control de pozos, pero es de la misma forma relevante establecer que otros parámetros pueden llegar a afectar tanto su diseño como desempeño, es por eso que al contemplar un acumulador como un dispositivo necesario durante la perforación de pozos petroleros, se infiere que dichos dispositivos se encuentran a la intemperie, es decir son afectados por las condiciones ambientales a las cuales están sometidos. De los parámetros más representativos que intervienen en el funcionamiento del acumulador se encuentra tanto la presión como la temperatura. Dichas variables afectan especialmente a el gas inerte alojado en el dispositivo, determinando así su estado termodinámico.

Al tener ciertas afectaciones ambientales, es necesario considerarlas durante el proceso del diseño, y para ello es ineludible determinar las eficiencias volumétricas del dispositivo, tanto a una condición limitada de volumen como de presión. Estas condiciones previamente nombradas se definen como:

- ✓ Eficiencia volumétrica – volumen limitado: Se define como la relación existente entre el fluido de control entregable a una condición mayor que la presión atmosférica donde se puede encontrar el acumulador y el volumen total de gas alojado en dicho dispositivo
- ✓ Eficiencia volumétrica – presión limitada: Se define como la relación existente entre el fluido de control entregable a una condición mayor que la mínima presión de operación (MOP) del acumulador y el volumen total de gas alojado en dicho dispositivo

Es relevante anunciar, que, para realizar los cálculos de diseño, la especificación técnica API 16D de 2018 estipula que la eficiencia volumétrica de todo el sistema será el menor valor entre la eficiencia volumétrica a presión limitada y la eficiencia volumétrica a volumen limitado.

**1.2.2 Condiciones operativas del acumulador.** Como se ha descrito en este trabajo, el acumulador es un dispositivo el cual almacena fluido hidráulico que permite accionar todos los equipos de control de pozo. Para que esta operación se lleve a cabo se tienen que llevar a cabo ciertas etapas; estas son denominadas las condiciones de operación del acumulador.

**1.2.2.1 Condición cero (0): Precarga.** En esta condición operativa, el gas del dispositivo se encuentra en un estado previo a que el acumulador sea cargado con presión por el suministro hidráulico.

Es importante resaltar que, en esta condición, una vez se especifique la presión de precarga, se debe incluir una temperatura adecuada en el diseño, la cual sea capaz

de satisfacer la necesidad de densidad del gas escogido. Así mismo, la presión de precarga escogida no puede exceder de ninguna manera la presión que tendrá el equipo cuando se encuentre en su máxima temperatura.

**1.2.2.2 Condición uno (1): Carga.** En esta condición operativa, el gas del dispositivo será cargado con presión por el suministro hidráulico.

De la misma manera, cabe resaltar que el conjunto del acumulador donde la presión de carga fluctúe, ésta debe ser calculada con la presión de arranque de bombeo.

**1.2.2.3 Condición dos (2): Mínima presión de operación.** Condición operativa del gas en el acumulador, en el cual es presurizado hidráulicamente hasta la mínima presión permitida para que pueda ejecutar adecuadamente las funciones requeridas.

**1.2.2.4 Condición tres (3): Descarga total.** Condición operativa del gas en el acumulador, donde el volumen hidráulico ha sido descargado completamente.

**1.2.3 Métodos para el diseño de acumuladores.** El diseño de dispositivos hidráulicos como los acumuladores demandan una serie de cálculos matemáticos que tienen en cuenta el estado termodinámico de los fluidos a distintas condiciones de presión y temperatura. Es por eso, que es importante tener en cuenta como las condiciones previamente mencionadas (precarga, carga, MOP, descarga total) serán llevadas a cabo, debido a que según sea su condición termodinámica, se definirán los parámetros de diseño del equipo.

Teniendo en cuenta las distintas condiciones termodinámicas, los estándares API han generado distintos métodos para analizar el comportamiento termodinámico del funcionamiento de los acumuladores; dichos métodos se describen a continuación:

**1.2.3.1 Método A.** Esta metodología describe que el diseño del dispositivo se da en condiciones ideales, es decir, el gas inerte alojado en el acumulador no presenta transferencia de masa o calor durante el accionamiento del equipo. Además de esta premisa, se asumen presiones de precarga estándar según el rendimiento del acumulador, para poder simplificar los cálculos de diseño. Dicho estándar en Colombia es fijado en mil (1000) libras por pulgada cuadrada (psi).

El método A fue retirado en la tercera edición de API 16D y no se utilizará para los cálculos del diseño del acumulador para el sistema de control de pozos.<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> API. *AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 53 Well Control Equipment Systems for Drilling Wells*. 2018. p. 84.

**1.2.3.2 Método B.** Este procedimiento de cálculo de la situación de análisis tiene variaciones respecto a las premisas sustentadas en el método A. Estos estudios numéricos se basan en gases reales y sus propiedades, Así como la asunción de una descarga isotérmica del gas. Gracias a esta condición termodinámica, el estándar API 16D del 2018 asigna un factor de corrección de 1.4 y 1.0 por volumen limitado y por presión limitada, respectivamente.

**1.2.3.3 Método C.** En esta situación de diseño los cálculos deben utilizar propiedades de los gases reales, así como la asunción de una descarga adiabática del gas. Debido a esta condición termodinámica, el estándar API 16D de 2018 asigna un factor de 1.1 tanto para volumen limitado como presión limitada.

Como generalidades de los métodos B y C es de suma importancia mencionar que los dos proveen el mismo valor de fluido hidráulico almacenado. La diferencia entre los métodos radica en como la descarga será calculada, siendo isotérmica y adiabática respectivamente. La descarga adiabática anuncia que no existe transferencia de calor en el gas, lo cual desata como consecuencia que; mientras el gas se enfría significativamente, la presión será reducida.

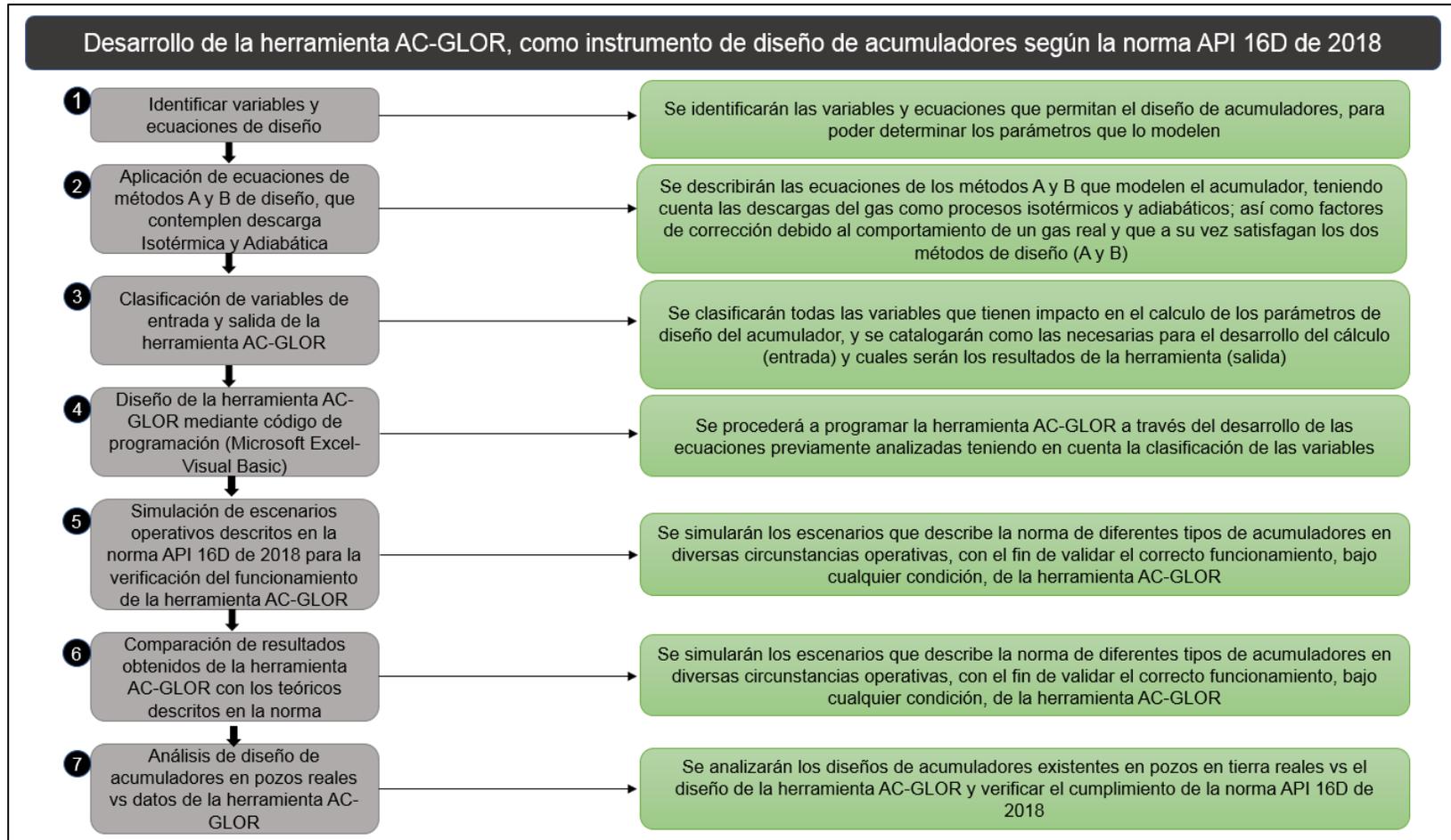
## 2. METODOLOGÍA Y DATOS

La herramienta AC-GLOR será un instrumento digital que permita el cálculo de los parámetros de diseño de acumuladores en operaciones de perforación de pozos petroleros. Para poder diseñar dicha herramienta, es necesario seguir un procedimiento y secuencia que permita la ejecución exitosa de este proyecto.

Para desarrollar y validar la herramienta AC-GLOR, es necesario ejecutar siete pasos esenciales, los cuales permiten seguir una metodología acorde al objetivo principal de este trabajo, el cual es el desarrollo de un instrumento digital que establezca los criterios de diseño de acumuladores según la norma API 16D de 2018. A continuación, se explicarán los siete pasos para ejecutar dicho objetivo.

Para una mejor explicación de dichos pasos, se presenta la **Figura 3**, donde se especifica la secuencia que se ejecuta para poder realizar el diseño de la herramienta AC-GLOR.

**Figura 3.** Esquema de secuencia para el procedimiento de desarrollo de la herramienta AC-GLOR.



**Fuente:** elaboración propia.

## 2.1 IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES Y ECUACIONES DE DISEÑO

Para diseñar un acumulador como dispositivo de almacenamiento hidráulico es necesario señalar que existen tres variables que lo caracterizan como dispositivo único y útil en condiciones operativas específicas. Dichas variables corresponden a la capacidad requerida del acumulador, número de botellas del dispositivo y presión de precarga del equipo.

Para poder determinar las variables anteriormente nombradas, es necesario describir una serie de ecuaciones que permiten el modelamiento del sistema en condiciones reales y teniendo en cuenta que, según la norma, es obligatorio contemplar tanto una descarga del gas isotérmica como una descarga adiabática.

**2.1.1 Variables de diseño del acumulador.** Como se ha mencionado anteriormente, existen variables que determinan el diseño del acumulador, es decir, al modelar matemáticamente dichas variables, se encuentran las especificaciones técnicas necesarias para el equipo de control de pozo óptimo para unas condiciones operativas específicas.

**2.1.1.1 Capacidad requerida del acumulador.** Una de las variables más importantes que definen un equipo de almacenamiento hidráulico es su capacidad requerida, que está definida como el volumen necesario, dada una temperatura y una presión de precarga, para suministrar el volumen funcional requerido (VFR- volumen de fluido hidráulico necesario para accionar el equipo de control de pozo específico). Es de suma importancia nombrar que los cálculos que se llevaran a cabo en este documento satisfacen cualquier capacidad de botella de acumulador, aclarando que el volumen estándar para la operación en Colombia es usualmente diez (10) galones.

En primer lugar, el parámetro de dimensionamiento (CRA), que corresponde a la capacidad requerida del acumulador, según sea su tipo, viene dado por la **Ecuación 1 a la 3**.

**Ecuación 1.** CRA para sistemas de acumuladores generales.

$$CRA = \frac{VFR}{\min(EV_V, EV_P)}$$

**Fuente:** API. *AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 16D Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment* 2018. p. 83.

En la ecuación anterior se puede observar que la capacidad requerida del acumulador, definida como “CRA”, es dependiente de variables tales como: El

volumen funcional requerido (VFR), la eficiencia volumétrica del acumulador a una condición de volumen limitado (EVv) y a una condición de presión limitada (EVp).

**Ecuación 2.** CRA para sistemas de acumuladores generales montados en superficie.

$$CRA_{sup} = \frac{VFR - (VB_{CM} * \min (EV_{VCM}, EV_{PCM}))}{\min (EV_{Vsup}, EV_{Psup})}$$

**Fuente:** API. *AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 16D Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment* 2018. p. 83.

En el caso de la **Ecuación 2**, se denota que la capacidad requerida del dispositivo montado en superficie depende de variables descritas como: Volumen de cada botella del acumulador (VB), eficiencias volumétricas (EV) a condiciones de presión y volumen limitado para equipos montados en superficie.

**Ecuación 3.** CRA para sistemas de acumuladores generales montados en conjunto.

$$CRA_{CM} = \frac{VFR - (VB_{sup} * \min (EV_{sup}, EV_{sup}))}{\min (EV_{VCM}, EV_{PCM})}$$

**Fuente:** API. *AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 16D Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment* 2018. p. 83.

Enfocándonos en la **Ecuación 3**, se puede apreciar que la capacidad del acumulador para equipos montados en conjunto depende de las mismas variables como el volumen de cada botella (VB) y las eficiencias volumétricas (EV) tanto a condiciones de presión limitada como de volumen limitado.

**2.1.1.2 Número de botellas del acumulador.** Anteriormente se describieron las variables que especifican la funcionalidad del dispositivo en cuestión. Entre ellas se nombra el número de botellas del equipo. Éstas, se encuentran definidas como la cantidad de unidades de volumen independiente que satisfacen la capacidad requerida del acumulador en su totalidad.

Es de suma importancia recalcar que el valor de esta variable está sujeto al volumen estándar de botellas que se maneje en las condiciones operativas a aplicar. En Colombia se manejan botellas de diez (10) galones, mientras que la norma referenciada y base de este trabajo (API 16D de 2018) establece que las botellas deben contar con un volumen predeterminado de trece punto ocho (13.8) galones. De esta manera, el cálculo del número de botellas viene dado por la **Ecuación 4**.

**Ecuación 4.** Número de botellas del acumulador.

$$\text{Número de botellas} = \frac{CRA}{VB}$$

**Fuente:** API. *AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 16D Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment* 2018. p. 83.

**2.1.1.3 Presión de precarga del acumulador.** Una de las variables más determinantes al momento de modelar el diseño de un equipo acumulador de presión, es la presión de precarga. Está definida como la presión necesaria para poder cargar el dispositivo hasta una presión mínima de operación.

La presión de precarga está modelada por una serie de ecuaciones que permiten determinar su valor. Así mismo, dicho cálculo matemático dependerá del método que se vaya a emplear, ya sea el Método B o el Método C, quienes contemplan una descarga del gas en el acumulador isotérmica y adiabática respectivamente.

Para determinar el valor de la presión de precarga, es necesario determinar primero, el valor de la densidad de precarga, con el objetivo de traducir su valor termodinámico en un valor de presión, para lo cual es necesario usar la herramienta digital NIST (Véase **ANEXO A**). Para modelar las variables de densidad de precarga, densidad que tendrá el gas al momento de la precarga del acumulador, se utiliza la **Ecuación 5** para el Método B y la **Ecuación 6** para el Método C.

Antes de entrar en detalle en las **Ecuaciones 5 y 6**, es de vital importancia resaltar, que, para una mejor comprensión, en el presente trabajo se encuentran descripciones matemáticas que cuentan con distintos valores de densidad. Dichos valores que se encontrarán desde esta sección en adelante tendrán la siguiente denotación:

Densidad ( $\rho$ )<sub>a-b-c</sub>.

Las notaciones “a, b, c” que tendrán cada valor de densidad tienen un significado. El primer ítem (a) denotará la condición en la que se encuentra el acumulador en el momento de determinar dicha propiedad física, es decir, si el dispositivo se encuentra en precarga (0), carga (1), MOP (2) o descarga total (3). Como segundo ítem (b) se tiene que éste determina el método de cálculo de densidad, es decir si este valor se está especificando para el método B (descarga isotérmica) o el método C (descarga adiabática) detallado en la norma API 16D. Como último ítem (c) se especifica el rango de temperatura al cual se está calculando la densidad, siendo “H” alta temperatura y “L” baja temperatura.

**Ecuación 5.** Densidad de Precarga Método B.

$$\rho_{0B} = \frac{1}{\frac{1,4}{\rho_{2BL}} - \frac{1,4}{\rho_{1BL}} + \frac{1}{\rho_{1BH}}}$$

**Fuente:** API. *AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 16D Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment* 2018. p.104.

**Ecuación 6.** Densidad de Precarga Método C.

$$\rho_{0C} = \frac{1}{\frac{1}{\rho_{2CL}} - \frac{1}{\rho_{1CL}} + \frac{1}{\rho_{1CH}}}$$

**Fuente:** API. *AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 16D Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment* 2018. p.104.

Como se observa en la **Ecuación 5** y en la **Ecuación 6**, la densidad de precarga depende de diferentes densidades del gas inerte del acumulador a distintas temperaturas y a distintas condiciones operativas (precarga, carga, MOP, descarga total), así mismo como de factores de corrección que modelan la desviación del comportamiento ideal del gas debido a la compresibilidad que puede llegar a tener dicha sustancia durante la operación del dispositivo acumulador de presión. No obstante, la diferencia entre los dos métodos radica en los factores de corrección, puesto que ellos se encuentran modelando una desviación de las condiciones reales del gas, pero teniendo en cuenta el tipo de descarga, es decir, isotérmica o adiabática.

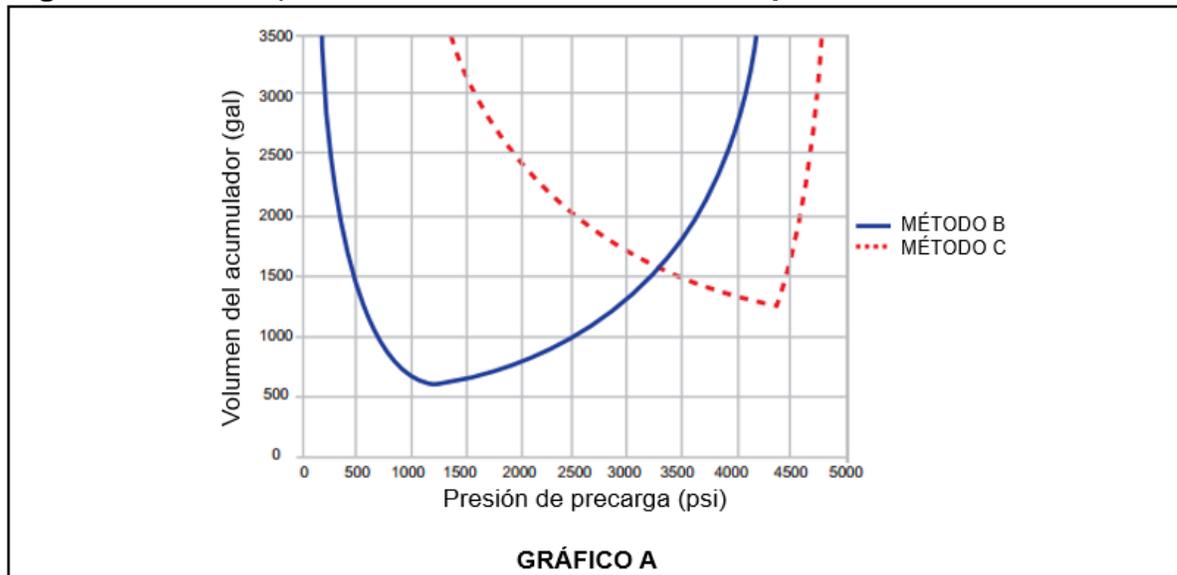
## 2.2. APLICACIÓN DE ECUACIONES DE DISEÑO SEGÚN LOS MÉTODOS B Y C

Según la norma API 16D de 2018, se encuentra detallado que, al diseñar un acumulador, la densidad de precarga calculada debe satisfacer tanto el Método B (descarga isotérmica) como el Método C (descarga adiabática). Esta condición tiene el objetivo de garantizar que el dispositivo en funcionamiento tenga la capacidad de satisfacer cualquier requerimiento para las pruebas de presión normales o para cualquier tipo de eventualidad de control de pozo.

En este orden de ideas, la norma API 16D de 2018 proporciona una serie de gráficos que a modo de curvas tipo, identifican los escenarios en los que la densidad de precarga, convertida en un valor de presión de precarga satisface o no, en simultáneo, las exigencias de los Métodos B y C, en función del volumen de precarga.

Según la norma API 16D de 2018<sup>5</sup>, existen tres posibles escenarios en los cuales se ha modelado el comportamiento tipo de las curvas que establecen la relación generada entre el Método B y el Método C al momento de determinar la presión de precarga, la cual es a su vez, dependiente del requerimiento de volumen funcional del acumulador y las presiones mínimas de operación de cada una de las secuencias. A continuación, se presentan los tres escenarios mencionados en las **Figuras 4-9**, en donde las Gráficas A y B, exponen dos alternativas diferentes en las que se puede encontrar cada uno de los tres escenarios.

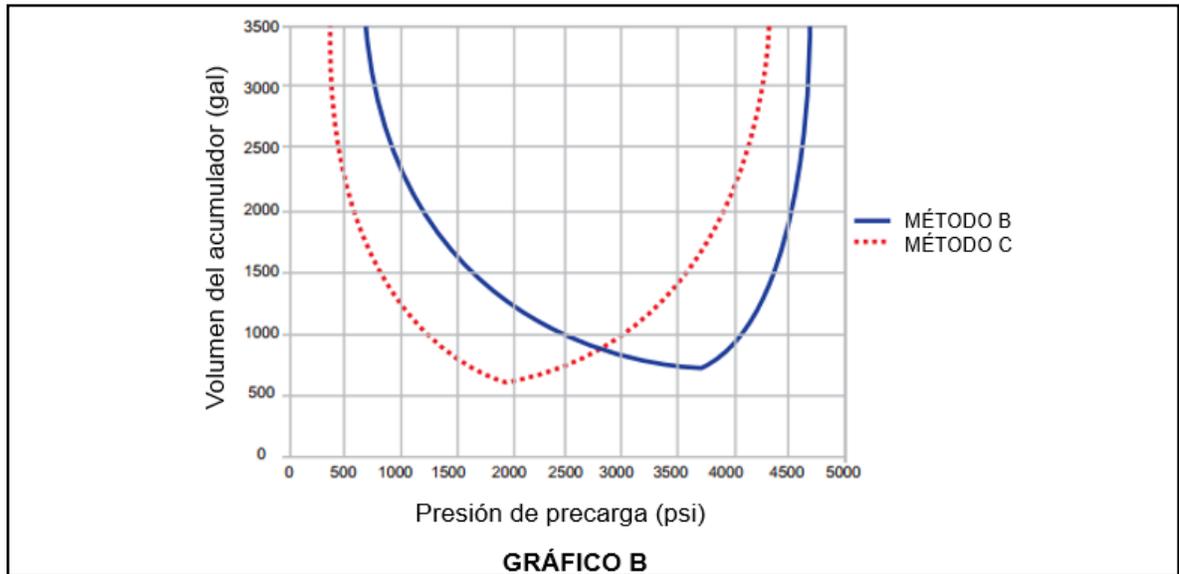
**Figura 4.** Gráfica tipo A de intersección del Método B y el Método C.



**Fuente:** API. *AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 16D Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment* 2018. p. 90.

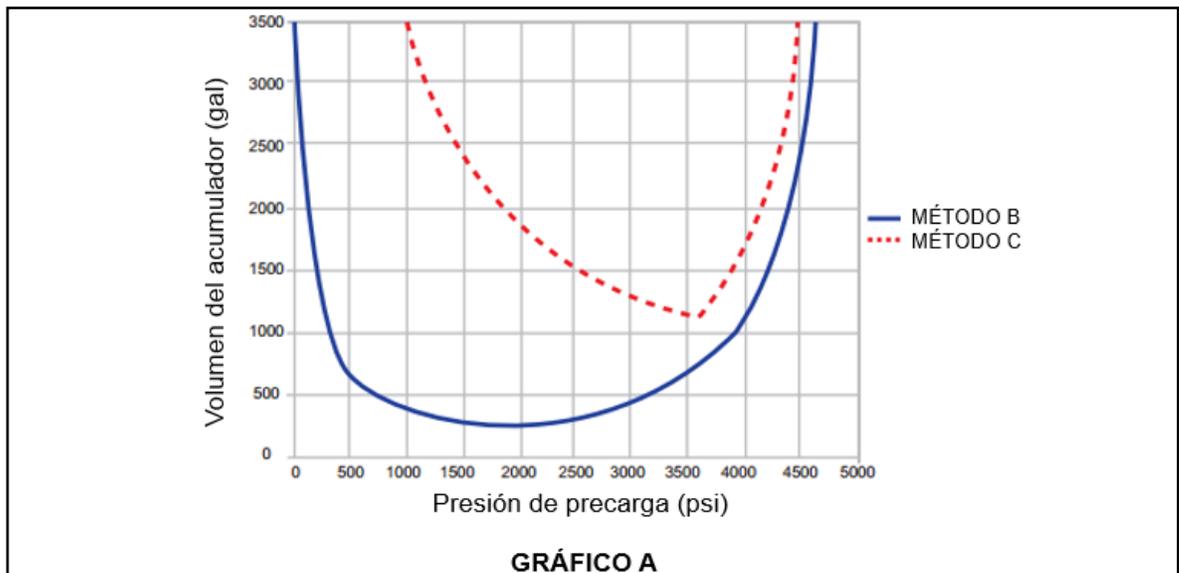
<sup>5</sup> API. *AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 16D Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment* 2018. p. 104.

**Figura 5.** Gráfica tipo B de intersección del Método B y el Método C.



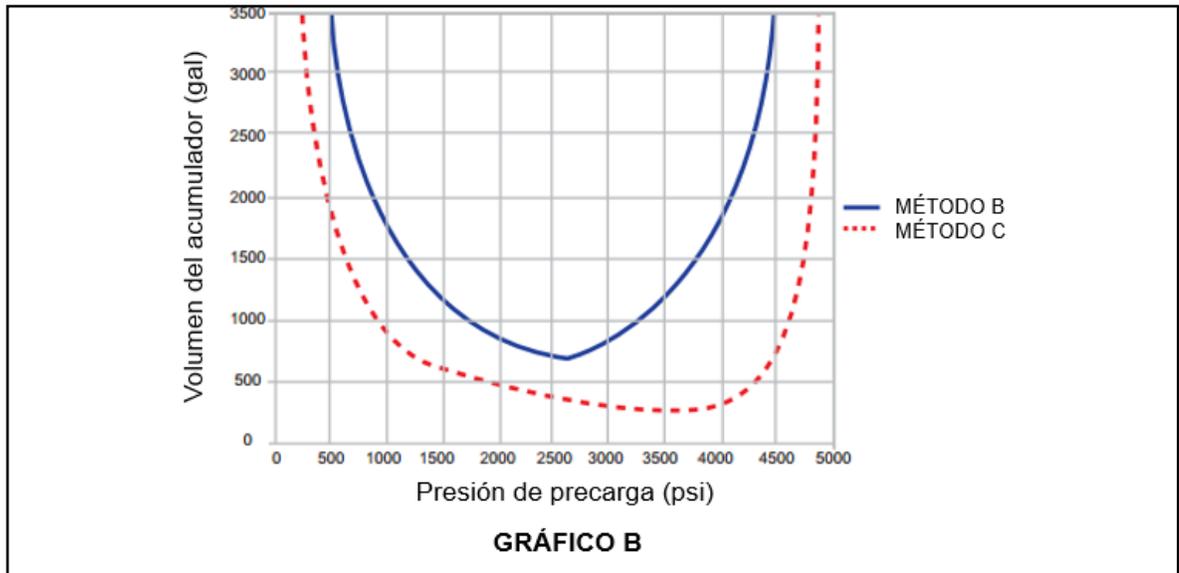
**Fuente:** API. *AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 16D Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment* 2018. p. 90.

**Figura 6.** Gráfica tipo A de curvas sin intersección cuando el Método C tiene una presión de precarga óptima más grande que la del Método B.



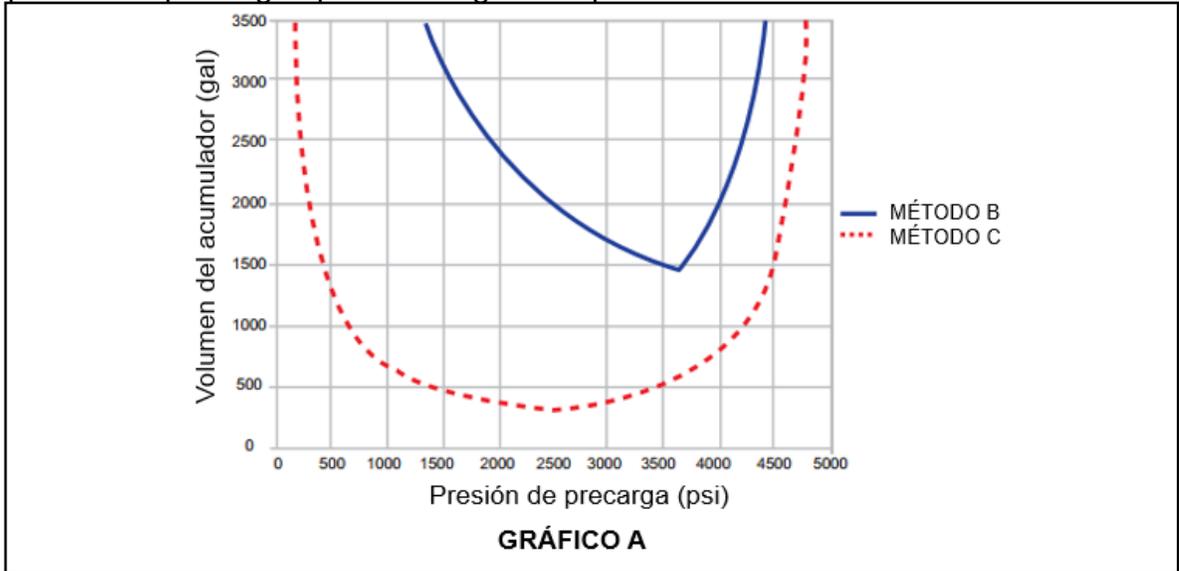
**Fuente:** API. *AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 16D Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment* 2018. p. 91.

**Figura 7.** Gráfica tipo A de curvas sin intersección cuando el Método C tiene una presión de precarga óptima más grande que la del Método B.



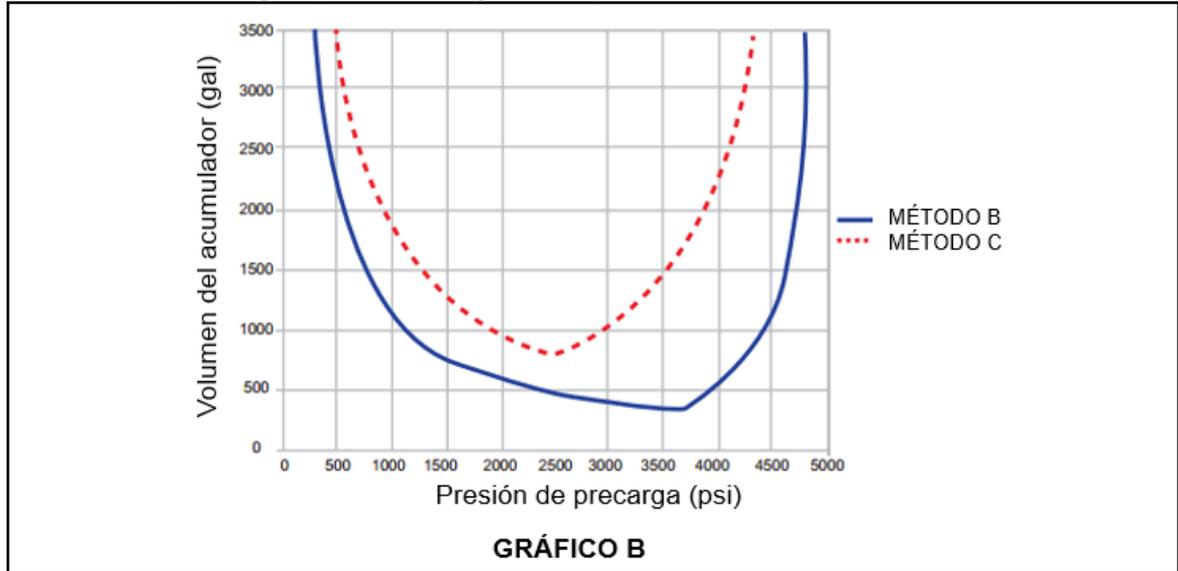
**Fuente:** API. *AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 16D Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment* 2018. p. 91.

**Figura 8.** Gráfica tipo A de curvas sin intersección cuando el Método B tiene una presión de precarga óptima más grande que la del Método C.



**Fuente:** API. *AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 16D Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment* 2018. p. 91.

**Figura 9.** Gráfica tipo B de curvas sin intersección cuando el Método B tiene una presión de precarga óptima más grande que la del Método C.



**Fuente:** API. *AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 16D Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment* 2018. p. 91

Para que el requisito de que la densidad de precarga convertida en presión de precarga satisfaga los requerimientos de los Métodos B y C en simultáneo, es de suma importancia garantizar que las curvas tipo se intersequen tal y como se presenta en la **Figura 4** y **Figura 5**.

Es por esta razón fundamental, que la densidad de precarga no debe ser calculada de forma independiente para cada uno de los métodos como lo sugieren la **Ecuación 5** y la **Ecuación 6**, sino que, por el contrario, es esencial hacer uso de los modelamientos matemáticos sugeridos por la norma, que garantizan puntos de intersección de las curvas de ambos métodos y, con ello, que aseguren el diseño del dispositivo acumulador en cumplimiento con los requerimientos de los Métodos B (descarga isotérmica) y C (descarga adiabática), simultáneamente.

A continuación, se presentan la **Ecuación 7** y la **Ecuación 8** que permiten calcular la densidad de precarga del acumulador a diseñar, bajo las condiciones de desempeño mencionadas anteriormente, a partir de variables que proceden de ambos métodos.

**Ecuación 7.** Densidad óptima de precarga de la intersección de las curvas con eficiencia a volumen limitado.

$$\rho_{XBC} = \frac{1,1 * VFR_C}{(1,4 * VFR_B * \left(\frac{1}{\rho_{2C}} - \frac{1}{\rho_{1C}}\right)) + (1,1 * VFR_C * \frac{1}{\rho_{1B}})}$$

**Fuente:** API. *AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 16D Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment* 2018. p. 92

**Ecuación 8.** Densidad óptima de precarga de la intersección de las curvas con eficiencia a presión limitada.

$$\rho_{XCB} = \frac{VFR_B}{(1,1 * VFR_C * \left(\frac{1}{\rho_{2B}} - \frac{1}{\rho_{1B}}\right)) + (VFR_B * \frac{1}{\rho_{1C}})}$$

**Fuente:** API. *AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 16D Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment* 2018. p. 92

A continuación, se presenta un ejemplo aplicativo, en el cual se calculará la densidad de precarga tanto para el método B como para el método C. Con el objetivo de dar una mejor comprensión al uso y manejo de las ecuaciones previamente mostradas.

Para este ejemplo se utilizará un conjunto de preventoras para taladros en tierra que manejarán 5000 psi de presión estándar, un volumen funcional requerido (sumatoria de volúmenes de cierre y apertura de cada uno de los elementos) de 19,6 galones para *Drawdown test*, y 13,8 galones para operaciones de control. Teniendo en cuenta estos datos, la ejecución de las ecuaciones para determinar la densidad de precarga tanto para el método B, como el método C se presentan a continuación:

$$\rho_{XCB} = \frac{19,6}{\left(1,1 * 13,8 * \left(\frac{1}{7,444} - \frac{1}{14,037}\right)\right) + \left(19,6 * \frac{1}{12,819}\right)}$$

$$\rho_{XCB} = 7,8819$$

$$\rho_{XBC} = \frac{1,1 * 13,8}{\left(1,4 * 19,6 * \left(\frac{1}{9,451} - \frac{1}{12,819}\right)\right) + (1,1 * 13,8 * \frac{1}{14,037})}$$

$$\rho_{XBC} = 8,231$$

Como se pudo apreciar anteriormente, se contempla un ejemplo de la implementación de las ecuaciones de densidad de precarga para los dos distintos métodos de cálculo, tanto para una descarga isotérmica como una descarga adiabática. Es importante recalcar que los valores de densidad se obtienen mediante el modelamiento de las propiedades del gas en la herramienta digital NIST explicado en el **ANEXO A**.

### 2.3 CLASIFICACIÓN DE VARIABLES DE ENTRADA Y SALIDA DE LA HERRAMIENTA AC-GLOR

Ahora bien, es fundamental identificar los datos obligatorios requeridos para ser ingresados en la interfaz de entrada de la herramienta, para que, una vez ingresados, la herramienta esté en capacidad de realizar los cálculos de diseño correspondientes 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 de salida se presentan en el **Cuadro 1**.

**Cuadro 1.** Discretización de variables de la herramienta AC-GLOR.

VARIABLES DE LA HERRAMIENTA AC-GLOR					TIPO DE VARIABLE	
					ENTRADA	SALIDA
<b>ANULAR</b>						
RWP (psia)	:MOP (psia)	:VOL DE CIERRE (gal)	:VOL DE APERTURA (gal)	:RELACIÓN DE CIERRE	X	
<b>RAM</b>						
RWP (psia)	:MOP (psia)	:VOL DE CIERRE (gal)	:VOL DE APERTURA (gal)	:RELACIÓN DE CIERRE	X	
<b>CHOKE Y VALVULA DE MATAR</b>						
RWP (psia)	:MOP (psia)	:VOL DE CIERRE (gal)	:VOL DE APERTURA (gal)	:RELACIÓN DE CIERRE	X	
<b>PARÁMETROS DEL SISTEMA</b>						
PRESIÓN DEL SISTEMA			TIPO DE GAS DE PRECARGA		X	
<b>CONDICIONES AMBIENTALES</b>						
TEMP DE SUPERFICIE	:RANGO DE TEMP	:TEMP MIN	:TEMP MAX	:PRESIÓN ATMOSFÉRICA	X	
<b>PARÁMETROS DE DISEÑO DEL ACUMULADOR</b>						
VOL REQUERIDO DEL ACUMULADOR		#BOTELLAS DEL ACUMULADOR		:PRESIÓN DE PRECARGA		X

**Fuente:** elaboración propia.

Como se puede apreciar en el **Cuadro 1** las variables de entrada, necesarias para el modelamiento del diseño, están segmentadas en dos grandes grupos. El primero se refiere a las condiciones técnicas y operativas de las barreras secundarias que se emplearán en la perforación del pozo. Estos datos de entrada son especificaciones provenientes del fabricante y necesarios para determinar los cálculos del diseño, específicamente el volumen funcional requerido del acumulador.

Por otro lado, el segundo grupo de datos de entrada, corresponde a las condiciones del sistema y a los parámetros ambientales. La norma API 16D de 2018, establece los rangos en los cuales estas variables fluctuarán, lo que, por supuesto, tendrá una incidencia importante en el valor de los parámetros de salida. Como se ha mencionado anteriormente, el cálculo de los factores de diseño se basa esencialmente en determinar el valor de las condiciones termodinámicas del gas. Para ello, es necesario conocer las condiciones ambientales, las cuales determinarán el estado del fluido y las propiedades fisicoquímicas que posee en determinado momento.

En último lugar tenemos las variables de salida, o resultados del procesamiento lógico de la herramienta. En este grupo nos encontramos con las tres variables que anteriormente hemos observado que describe las especificaciones del acumulador. Estas variables de salida son: Presión óptima de precarga, capacidad requerida del acumulador y el número de botellas del dispositivo hidráulico.

## **2.4 DISEÑO DE LA HERRAMIENTA AC-GLOR**

La herramienta digital que establecerá los parámetros de diseño de acumuladores de perforación según la norma API 16D de 2018, se programará mediante los esquemas algorítmicos y el lenguaje de programación que ofrecen las plataformas de Microsoft Excel y Visual Basic.

Para la ejecución del proyecto se requieren tres esquemas básicos secuenciales. Estos esquemas son denominados: entrada de datos, análisis operacional, y desarrollo algorítmico y resultados.

**2.4.1 Entrada de datos a la herramienta AC-GLOR.** En esta etapa de la arquitectura de la herramienta digital, se diseña una interfaz de entrada de datos mediante las funciones de Visual Basic, que permita al usuario ingresar todos los datos que son requeridos para la realización del cálculo de los parámetros de diseño, tal y como se muestra en el **Cuadro 1**. Una vez, estos datos sean diligenciados, la macro está programada para que los valores ingresados sean insertados en las celdas correspondientes del libro de Excel, tal y como se presenta en el **Cuadro 2**.

**Cuadro 2.** Esquema de organización de datos de entrada en la herramienta AC-GLOR.

INPUT	TRANSFERIDO	CALCULADO	LIST
STACK	RWP	MOP	VOL CIERRE (GAL)
ANULAR BOB 9"			
RAM CIEGO 9"			
RAM TUBERIA 9"			
CHOKE Y VALVULA DE MATAR			
VOL APERTURA (GAL)			
RELACION DE CIRRE			
PARÁMETROS DEL SISTEMA			
PRESIÓN DEL SISTEMA	Psig	GAS DE PRECARGA	NITROGENO
CONDICIONES AMBIENTALES			
EMP DE SUPERFICIE EN LA PRECARGA	"F	SISTEMA PPAL DE BOMBEO	
RANGO DE TEMP (+/-°F)	"F	Bombeo ppal empieza al 90% de la RWP	
MIN TEMP SUPERFICIE	"F	Bombeo ppal termina entre el 98% y 100% de la RWP	
MAX TEMP SUPERFICIE	"F	PRUEBA DRAWDOWN	
PRESIÓN ATMOSFÉRICA	Psia	Cerrar rams, abrir valvula, cerrar anular	
		CONTROL DE POZO	
		Cerrar anular y ram	

**Fuente:** elaboración propia.

**2.4.2 Análisis operacional de la herramienta AC-GLOR.** En esta sección del diseño de la herramienta digital se especifican las condiciones operacionales del acumulador, a partir de las cuales se lleva a cabo el diseño. Para ello es de suma importancia identificar las variables que no son de entrada, pero que, como variables intermedias de cómputo, son necesarias para realizar los cálculos posteriores de diseño. A continuación, se presentan las variables necesarias a determinar para proceder con el diseño del acumulador en cuestión.

- ✓ Presión de cierre en contra de la RWP
- ✓ Volumen funcional requerido (Método B y Método C)
- ✓ Presión requerida (Método B y Método C)
- ✓ Presión de arranque de bombeo
- ✓ Presión de parada de bombeo

A partir de los datos de entrada ingresados por el usuario, las cinco variables intermedias enlistadas anteriormente, se calculan mediante las **Ecuaciones 9-14**.

**Ecuación 9.** Presión de cierre en contra de la RWP.

$$P_{eRWP} = \frac{RWP}{RC}$$

**Fuente:** API. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 16D Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment 2018. p. 104

**Ecuación 10.** Volumen funcional requerido para el Método B.

$$VFR_B = V_{cierre_{ANULAR}} + \sum V_{cierre_{RAMS}} + V_{apertura_{CHOKE}}$$

**Fuente:** API. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 16D Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment 2018. p. 104

**Ecuación 11.** Volumen funcional requerido para el Método C.

$$VFR_C = V_{cierre_{ANULAR}} + \sum V_{cierre_{RAMS}}$$

**Fuente:** API. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 16D Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment 2018. p. 104

**Ecuación 12.** Presión requerida para ejecutar métodos.

$$P_{REQUERIDA} = \sum P_{eRWP-rams}$$

**Fuente:** API. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 16D Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment 2018. p. 104

**Ecuación 13.** Presión arranque de bombeo Método B.

$$P_{arranqueA} = P_{bombeo}$$

**Fuente:** API. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 16D Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment 2018. p. 104

**Ecuación 14.** Presión arranque de bombeo Método C.

$$P_{arranqueB} = P_{arranqueA} * 0,9$$

**Fuente:** API. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 16D Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment 2018. p. 104

Una vez se tienen calculados todos los valores para dichas variables intermedias es posible proceder ahora a realizar todos los procedimientos algorítmicos para determinar los parámetros de salida de la herramienta AC-GLOR y encontrar el diseño óptimo de acumulador.

**2.4.3. Desarrollo algorítmico y resultados de la herramienta AC-GLOR.** En esta sección se describe el cuerpo principal del funcionamiento de la herramienta digital. Aquí, se desarrollan todos los cálculos principales que permiten encontrar todos los parámetros que modelan el diseño de equipos acumuladores de presión hidráulica. Debido a que el desarrollo se da como una secuencia lógica y matemática es apropiado segmentar esta sección en tres cálculos principales, los cuales se derivan de las condiciones operativas del acumulador (precarga, carga, y MOP).

Para realizar los cálculos de diseño se omite el cálculo de todos los valores termodinámicos en la condición de descarga total, debido a que esta condición del equipo corresponde al diferencial de presión para mantener en cero (0) psig el acumulador. Por esta razón, el valor de la descarga total no es un parámetro termodinámico representativo para el diseño.

A continuación, se presentan los cálculos y procedimientos necesarios para realizar el diseño del acumulador con base en los datos de entrada de la primera sección y el cálculo de las variables intermedias de la segunda sección.

**2.4.3.1 Condición de carga del acumulador.** Para la condición de carga del equipo, es esencial determinar la presión con la cuál será cargado el acumulador. En otras palabras, es necesario encontrar la fuerza con la que el fluido hidráulico será desplazado a través del área de entrada del acumulador para poder completar la compresión del gas inerte alojado en él. Es importante resaltar que es necesario determinar las presiones de carga tanto para el Método B como para el Método C.

Esta presión de carga del acumulador será la misma presión de arranque de la bomba, para ambos métodos, las cuales se expresan matemáticamente en la **Ecuación 13** y la **Ecuación 14**. Estos valores deben ser consignados en la hoja de cálculo. Sin embargo, para poder determinar cualquier posible escenario de operación, previamente, se deben estipular las presiones de carga para los rangos de temperatura ingresados en la interfaz de entrada de datos. Así entonces, para cada método existe una presión de carga única e igual para las tres temperaturas (normal, baja y alta), lo que no implica que sean iguales entre métodos. La información se registra tal y como se muestra en el **Cuadro 3**.

Es importante estipular que durante el desarrollo de la herramienta AC-GLOR, se manejó un código de colores útil para el diseñador. Dicho código es el siguiente: El color amarillo son todos los datos de entrada a la herramienta, el color verde son los datos calculados, el color azul son datos transferidos a lo largo de toda la hoja de cálculo, y por último, el color rojo son datos provenientes de la herramienta NIST.

**Cuadro 3.** Cálculos de condición de carga en la herramienta AC-GLOR.

CONDICIÓN 1 - DENSIDADES DE CARGA DEL ACUMULADOR	PRESIÓN DEL ACUMULADOR (Psig)	PRESIÓN DEL ACUMULADOR (Psia)	TEMP °F	DENSIDAD (lb/ft <sup>3</sup> ) ρ1	Entropía S1
MÉTODO B					
CONDICIÓN DE CARGA - ALTA TEMP					
CONDICIÓN DE CARGA - TEMP NORMAL					
CONDICIÓN DE CARGA - BAJA TEMP					
MÉTODO C					
CONDICIÓN DE CARGA - ALTA TEMP					
CONDICIÓN DE CARGA - TEMP NORMAL					
CONDICIÓN DE CARGA - BAJA TEMP					

**Fuente:** elaboración propia.

Como se puede observar en el **Cuadro 3**, además de los campos para consignar la presión de carga, están los campos para determinar la densidad y entropía de carga que tendrá el fluido. Estas propiedades termodinámicas definen el estado fisicoquímico completo de dicho fluido, y así mismo, con estas propiedades se determina la densidad de precarga del acumulador (Véase **Ecuación 7** y **Ecuación 8**).

Tal y como se presenta en el **ANEXO A**, la herramienta digital del NIST, permite hallar el valor de las isopropiedades termodinámicas de un fluido, a partir del ingreso de dos variables como mínimo. Para la condición de carga, a diferencia de la condición de precarga, a la herramienta del NIST debe ingresarse la presión de arranque, también conocida como la presión del acumulador, y los rangos de temperatura variables según convenga (baja, normal y alta). Con este procedimiento, tal y como se indica en el **ANEXO A** se obtienen los valores de densidad y de entropía tanto para el Método B como para el Método C, en la etapa de carga, los cuales serán requeridos más adelante para determinar el valor de la densidad de precarga y, con esta, el valor de la presión de precarga, nuevamente con la herramienta NIST.

**2.4.3.2. Condición de mínima presión de operación (MOP) del acumulador.** Se ha establecido que el dispositivo acumulador, debe tener una presión mínima para que pueda operar, de lo contrario no se llevaría a cabo la compresión óptima del gas alojado en el equipo. Por esta razón, se debe calcular la presión del acumulador en la condición MOP a partir de la **Ecuación 12**. Con este valor y con los rangos de temperatura (baja, normal y alta), tal y como se indica en el **ANEXO A** se obtienen los valores de densidad para el Método B y para el Método C, en la condición mínima de operación. Estos valores de densidad serán requeridos más adelante, para determinar el valor de la densidad de precarga y, con ésta, el valor de la presión a esa misma condición, a través de la herramienta NIST.

La información se consignará como se presenta a continuación en el **Cuadro 4**.

**Cuadro 4.** Cálculos de condición MOP en la herramienta AC-GLOR.

Calculo de las MOP's	Presión requerida (Psig)	MOP (Psia)
Mínima presión de operación (Método B)	0	15
Mínima presión de operación (Método C)	0	15

CONDICIÓN 2 - DENSIDADES DE MINIMA PRESIÓN DE OPERACIÓN (MOP)	PRESIÓN DEL ACUMULADOR (Psig)	PRESIÓN DEL ACUMULADOR (Psia)	TEMP °F	DENSIDAD (lb/ft3) ρ1
<b>METODO B</b>				
MINIMA DENSIDAD DE OPERACION - ALTA TEMP				
MINIMA DENSIDAD DE OPERACION - TEMP NORMAL				
MINIMA DENSIDAD DE OPERACION - BAJA TEMP				
<b>METODO C</b>				
MINIMA DENSIDAD DE OPERACION - ALTA TEMP				
MINIMA DENSIDAD DE OPERACION - TEMP NORMAL				
MINIMA DENSIDAD DE OPERACION - BAJA TEMP				

Fuente: elaboración propia.

**2.4.3.3 Condición de precarga del acumulador.** En esta sección se especifica finalmente uno de los parámetros de diseño del equipo acumulador. Se llevará a cabo un procedimiento similar a los previamente explicados, pero involucrando modelos matemáticos explícitos en la norma API 16D de 2018.

Para realizar la secuencia lógica del diseño de un acumulador lo primero es determinar la densidad de precarga que tendrá el acumulador. Es importante resaltar que este cálculo se ejecuta teniendo en cuenta la temperatura normal del acumulador. La densidad de precarga se calcula para las dos eficiencias volumétricas tanto para presión limitada como para volumen limitado, tal y como se presenta en la **Ecuación 7** y la **Ecuación 8**.

Una vez calculada la densidad de precarga y teniendo en cuenta que los cálculos son realizados con base en temperatura normal se procede a utilizar la herramienta del NIST, para así determinar la presión de precarga del fluido. A continuación, en el **Cuadro 5** se presenta la consignación de la información calculada.

**Cuadro 5.** Cálculos de condición de precarga en la herramienta AC-GLOR.

CONDICIÓN 0	DENSIDAD OPTIMA DE PRECARGA (lb/ft3)	PRESION DE PRECARGA DEL ACUMULADOR (Psig)	PRESION DE PRECARGA DEL ACUMULADOR (Psia)
PRESIÓN DE PRECARGA OPTIMA GENERAL	V LIMITADO P LIMITADA		

PROPIEDADES DEL GAS EN PRECARGA	PRECARGA SELECCIONADA POR USUARIO	PRESION DE PRECARGA DEL ACUMULADOR (Psig)	PRESION DE PRECARGA DEL ACUMULADOR (Psia)	TEMP (°F)	DENSIDAD (lb/ft3) ρ0
PRESIÓN DE PRECARGA SELECCIONADA A TEMP DE PRECARGA					
PRESIÓN DE PRECARGA SELECCIONADA A TEMP MIN					
PRESIÓN DE PRECARGA SELECCIONADA A TEMP MAX					

INPUT
TRANSFERIDO
CALCULADO
NIST

Fuente: elaboración propia.

Una vez se haya calculado la densidad de precarga que satisface ambos métodos, tanto para una condición de volumen limitado como de presión limitada, se debe escoger el mayor de estos valores de densidad, con el fin de asegurar que el acumulador cumpla con los requerimientos de volumen tanto para operaciones de control de pozo (Método C) como para cierres operativos normales (Método B).

Como último proceso en la sección de precarga del acumulador, es necesario calcular la presión necesaria para precargar el dispositivo en la temperatura alta y baja. Para ello, se toma la densidad de precarga mayor entre el volumen limitado y presión limitada, y con la temperatura respectiva, se utiliza la herramienta del NIST para así encontrar en las tablas de isopropiedades las presiones de precarga a las condiciones previamente establecidas.

**2.4.3.4 Resultados de diseño de la herramienta AC-GLOR.** Como procedimiento final, es obligatorio determinar los dos factores de diseño que modelan el acumulador, que corresponden a la capacidad requerida, y al número de botellas del mismo.

Para poder realizar el último cálculo de diseño, es de gran importancia modelar las eficiencias volumétricas, que incluyen los factores de corrección por desviación de gases reales, y el análisis de error generado por el factor de compresibilidad. A continuación, en las **Ecuaciones 15-18** se presentan los modelos matemáticos que establecen el cálculo de los factores de corrección mencionados, también conocidos como eficiencias volumétricas.

**Ecuación 15.** Eficiencia volumétrica en presión limitada para el Método B.

$$EV_{PLB} = \frac{\rho_0}{\rho_{2BL}} - \frac{\rho_0}{\rho_{1BL}}$$

**Fuente:** API. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 16D Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment 2018. p. 105

**Ecuación 16.** Eficiencia volumétrica en volumen limitado para el Método B.

$$EV_{PLB} = \frac{1 - \frac{\rho_0}{\rho_{1BH}}}{1,4}$$

**Fuente:** API. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 16D Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment 2018. p. 105

**Ecuación 17.** Eficiencia volumétrica en presión limitada para el Método C.

$$EV_{PLC} = \frac{\frac{\rho_0}{\rho_{2CL}} - \frac{\rho_0}{\rho_{1CL}}}{1,1}$$

**Fuente:** API. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 16D Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment 2018. p. 105

**Ecuación 18.** Eficiencia volumétrica en volumen limitado para el Método C.

$$EV_{PLC} = \frac{1 - \frac{\rho_0}{\rho_{1CH}}}{1,1}$$

**Fuente:** API. *AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 16D Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment* 2018. p. 105

De los valores obtenidos con las ecuaciones anteriores, para cada método, se debe seleccionar la eficiencia mínima, entre el valor hallado a volumen limitado o a presión limitada. Con el mínimo seleccionado, para cada método se determina el CRA final de diseño haciendo uso de la **Ecuación 1**. De los valores hallados tanto para B como para C, se escoge el CRA más alto.

Como diseño final, ya se han obtenido dos de los datos que modelan el acumulador de perforación, presión de precarga y capacidad requerida del dispositivo, y por último se calculan el número de botellas, el cual se obtiene a partir de la **Ecuación 4**. Es importante recordar que el volumen estándar de las botellas en Colombia se maneja en diez (10) galones, aunque la norma API 16D de 2018 basa sus cálculos en 13,8 galones. De igual forma, este valor es un dato de entrada del usuario para que el cálculo del parámetro se ajuste de forma más apropiada a la necesidad operativa en la que se empleará el dispositivo de presión hidráulica.

## **2.5 SIMULACIÓN DE ESCENARIOS OPERATIVOS PARA LA VALIDACIÓN DE LA HERRAMIENTA AC-GLOR.**

Una vez programada la herramienta AC-GLOR, es necesario validar los resultados que esta reproducirá. Para ello, se procederá a verificar cinco (5) escenarios operativos que la norma API 16D de 2018 describe como: taladro en tierra, conjunto en superficie costa afuera con acumulador dedicado al corte, conjunto en superficie costa afuera sin acumulador dedicado al corte, conjunto submarino y acumulador de propósito especial.

En la norma de referencia para este trabajo, dentro de los cinco (5) escenarios se encuentran trece (13) casos operativos más específicos, en los cuales se emplean los cálculos de diseño para acumuladores. Cada escenario describe una situación operacional distinta, y es por eso que la norma especifica los métodos de cálculo, la presión del sistema, los rangos de temperatura, el tipo de acumulador, y finalmente la capacidad requerida del mismo.

El aspecto importante de la validación de la herramienta, es ingresar en el diseño AC-GLOR los mismos datos que la norma API 16D especifica en cada uno de los escenarios que ésta ejemplifica. Cuando se ingresen los datos y se reproduzcan los

cálculos se buscará que la herramienta AC-GLOR obtenga resultados muy cercanos a los que la norma específica. A continuación, en el **Cuadro 6** se muestra las condiciones operativas de los escenarios a reproducir para la verificación.

**Cuadro 6.** Condiciones operativas para escenarios de verificación.

EJEMPLO	SISTEMA DE PERFORACIÓN	EQUIPO DEL SISTEMA	MÉTODO DE DISEÑO	PRESIÓN DEL SISTEMA (psia)	RANGO DE TEMPERATURA	CAPACIDAD REQUERIDA DEL ACUMULADOR (gal)
1	Taladro en tierra	Acumulador principal	B (Cierre) C (Control de pozo)	3000 2700	(+/-) 50 F rango considerado	79,5
2		Acumulador principal	B (Cierre) C (Control de pozo)	3000 2700	(+/-) 30 F rango considerado	336,5
3	Conjunto en superficie costa afuera con acumulador dedicado al corte	Acumulador piloto	B (Abrir y cerrar todas las BOPs)	3000	(+/-) 30 F rango considerado	0,097
4		Acumulador detallado al corte	C	4500	(+/-) 30 F rango considerado	90,7
5		Acumulador para desviador (diverter)	C	3000	(+/-) 30 F rango considerado	140,1
6	Conjunto en superficie costa afuera sin acumulador dedicado al corte	Acumulador principal	B (Cierre) C (Control de pozo)	3000 2700	(+/-) 30 F rango considerado	655,9
7		Acumulador principal	C (Control de pozo)	5000 4500	-	975,5
8	Conjunto submarino	Acumulador piloto	B (Abrir y cerrar todas las BOPs) C (EDS)	3000	-	1,449
9		Acumulador de corte/DMAS	C	5000	-	1576,9
10		Acumulador acústico	B	5000	-	530
11		Acumulador para desviador (diverter)	C	5000	-	90,5
12	Acumulador de propósito especial	Acumulador compensado por profundidad	C	5000	-	687,9
13		Acumulador auxiliar para el choke y válvula de matar	C	3000	-	58,4

**Fuente:** API. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 16D Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment 2018. p. 102

## 2.6 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LA HERRAMIENTA AC-GLOR CON LOS TEÓRICOS ESTIPULADOS EN LA NORMA

Una vez los datos de cada escenario descritos en la norma API 16D de 2018 sean ingresados a la herramienta, ésta generará un resultado, mostrando así los tres parámetros de diseño de acumuladores, los cuales son: Capacidad requerida del equipo, número de botellas y presión de precarga.

Cuando los resultados de la herramienta AC-GLOR sean presentados, se verificará la exactitud de los datos de salida respecto a los consignados en la norma base de este trabajo. Se procede entonces a calcular la desviación del resultado con el teórico, y de esa forma se comprueba el correcto funcionamiento de la herramienta AC-GLOR como fuente de cálculos de parámetros de diseño de acumuladores de perforación. Para determinar dicho funcionamiento se busca que el error en cada parámetro de diseño sea menor al cinco por ciento (5%) siempre y cuando no comprometa el diseño del equipo, es decir, que aun si el error es menor al previamente mencionado, pero el diseño se ve altamente afectado, se infiere que

ese tipo de acumulador diseñado tendrá que ser sometido a un análisis más profundo para determinar su implementación.

## **2.7 APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA AC-GLOR EN CUATRO (4) TALADROS DE TIERRA OPERATIVOS**

Como último resultado del presente trabajo se realizarán ejemplos de aplicación de la herramienta AC-GLOR en casos operativos reales. Para ello, se introducirán a dicha herramienta los datos mostrados en el **Cuadro 1** de taladros reales de operación y se procederá a ejecutar los cálculos de parámetros de diseño. Una vez se obtengan los datos de salida (capacidad requerida, número de botellas y presión de precarga) se verificará la situación real de cada taladro sometido a análisis.

Con base en lo anterior, se procede a realizar dos procedimientos; el primero es verificar si el taladro se encuentra bajo el cumplimiento de la norma API 16D de 2018, y segundo, en caso de que se encuentre en incumplimiento, analizar las causas del porqué para así realizar recomendaciones de cuál debería ser el acumulador apropiado para las condiciones operativas actuales del taladro.

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El presente trabajo de investigación está guiado por la metodología y los datos que fueron presentados en la anterior sección. Una vez la herramienta de diseño de acumuladores AC-GLOR es programada se procede a la verificación de la misma. Allí se comparan los resultados que se obtiene de la herramienta digital con los valores teóricos que ilustra la norma API 16D de 2018. Dichos valores se encuentran enmarcados en trece escenarios operativos, en donde sus características específicas están estipuladas en el **Cuadro 6**.

A su vez, se realizará el análisis de la implementación de la herramienta en taladros reales. Para ello se mostrarán las condiciones operativas de dichos taladros, se introducirán en la herramienta AC-GLOR, y con base en el resultado que ésta arroje se verificará el cumplimiento de la norma de los taladros a analizar, se indagará el porqué de los resultados y se presentarán las recomendaciones para que, dado el escenario operativo, los taladros cumplan con los requerimientos de ingeniería ilustrados en la norma API 16D de 2018.

#### 3.1 VERIFICACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA HERRAMIENTA AC-GLOR

Para la verificación se introdujeron a la herramienta AC-GLOR los mismos datos de entrada estipulados en la norma; Con el objetivo de que los resultados expedidos por la herramienta digital no excedan un error del 5% respecto a los parámetros de diseño de cada acumulador expresados en la norma. Una vez se ejecutó la secuencia lógica de cálculo, se encontraron resultados de parámetros de diseño, y la comparación con los valores teóricos se encuentran a continuación en el **Cuadro 7**:

**Tabla 1.** Condiciones operativas para escenarios de verificación.

	TEMPERATURA °F	DENSIDAD DE PRECARGA (lb/ft3)	PRESIÓN DE PRECARGA (Psig)	CAPACIDAD REQUERIDA (Gal)	NUMERO DE BOTELLAS
<b>EJEMPLO 1</b>	70	8,266	1674	79,5	8
AC-GLOR	70	8,22956241	1666	79,4	8
ERROR		0,44%	0,48%	0,13%	0,00%
<b>EJEMPLO 2</b>	90	6,526	1723	336,5	34
AC-GLOR	90	6,527694717	1756,2	339,26761	34
ERROR		0,03%	1,93%	0,82%	0,00%

Tabla 1. (Continuación)

EJEMPLO 3	90	6,041	1264	0,097	1
AC-GLOR	90	6,041572956	1264	0,09665882	1
ERROR		0,01%	0,00%	0,35%	0,00%
EJEMPLO 4	90	12,946	2875	90,7	10
AC-GLOR	90	12,97573303	2883	91,239877	10
ERROR		0,23%	0,28%	0,60%	0,00%
EJEMPLO 5	90	9,056	1934	140,1	15
AC-GLOR	90	9,047493665	1932	139,776182	14
ERROR		0,09%	0,10%	0,23%	6,67%
EJEMPLO 6	90	10,318	2227	655,9	66
AC-GLOR	90	10,2284	2226,2	655,677	66
ERROR		0,87%	0,04%	0,03%	0,00%
EJEMPLO 7	90	10,255	2212	975,5	98
AC-GLOR	90	10,24186076	2209,2	974,253481	98
ERROR		0,13%	0,13%	0,13%	0,00%
EJEMPLO 8	90	24,609	6900	1,449	1
AC-GLOR	90	24,609	6900	1,44954885	1
ERROR		0,00%	0,00%	0,04%	0,00%
EJEMPLO 9	90	24,609	6900	1576,9	158
AC-GLOR	90	24,609	6900	1594,8852	160
ERROR		0,00%	0,00%	1,14%	1,27%
EJEMPLO 10	90	24,609	6900	530	53
AC-GLOR	90	24,609	6900	530,006069	54
ERROR		0,00%	0,00%	0,00%	1,89%
EJEMPLO 11	90	11,247	2450	90,5	10
AC-GLOR	90	11,20953357	2440,8	90,0918642	10
ERROR		0,33%	0,38%	0,45%	0,00%
EJEMPLO 12	90	16,697	3916	687,9	14
AC-GLOR	90	16,697	3916,3	696,306952	14
ERROR		0,00%	0,01%	1,22%	0,00%
EJEMPLO 13	90	24,609	6900	58,4	6
AC-GLOR	90	24,609	6900	58,6980257	6
ERROR		0,00%	0,00%	0,51%	0,00%

Fuente: elaboración propia.

Como fue mostrado anteriormente en la **Tabla 1**, se pueden apreciar los resultados que arrojó la herramienta AC-GLOR, al simular los escenarios operativos que se encuentran enmarcados en la norma API 16D de 2018. Allí, se pueden observar los valores de densidad de precarga, presión de precarga, capacidad requerida del acumulador y número de botellas del dispositivo. Adicionalmente, se presenta un valor de error en porcentaje de cada valor el cual permite analizar la desviación que obtiene la herramienta en cada uno de los parámetros que se encuentra calculando.

Como primera observación del rendimiento de la herramienta se puede decir que su funcionamiento es óptimo debido a que ningún error mostrado anteriormente excede el valor de 2%, a excepción de la reproducción del escenario cinco (5) en donde se puede apreciar que el error en el cálculo de la capacidad requerida es de 0,23% mientras que en el número de botellas es de 6,67%. Esto es debido a que la pequeña desviación que se tuvo en el cálculo del volumen del acumulador representó un salto significativo de una unidad (de 139,78 a 140,1) y obliga a que 140 botellas no cumplan el requerimiento volumétrico, por lo que matemáticamente hablando obliga al uso de 141 botellas. Por tal motivo, esa botella en exceso representa una desviación del 6,67% de la herramienta respecto al valor teórico en el caso del escenario cinco (5).

De la misma manera, en la **Tabla 2**, se presenta un resumen general del porcentaje de error que obtuvo la herramienta AC-GLOR para cada uno de los cálculos de los parámetros de diseño de acumuladores, así mismo se muestra el error global que tiene la herramienta en el desarrollo de su secuencia lógica para el diseño de acumuladores:

**Tabla 2.** Porcentaje de error general de la herramienta AC-GLOR.

	TEMPERATURA °F	DENSIDAD DE PRECARGA (lb/ft3)	PRESIÓN DE PRECARGA (Psig)	CAPACIDAD REQUERIDA (Gal)	NUMERO DE BOTELLAS
PROMEDIO DE ERROR		0,15%	0,24%	0,40%	0,70%
PROMEDIO DE ERROR DE LA HERRAMIENTA AC-GLOR					0,37%

**Fuente:** elaboración propia.

Como se observa en la **Tabla 2**, los errores que produce la herramienta no son mayor al 1%, lo cual permite deducir que la exactitud de la herramienta es bastante buena al calcular escenarios operativos que la norma API16D describe. Sin embargo, en esta sección del presente trabajo de investigación se realiza un análisis del cálculo de cada escenario para verificar el porqué de cada resultado y que variables posiblemente afecten el resultado totalmente exacto.

**3.1.1 Análisis de cálculo de la herramienta AC-GLOR de los trece (13) escenarios operativos de la norma api 16d 2018.** En esta sección, como se mencionó anteriormente, se hará un análisis específico para cada escenario que fue reproducido por la herramienta AC-GLOR, con el fin de explicar por qué los resultados no son exactos y tienen un porcentaje de desviación. Así mismo se explicará la convergencia con las gráficas tipo explicadas en la **Sección 2.2** en las **Figuras 3-8**, y como éstas verifican el correcto funcionamiento de la herramienta en el momento del cálculo de los parámetros de diseño.

**3.1.1.1 Taladro en tierra – Acumulador principal.** En este escenario operativo se reproducen los cálculos de parámetros de diseño para un acumulador principal en taladros en tierra. Para ello se introdujeron los valores de entrada descritos en el **Cuadro 1**, que aplican para este tipo de acumulador. Dichos valores se muestran a continuación en la **Tabla 3**:

**Tabla 3.** Variables de entrada para la reproducción del escenario 1.

STACK	RWP	MOP	VOL CIERRE (GAL)		VOL APERTURA (GAL)	RELACIÓN DE CIRRE
ANULAR BOB 9"	5000	1500	10,2		9,6	-
RAM CIEGO 9"	5000	600	5,15		3,5	7,25
RAM TUBERIA 9"	5000	750	3,6		2,25	6,23
CHOKEY Y VALVULA DE MATAR	5000	780	0,65		0,65	-

PARÁMETROS DEL SISTEMA	
PRESIÓN DEL SISTEMA	3000 Psig
GAS DE PRECARGA	NITROGENO

CONDICIONES AMBIENTALES	
TEMP DE SUPERFICIE EN LA PRECARGA	70 °F
RANGO DE TEMP (+/-°F)	50 °F
MIN TEMP SUPERFICIE	20 °F
MAX TEMP SUPERFICIE	120 °F
PRESIÓN ATMOSFÉRICA	14,7 Psia

SISTEMA PPAL DE BOMBEO  
 Bombeo ppal empieza al 90% de la RWP  
 Bombeo ppal termina entre el 98% y 100% de la RWP

PRUEBA DRAWDOWN  
 Cerrar rams, abrir valvula, cerrar anular  
 CONTROL DE POZO  
 Cerrar anular y ram

**Fuente:** elaboración propia.

Como se muestra anteriormente las variables necesarias son condiciones ambientales y parámetros del fabricante propios de cada una de las barreras de control de pozo (Preventores, *choke* y válvula de matar). Una vez estos datos han sido ingresados, la herramienta AC-GLOR se ejecuta y muestra los siguientes resultados como parámetros de diseño en la **Tabla 4**:

**Tabla 4.** Resultados de la herramienta AC-GLOR para el escenario 1.

	TEMPERATURA °F	DENSIDAD DE PRECARGA (lb/ft3)	PRESIÓN DE PRECARGA (Psig)	CAPACIDAD REQUERIDA (Gal)	NUMERO DE BOTELLAS
<b>EJEMPLO 1</b>	70	8,266	1674	79,5	8
<b>AC-GLOR</b>	70	8,22956241	1666	79,4	8
<b>ERROR</b>		0,44%	0,48%	0,13%	0,00%

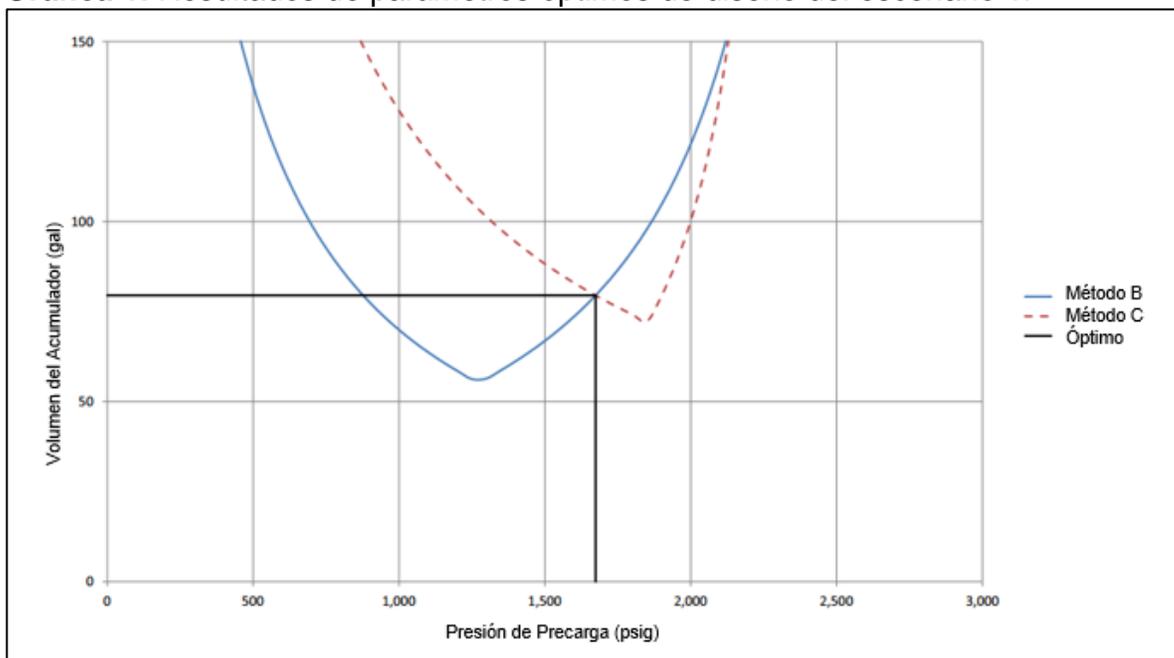
**Fuente:** elaboración propia.

Al presentar los resultados de la reproducción del primer escenario de la norma API 16D, se puede observar que la exactitud de cálculo para la capacidad requerida del dispositivo y el número de botellas del mismo es bastante alta, pues presentan un error muy pequeño.

Respecto a la otra variable de diseño, la presión de precarga, vemos que existe un error un poco más alto. Este tipo de errores que no son significativos son debido al uso de la herramienta NIST para determinar las densidades del gas a diferentes condiciones termodinámicas. En ocasiones es necesario interpolar en las tablas mostradas en el **ANEXO A**, y la exactitud que maneja la herramienta AC-GLOR no es la misma que se aprecia en la norma. Es de importancia saber que métodos de interpolación se están manejando tanto en la herramienta como en el estándar base de este trabajo, para poder determinar una exactitud mucho más alta a la hora de calcular las propiedades termodinámicas del gas inerte.

Sin embargo, a pesar de que existe un error no tan elevado en el cálculo de la presión de precarga, se puede observar que ésta cumple el requerimiento de volumen que exige la condición operativa, satisfaciendo al mismo tiempo los dos métodos de cálculo (Método B y Método C) estipulados en la norma. La convergencia del cálculo se muestra a continuación en la **Gráfica 1**:

**Gráfica 1.** Resultados de parámetros óptimos de diseño del escenario 1.



**Fuente:** API. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 16D Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment 2018. p. 105

Como último parámetro a analizar se tiene la capacidad requerida para un acumulador principal de taladros en tierra. Se observa que el valor es de 79,5 galones de volumen. Este número al no exceder los 100 galones indica que la operación a ejecutar por el acumulador diseñado no tiene una gran exigencia, y eso se ve reflejado en los valores de entrada. Allí se aprecia que solo existen dos Rams de cierre, un anular, la válvula de matar y el *choke*. Estos elementos no son muchos y pueden ser suplidos por un solo acumulador con ocho (8) botellas de diez (10) galones cada una.

A su vez, las condiciones ambientales a las cuales será sometido no son extremas, por lo que el gas inerte no tendrá un comportamiento muy alejado del ideal y las descargas tanto adiabáticas como isotérmicas que éste tenga se darán en condiciones óptimas de presión y temperatura por lo que la pérdida de masa que se genere no será significativa y por dicha razón no se ve reflejada en la capacidad requerida del dispositivo.

**3.1.1.2 Conjunto en Superficie costa afuera – Acumulador principal.** En este escenario operativo se reprodujo las condiciones de un acumulador de funciones principales ubicado en la superficie de una plataforma costa afuera. Al igual que en el caso anterior, el dispositivo tiene que cumplir con la apertura y cierre de todas las barreras de control de pozo. Los valores de entrada para el cálculo de parámetros de diseño se encuentran en la **Tabla 5** mostrada a continuación:

**Tabla 5.** Variables de entrada para la reproducción del escenario 2,3,4 y 5..

STACK	RWP	MOP (Psig)	VOL CIERRE (GAL)	VOL APERTURA (GAL)	RELACION DE CIRRE
ANULAR BOB 13"	10000	1500	26,5	24,3	-
RAM CIEGO-CORTADOR 13"	10000	1600	21,5	16	18,2 Corte
		520			6,2 Corte
RAM TUBERIA SUPERIOR 13"	10000	600	12,3	10,8	7,65
RAM TUBERIA MEDIO 13"	10000	600	12,3	10,8	7,65
RAM TUBERIA INFERIOR 13"	10000	600	12,3	10,8	7,65
CHOKE Y VALVULA DE MATAR	10000	780	0,65	0,65	-

VOLUMEN PARA ACCIONAR BOP's CERRADAS				SISTEMA DEL DIVERTER		
FUNCIONES	CANTIDAD	TAMAÑO	VOL TOTAL (gal)	FUNCION	PRESION (Psig)	VOL (gal)
ANULAR	1	1,5" SPM	0,0059	SECUENCIA	1500	11
RAMS	4	1" SPM	0,0105	DIVERTER	1500	25
		TOTAL	0,0164			
		200%	0,03280	TOTAL		36

PARAMETROS DEL SISTEMA	
PRESION DE SISTEMA	3000 psig
PRESION DEL SISTEMA (PH CIRCUITO DE CORTE)	5000 psig

CONDICIONES AMBIENTALES	
TEMP DE SUPERFICIE EN LA PRECARGA	90 °F
RANGO DE TEMP (+/-°F)	30 °F
MIN TEMP SUPERFICIE	60 °F
MAX TEMP SUPERFICIE	120 °F
PRESION ATMOSFÉRICA	14,7 Psia

**Fuente:** elaboración propia.

Al igual que en todos los escenarios de operación, los datos de entrada se enfocan básicamente en condiciones de operación de las barreras de control de pozo y las condiciones ambientales de la operación. Con estos datos la herramienta AC-GLOR calcula los parámetros de diseño para el acumulador en cuestión, arrojando como resultados los que se observan en la **Tabla 6**:

**Tabla 6.** Resultados de la herramienta AC-GLOR para el escenario 2.

	TEMPERATURA °F	DENSIDAD DE PRECARGA (lb/ft3)	PRESIÓN DE PRECARGA (Psig)	CAPACIDAD REQUERIDA (Gal)	NUMERO DE BOTELLAS
<b>EJEMPLO 2</b>	90	6,526	1723	336,5	34
<b>AC-GLOR</b>	90	6,527694717	1756,2	339,26761	34
<b>ERROR</b>		0,03%	1,93%	0,82%	0,00%

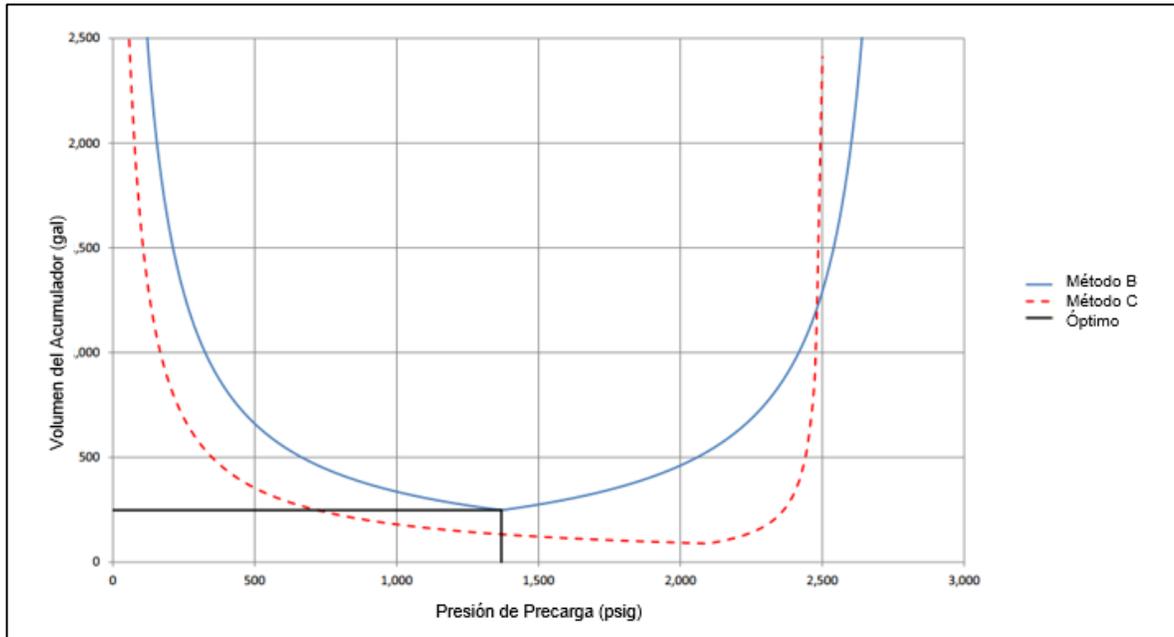
**Fuente:** elaboración propia.

Como es posible apreciar en la **Tabla 6**, la reproducción del escenario dos (2) tiene una exactitud bastante aceptable. Esto se puede inferir del error obtenido en la capacidad requerida y el número de botellas, puesto que los números son bastante cercanos entre ellos. Sin importar que existe una irregularidad en el volumen del dispositivo (desfaz de 2,7 galones) el cálculo de las botellas por proximidad es exactamente el mismo, por lo que el diseño de capacidad sería acorde con lo estipulado en la norma.

Sin embargo, la presión de precarga presenta un porcentaje de error ligeramente alto (1,93%), y este es debido por la falta de exactitud en el cálculo de densidad de precarga. Esta desviación es consecuencia de dos factores; el primero es la inexactitud en el método de interpolación de las tablas NIST, y el segundo por la exactitud que tiene la herramienta AC-GLOR en el cálculo del volumen funcional. La herramienta, al utilizar este volumen sin aproximar, hace que el valor de la variable en cuestión sea ligeramente más pequeño, y las tablas NIST, al usar valores enteros, obvian cierto número de decimales que afectan el cálculo de las densidades y por ende el de las presiones de precarga

De la misma manera que en el ejemplo uno (1), con pequeñas inexactitudes en los cálculos de la presión de precarga, se obtiene un valor aplicable de volumen funcional requerido del acumulador y del número de botellas del mismo. La exactitud del cálculo de dimensionamiento al satisfacer el Método B se ve reflejada en la **Gráfica 2**, donde se observa la convergencia de los métodos y el volumen diseñado en función de la presión de precarga:

**Gráfica 2.** Resultados de parámetros óptimos de diseño del escenario 2.



**Fuente:** API. *AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 16D Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment* 2018. p. 108

Como se presenta en la **Gráfica 2**, el volumen del acumulador en función de la presión de precarga solo satisface el Método 2, esto se encuentra especificado en el **Cuadro 6**. Es importante resaltar que solo converge en el Método B por la necesidad operativa exclusiva de realizar control de pozo en el escenario 2, por lo que es importante que solo de cumplimiento específico al método anteriormente nombrado.

En caso de satisfacer los requerimientos de ambos métodos (B y C) el control de pozo no sería tan efectivo pues el volumen sería menor al tener que cerrar menos preventoras para cumplir con el Método C y existiría un riesgo operacional al implementar dicho acumulador diseñado.

**3.1.1.3 Conjunto en superficie costa afuera – Acumulador piloto.** La reproducción de este escenario operativo se basa en las funciones de un acumulador piloto que se encuentra costa afuera en una plataforma superficial. Este acumulador ejecutará una función característica de este tipo de dispositivos, la cual es el cierre de todas las preventoras a un 200% del volumen funcional mediante el uso del Método B.

Los datos de entrada para este escenario son los mismos que fueron usados para el número dos (2) presentados en la **Tabla 5**. Una vez éstos se utilizaron, los

resultados que la herramienta AC-GLOR arrojó son los mostrados en la **Tabla 7** a continuación:

**Tabla 7.** Resultados de la herramienta AC-GLOR para el escenario 3.

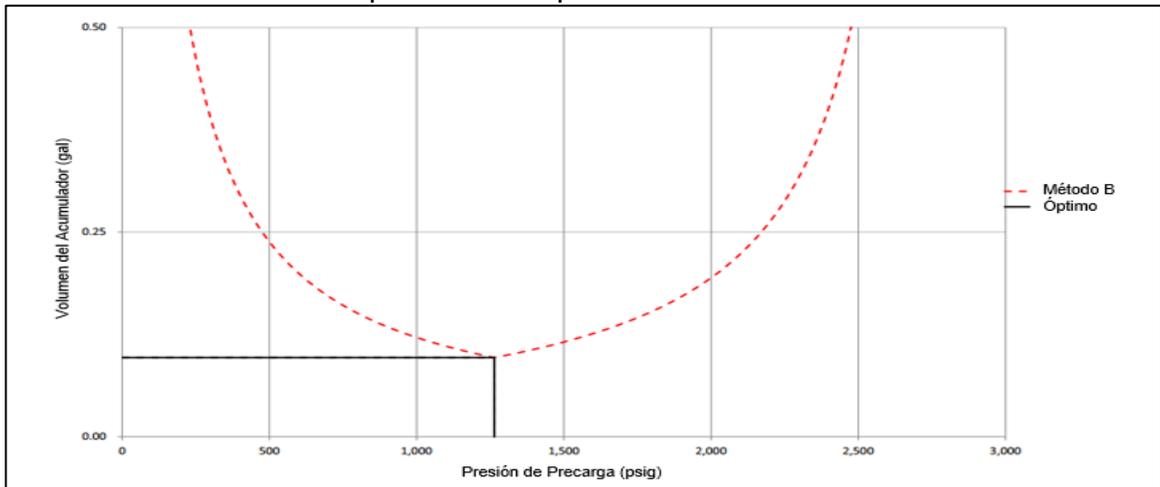
	TEMPERATURA °F	DENSIDAD DE PRECARGA (lb/ft3)	PRESIÓN DE PRECARGA (Psig)	CAPACIDAD REQUERIDA (Gal)	NUMERO DE BOTELLAS
<b>EJEMPLO 3</b>	90	6,041	1264	0,097	1
<b>AC-GLOR</b>	90	6,041572956	1264	0,09665882	1
<b>ERROR</b>		0,01%	0,00%	0,35%	0,00%

**Fuente:** elaboración propia.

En este escenario operativo que fue reproducido por la herramienta AC-GLOR, se observa que la exactitud es bastante alta, ya que los valores de error para cada uno de los parámetros de diseño son muy bajos, lo cual indica una excelente ejecución de la secuencia lógica de la herramienta digital.

Por otro lado, se puede observar la capacidad requerida del acumulador piloto, que satisface por completo la condición de descarga adiabática a un 200% de volumen requerido. Esto se evidencia en la **Gráfica 3**, en donde se muestra el punto óptimo de operación de la capacidad requerida y la presión de precarga calculada para este tipo específico de acumulador.

**Gráfica 3.** Resultados de parámetros óptimos de diseño del escenario 3.



**Fuente:** API. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 16D Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment 2018. p. 110

Por último, para la reproducción del tercer escenario, se puede observar que la capacidad calculada es casi de un (1) galón, y de la misma forma una sola botella. Un valor tan pequeño para el diseño del acumulador significa que los volúmenes de cierre para cada una de las preventoras son bastante pequeños, y por tal motivo estas barreras secundarias de control de pozo son pequeñas y la profundidad del pozo no debe ser tan alta, de lo contrario todo el conjunto sería más grande y requeriría un acumulador del mismo requerimiento.

**3.1.1.4 Conjunto en superficie costa afuera – Acumulador de corte.** Para la simulación de este escenario de operación, al igual que en los últimos dos explicados anteriormente, se utilizó la información de entrada presentada en la **Tabla 5**. A parte de ésta, se tiene un conjunto adicional de datos que es presentado en la **Tabla 8**. Allí, se presentan datos específicos de solo el Ram ciego cortador que tiene el taladro en análisis. Esto es debido a que el acumulador es de corte, y su diseño será específico para eventualidades de descontrol costa afuera, en las que sea necesario la desconexión de tubería mediante un corte de cizalla aplicado a la misma.

**Tabla 8.** Variables adicionales de entrada para la reproducción del escenario 3.

FUNCIONES DE OPERACIÓN	RWP (psia)	PRESIÓN REQUERIDA (psig)		VOLUMEN FUNCIONAL	RELACIÓN DE CIERRE DE CORTE	PRESIÓN AJUSTADA (psig)
RAM ciego cortador 13"	10000	1600	Corte	21,5	18,2	2149,450549
		520	MOPFLPS		6,2	2132,903225
VOLUMEN FUNCIONAL REQUERIDO TOTAL				21,5 gal		
PRESIÓN REQUERIDA					2149,450549 psig	
CONDICIONES AMBIENTALES						
PRESIÓN ATMOSFÉRICA		14,7 Psia				
TEMP EN SUPERFICIE A LA PRECARGA		90 °F				
RANGO DE TEMP (+/-)		30°F				
ACUMULADORES						
GAS DE PRECARGA		NITROGENO				
RWP DEL ACUMULADOR		3000 Psig				
PRESIÓN DE ARRANQUE DE LA BOMBA (90%)		4500 Psig				

**Fuente:** elaboración propia.

Una vez la herramienta recibe todos los datos de entrada para el diseño del acumulador de corte, ésta genera internamente los cálculos de los parámetros de modelamiento del dispositivo, y los resultados de dicho proceso se muestran a continuación en la **Tabla 9**:

**Tabla 9.** Resultados de la herramienta AC-GLOR para el escenario 4.

	TEMPERATURA °F	DENSIDAD DE PRECARGA (lb/ft3)	PRESIÓN DE PRECARGA (Psig)	CAPACIDAD REQUERIDA (Gal)	NUMERO DE BOTELLAS
<b>EJEMPLO 4</b>	90	12,946	2875	90,7	10
<b>AC-GLOR</b>	90	12,97573303	2883	91,239877	10
<b>ERROR</b>		0,23%	0,28%	0,60%	0,00%

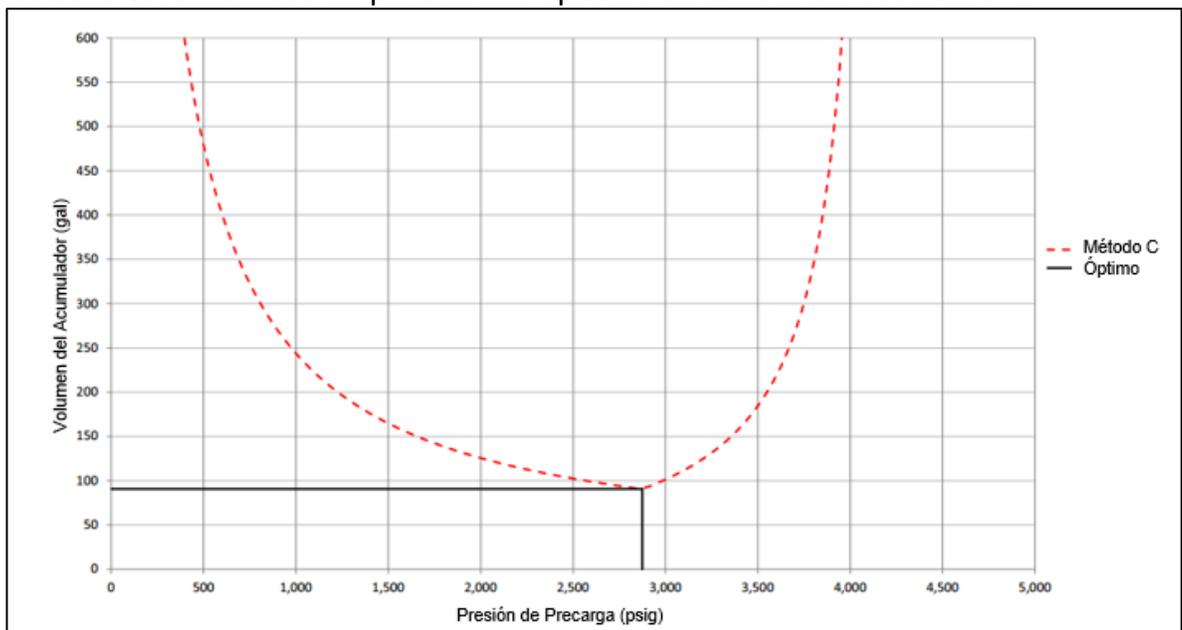
**Fuente:** elaboración propia.

Cuando los resultados son presentados por la herramienta AC-GLOR, lo primero en lo que se debe realizar énfasis es en la capacidad requerida del dispositivo acumulador. Éste es un valor bastante exacto respecto al teórico presentado en la norma, pero se observa que es un valor bastante alto (91 galones) para solo cerrar un solo preventor de corte. La razón de esto es debido a la presión con la que se debe cortar una tubería.

La sarta de tubería alojada en el pozo puede albergar presión por los fluidos que ésta maneja y es por esto que el Ram usado para el corte, debe cerrar con mínimo el doble de presión para que el sello sea efectivo. Esta es la razón por la que un acumulador de corte llega a tener un valor tan alto de capacidad requerida sin importar que es usado para cerrar un solo Ram de todo el conjunto de barreras secundarias

Al igual que en el escenario anterior, en la **Gráfica 4**, se muestra la convergencia de la capacidad requerida en función de la presión de precarga, que satisface el Método C de diseño.

**Gráfica 4.** Resultados de parámetros óptimos de diseño del escenario 4.



**Fuente:** API. *AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 16D Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment* 2018. p. 112

**3.1.1.5 Conjunto en superficie costa afuera – Acumulador para *Diverter*.** En la reproducción de estas condiciones de operación la herramienta AC-GLOR diseña los parámetros de modelamiento de acumuladores exclusivamente para la operación del *diverter* o desviador. Para poder ejecutar la secuencia lógica es necesaria la información mostrada en la **Tabla 5**.

Cuando la herramienta ejecuta los cálculos de parámetros con base en la información de entrada arroja como resultados los datos de variables mostrados en la **Tabla 10**:

**Tabla 10.** Resultados de la herramienta AC-GLOR para el escenario 5.

	TEMPERATURA °F	DENSIDAD DE PRECARGA (lb/ft3)	PRESIÓN DE PRECARGA (Psig)	CAPACIDAD REQUERIDA (Gal)	NUMERO DE BOTELLAS
EJEMPLO 5	90	9,056	1934	140,1	15
AC-GLOR	90	9,047493665	1932	139,776182	14
ERROR		0,09%	0,10%	0,23%	6,67%

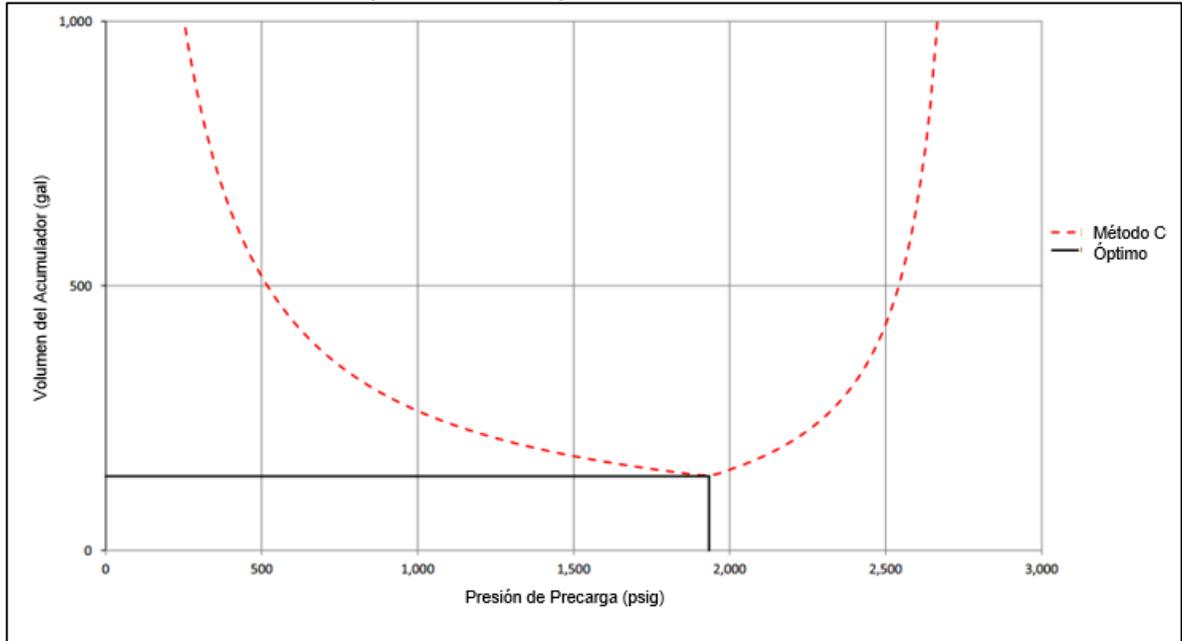
**Fuente:** elaboración propia.

En la **Sección 3.2** se especificó por qué el error en el número de botellas es tan alto. De la misma forma, el error presentado en la densidad de precarga y presión de precarga son debido al cálculo de densidades mediante el uso de la herramienta NIST. Sin embargo, se determina que la norma al aproximar algunos de sus valores de cálculo puede llegar a tener un error en el momento de determinar los parámetros finales de diseño, mientras que la herramienta AC-GLOR, al poseer un calculo exacto en cada uno de los valores que determina, entrega parámetros de diseño más confiables y que no tienen sensibilidad de error al poseer una secuencia lógica sin aproximaciones.

Finalmente, para el valor de la capacidad requerida del acumulador vemos que un valor de 140 sigue siendo muy alto para solo la operación de un solo dispositivo. Es de importancia verificar, que el desviador en operaciones costa afuera, debe soportar más presión por condiciones del lodo de perforación y por el agua submarina. Gracias a esto, el acumulador dedicado a operar este dispositivo debe almacenar un gran volumen para poder comprimirlo y generar la suficiente presión para la apertura y cierre del desviador.

La función que representa la capacidad requerida y la presión de precarga del acumulador dedicado al desviador se muestra a continuación en la **Gráfica 5**. Allí, se detalla el punto óptimo de operación, y la representación gráfica del correcto diseño que satisface el Método C de este tipo de acumulador específico.

**Gráfica 5.** Resultados de parámetros óptimos de diseño del escenario 5.



**Fuente:** API. *AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 16D Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment* 2018. p. 114

**3.1.1.6 Conjunto en superficie costa afuera – Sin acumulador de corte.** En el escenario operativo, en donde no existe un acumulador especializado en el corte, el dispositivo en cuestión tiene que cumplir con los requerimientos normales, pero siempre siendo una herramienta de asistencia para el acumulador principal.

En este escenario a reproducir, el diseño del acumulador debe satisfacer los dos métodos (B y C) ya que será empleado para asistencia de cierre en pruebas de pozo y cierres de control de presión. Para realizar la secuencia lógica de cálculo de parámetros se tiene en cuenta la información de entrada mostrada a continuación en la **Tabla 11**.

En los valores de entrada se destacan datos del fabricante respecto a volúmenes de apertura y cierre de cada uno de los elementos de control de pozo, así como la relación de cierre y la presión de trabajo en las que ellos operan. Estas variables le permiten a la herramienta AC-GLOR determinar los volúmenes funcionales requeridos del sistema para así determinar los parámetros de diseño del acumulador en cuestión.

**Tabla 11.** Variables de entrada para la reproducción del escenario 6.

STACK	RWP	MOP (Psig)	VOL CIERRE (GAL)	VOL APERTURA (GAL)	RELACIÓN DE CIRRE
ANULAR BOB 13"	10000	1500	26,5	24,3	-
RAM CIEGO-CORTADOR 13"	10000	1600	21,5	16	18,2 Corte
		520			6,2 Sello
RAM TUBERIA SUPERIOR 13"	10000	750	12,3	10,8	7,65
RAM TUBERIA MEDIO 13"	10000	750	12,3	10,8	7,65
RAM TUBERIA INFERIOR 13"	10000	750	12,3	10,8	7,65
CHOKE Y VALVULA DE MATAR	10000	780	0,65	0,65	-
<b>PARAMETROS DEL SISTEMA</b>					
PRESION DE SISTEMA	3000 psig				
<b>CONDICIONES AMBIENTALES</b>					
TEMP DE SUPERFICIE EN LA PRECARGA	90 °F				
RANGO DE TEMP (+/-°F)	30 °F				
MIN TEMP SUPERFICIE	60 °F				
MAX TEMP SUPERFICIE	120 °F				
PRESIÓN ATMOSFÉRICA	14,7 Psia				

**Fuente:** elaboración propia.

Como se presentó anteriormente, con los valores de entrada para la reproducción del sexto escenario, la herramienta AC-GLOR, procede a ejecutar los cálculos de parámetros de diseño, mostrando así, las variables de salida que son presentadas en la **Tabla 12** a continuación:

**Tabla 12.** Resultados de la herramienta AC-GLOR para el escenario 6.

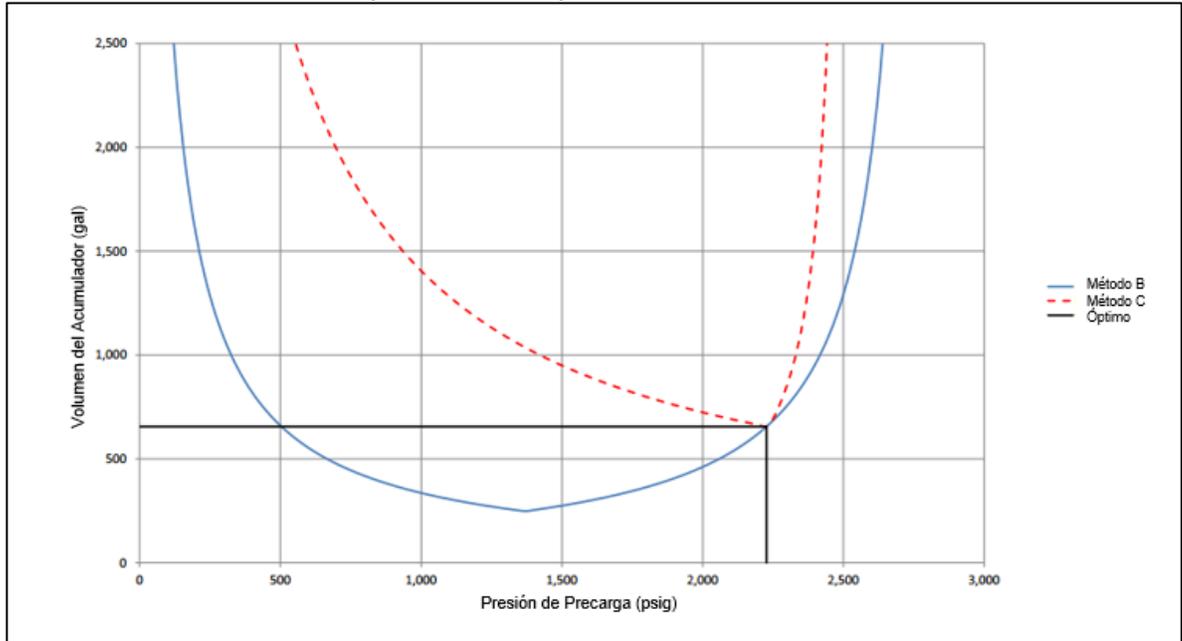
	TEMPERATURA °F	DENSIDAD DE PRECARGA (lb/ft3)	PRESIÓN DE PRECARGA (Psig)	CAPACIDAD REQUERIDA (Gal)	NUMERO DE BOTELLAS
<b>EJEMPLO 6</b>	90	10,318	2227	655,9	66
<b>AC-GLOR</b>	90	10,2284	2226,2	655,677	66
<b>ERROR</b>		0,87%	0,04%	0,03%	0,00%

**Fuente:** elaboración propia.

Analizando los resultados de salida de la herramienta AC-GLOR para el sexto escenario, se puede observar que la exactitud también es bastante buena. En esta reproducción el mayor error se da en la densidad de precarga, el cual está dado por incongruencias de decimales debido a las interpolaciones de las tablas NIST, que previamente se ha mencionado. Sin embargo, los cálculos son bastante cercanos a los teóricos expuestos en la norma. Respecto a la capacidad requerida y numero de botellas, vemos que el volumen calculado por la herramienta es acertado.

Al igual que anteriormente ha sido presentado, a continuación, en la **Grafica 6**, se muestra la convergencia del cálculo que satisface los métodos B y C de dicha variable respecto a la presión de precarga.

**Gráfica 6.** Resultados de parámetros óptimos de diseño del escenario 6.



**Fuente:** API. *AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 16D Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment* 2018. p. 117

Como último aspecto de análisis, se puede verificar el volumen de capacidad requerida de este escenario. Se observa un valor alto (656 galones) que denota una gran exigencia del acumulador. Esto es debido a que este dispositivo tiene que suplir la apertura y cierre de más de cinco elementos de control de pozo, y que, al encontrarse costa afuera, exigen una mayor presión de operación.

Por otro lado, el valor de la capacidad requerida es tan elevado dadas las condiciones de descarga isotérmica (Método C). Esto es debido a que una vez el acumulador este en la condición de carga, el método exige que la descarga se lleve a temperatura constante, pero al tener altas presiones en el estado de carga es casi imposible mantener la temperatura regular, y esta condición debe ser compensada con un mayor volumen que supla las pérdidas de calor al disminuir la presión.

**3.1.1.7 Conjunto submarino – Acumulador principal.** Para el escenario número siete (7), se observa que el ambiente de operación es totalmente distinto. Allí, las barreras secundarias de control de pozo se alojan en el lecho marino. Por tal motivo el acumulador tiene que vencer una mayor presión para ejecutar las tareas de apertura y cierre.

Específicamente, para el acumulador principal, se necesita una mayor cantidad de información de entrada, debido a la complejidad de la operación. Dichos datos de variables se muestran en la **Tabla 13** mostrado a continuación:

**Tabla 13.** Variables de entrada para la reproducción del escenario 7,8,9,10 y 11.

STACK	RWP	MOP (Psig)	VOL CIERRE (GAL)	VOL APERTURA (GAL)	RELACION DE CIRRE
ANULAR SUPERIOR BOB 18-3/4"	10000	1500	85,3	64,8	-
ANULAR INFERIOR BOB 18-3/4"	10000	1500	85,3	64,8	-
RAM CIEGO-CORTADOR SUPERIOR 18-3/4"	15000	1710 520	40,3	35	15,24 Corte 6,4 Sello
RAM CORTADOR CSG 18-3/4"	15000	2035	40,3	35	15,24
RAM CIEGO-CORTADOR INFERIOR 18-3/4"	15000	1710 520	40,3	35	15,24 Corte 6,4 Sello
RAM TUBERIA SUPERIOR 18-3/4"	15000	750	20,75	17,3	7,2
RAM TUBERIA MEDIO 18-3/4"	15000	750	20,75	17,3	7,2
RAM TUBERIA INFERIOR 18-3/4"	15000	750	20,75	17,3	7,2

VOLUMEN PARA ACCIONAR EDS CON MAYOR DEMANDA DE VOLUMEN		
CANTIDAD	TAMAÑO	VOL TOTAL (gal)
0	1,5" SPM	0
4	1" SPM	0,0105
4	0" SPM	0,0065
TOTAL		0,017
200%		0,03400

VOLUMEN PARA ACCIONAR TODAS LAS BOPs CERRADAS Y ABIERTAS		
CANTIDAD	TAMAÑO	VOL TOTAL (gal)
0	1,5" SPM	0,0237
4	1" SPM	0,0315
4	0,5" SPM	0
TOTAL		0,0552
200%		0,11040

FUNCIONES ACUSTICAS		VOLUMEN gal)
RAM CIEGO-CORTADOR SUPERIOR		40,3
RAM CORTADOR DE CSG		40,3
RAM DE TUBERIA SUPERIOR		20,75
RAM DE TUBERIA INTERMEDIO		20,75
RETRAER TODAS LAS GUIAS		5
CONECTOR PRIMARIO RISER+APERTURA SECUNDARIA		25
TOTAL		152,1
200%		71,50000

PARAMETROS DEL SISTEMA		
PRESION DE SISTEMA	5000	psig
PRESION REGULADA DE SUMINISTRO	3000	psig
ESPACIO DE AIRE EN EL RISER	75	ft
ESPACIO DE AIRE EN EL FLUIDO DE CONTROL	75	ft
PESO DE FLUIDO DE CONTROL	8,34	ppg
PESO DEL AGUA MARINA	8,54	ppg
PROFUNDIDAD DEL AGUA	12500	ft

CONDICIONES AMBIENTALES		
TEMP DE SUPERFICIE EN LA PRECARGA	90	°F
MAX TEMP SUPERFICIE	120	°F
TEMP DE OPERACION SUBMARINA	35	°F
PRESION ATMOSFERICA	14,7	Psia

SISTEMA DIVERTER		
FUNCION	PRESION (psig)	VOLUMEN (gal)
SECUENCIA	1500	11
DIVERTER	2000	25
TOTAL		36

**Fuente:** elaboración propia.

Como se presenta en el cuadro anterior, la información necesaria para el cálculo de parámetros de diseño de un acumulador principal de un conjunto submarino es bastante amplia. Allí, se encuentran datos respecto a los volúmenes y cierres de las preventoras, datos específicos para la operación de desconexión en secuencia de emergencia, parámetros del sistema, condiciones ambientales, y, por último, funcionalidades acústicas y del desviador.

Con la información que es presentada en la **Tabla 13**, la herramienta AC-GLOR, reproduce estas condiciones y calcula los parámetros de dimensionamiento del acumulador necesario. Estos resultados se muestran a continuación en la **Tabla 14**:

**Tabla 14.** Resultados de la herramienta AC-GLOR para el escenario 7.

	TEMPERATURA °F	DENSIDAD DE PRECARGA (lb/ft3)	PRESIÓN DE PRECARGA (Psig)	CAPACIDAD REQUERIDA (Gal)	NUMERO DE BOTELLAS
<b>EJEMPLO 7</b>	90	10,255	2212	975,5	98
<b>AC-GLOR</b>	90	10,24186076	2209,2	974,253481	98
<b>ERROR</b>		0,13%	0,13%	0,13%	0,00%

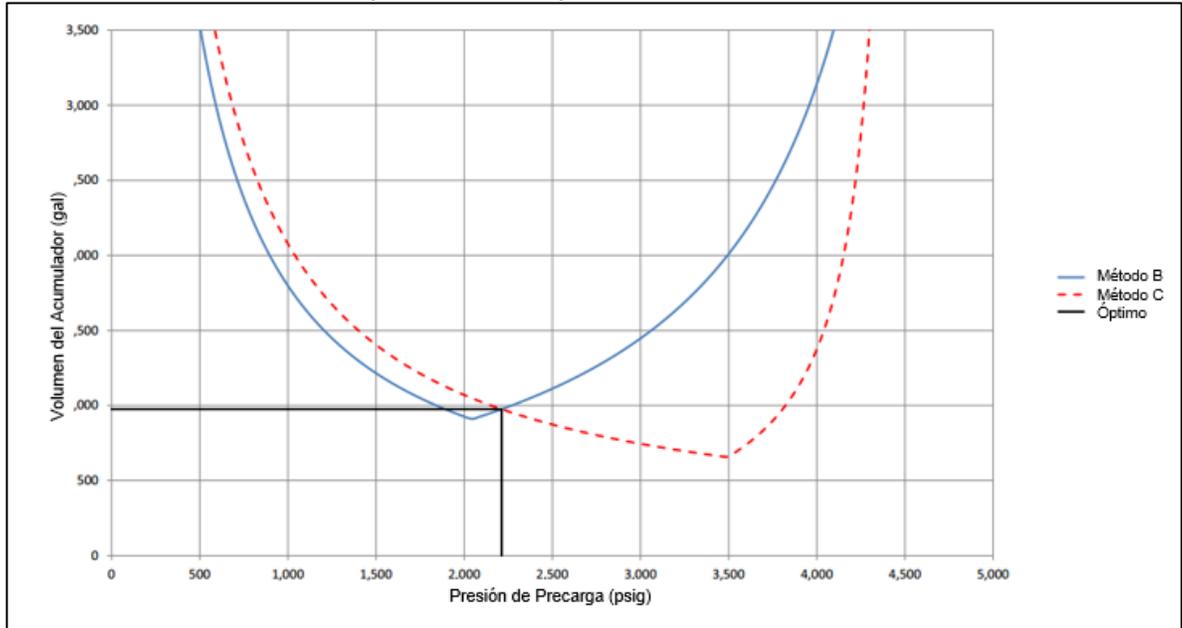
**Fuente:** elaboración propia.

Según los resultados de la herramienta AC-GLOR, se observa que la exactitud de cálculo en este escenario es bastante buena, al igual que en los otros previamente analizados. Se denotan incongruencias en decimales de los cálculos al tener el mismo fallo de interpolación en tablas NIST que anteriormente ha sido discutido.

Por otro lado, vemos que el valor de capacidad requerida para este acumulador es bastante elevado. La razón de ello es por la ejecución de apertura y cierre que este dispositivo debe operar. Debe manipular un total de ocho (8) elementos de control de pozo que se encuentran a una profundidad de 75 ft. Es decir, se necesita un mayor volumen en el acumulador para que la presión que éste ejerza compense la profundidad y la longitud de las tuberías de accionamiento de los preventores alojados en el lecho marino

Como última medida, se muestra en la **Gráfica 7** el correcto modelamiento de la capacidad requerida del acumulador en función de la presión de precarga del mismo que verifica satisfactoriamente el cumplimiento de la convergencia de los dos métodos de dimensionamiento (B y C).

**Gráfica 7.** Resultados de parámetros óptimos de diseño del escenario 7.



**Fuente:** API. *AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 16D Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment* 2018. p. 120

**3.1.1.8 Conjunto submarino – Acumulador piloto.** En el escenario número ocho (8) de operación enmarcado en la norma API 16D, se diseña un acumulador para un conjunto submarino, el cual tendrá las mismas funciones que el principal, con la excepción que los volúmenes de cierre y apertura de cada uno de los elementos de control será mucho más pequeño. Estos detalles del fabricante se aprecian a continuación en la **Tabla 15**:

**Tabla 15.** Variables adicionales de entrada para la reproducción del escenario 8.

ACUMULADOR DRAWDOWN-FUNCIONES DE OPERACIÓN (MÉTODO B)	TAMAÑO DE VALVULA (in)	VOL APERTURA (GAL)	VOL CIERRE (GAL)	PRESIÓN REQUERIDA (Psig)
ANULAR BOB SUPERIOR 18-3/4"	1,5	0,006	0,006	1500
ANULAR BOB INFERIOR 18-3/4"	1,5	0,006	0,006	1500
RAM CIEGO-CORTADOR SUPERIOR 18-3/4"	1	0,003	0,003	1500
RAM CORTE DE CSG 18-3/4"	1	0,003	0,003	1500
RAM CIEGO-CORTADOR INFERIOR 18-3/4"	1	0,003	0,003	1500
RAM TUBERIA SUPERIOR 18-3/4"	1	0,003	0,003	1500
RAM TUBERIA MEDIO 18-3/4"	1	0,003	0,003	1500
RAM TUBERIA INFERIOR 18-3/4"	1	0,003	0,003	1500
VOLUMEN PARA ABRIR Y CERRAR TODAS BOPs		0,0600 gal		
200% VOLUMEN PARA ABRIR Y CERRAR TODAS BOPs (VFRb)		0,12 gal		
PRESION REQUERIDA		1500 Psig		

**Tabla 15.** (Continuación)

ACUMULADOR DRAWDOWN-FUNCIONES DE OPERACIÓN (MÉTODO B)	TAMAÑO DE VALVULA (in)	VOL REQUERIDO PARA OPERAR (GAL)	PRESION REQUERIDA PARA OPERAR (psig)
BRAZO DEL SISTEMA DMAS	0,5	0,002	1500
CIERRE DELRAM DE CORTE DE CSG	1	0,003	1500
RETRAER GUIAS DEL KILL Y CHOKE	0,5	0,002	1500
RETRAER CONECTOR WETMATE	0,5	0,002	1500
RETRAER GUIAS ACUSTICAS	0,5	0,002	1500
CERRAR RAMS CIEGO-CORTADORES	1	0,003	1500
DESBLOQUEAR CONECTOR DEL RISER -PRIMARIO	1	0,003	1500
DESBLOQUEAR CONECTOR DEL RISER - SECUNDARIO	1	0,003	1500
VOLUMEN PARA OPERAR EDS MAS EXIGENTE		0,0200 gal	
200% VOLUMEN PARA OPERAR EDS MAS EXIGENTE (VFRc)		0,04 gal	
PRESION REQUERIDA		1500 Psig	

**Fuente:** elaboración propia.

La información que se presenta en la **Tabla 15**, junto con la de la **Tabla 13**, se hacen necesarias para la ejecución de cálculos de parámetros de diseño del acumulador piloto. Como se evidencia en el **Tabla 15**, los volúmenes de apertura y cierre son bastante pequeños, debido a que el acumulador piloto solo funciona para pequeñas pruebas de pozo. Es importante recordar que este tipo de acumuladores debe funcionar a un 200% del volumen funcional requerido, y no puede ser suministrado por el acumulador principal, lo que genera que este tipo de dispositivo sea un equipo de asistencia de cierre al acumulador principal.

Los resultados de la simulación de este escenario se pueden observar en la **Tabla 16**, en donde se especifican los parámetros de diseño calculados y el porcentaje de error obtenido al realizar la comparación con los valores teóricos expresados en la norma API 16D.

**Tabla 16.** Resultados de la herramienta AC-GLOR para el escenario 8.

	TEMPERATURA °F	DENSIDAD DE PRECARGA (lb/ft3)	PRESIÓN DE PRECARGA (Psig)	CAPACIDAD REQUERIDA (Gal)	NUMERO DE BOTELLAS
<b>EJEMPLO 8</b>	90	24,609	6900	1,449	1
<b>AC-GLOR</b>	90	24,609	6900	1,44954885	1
<b>ERROR</b>		0,00%	0,00%	0,04%	0,00%

**Fuente:** Elaboración propia.

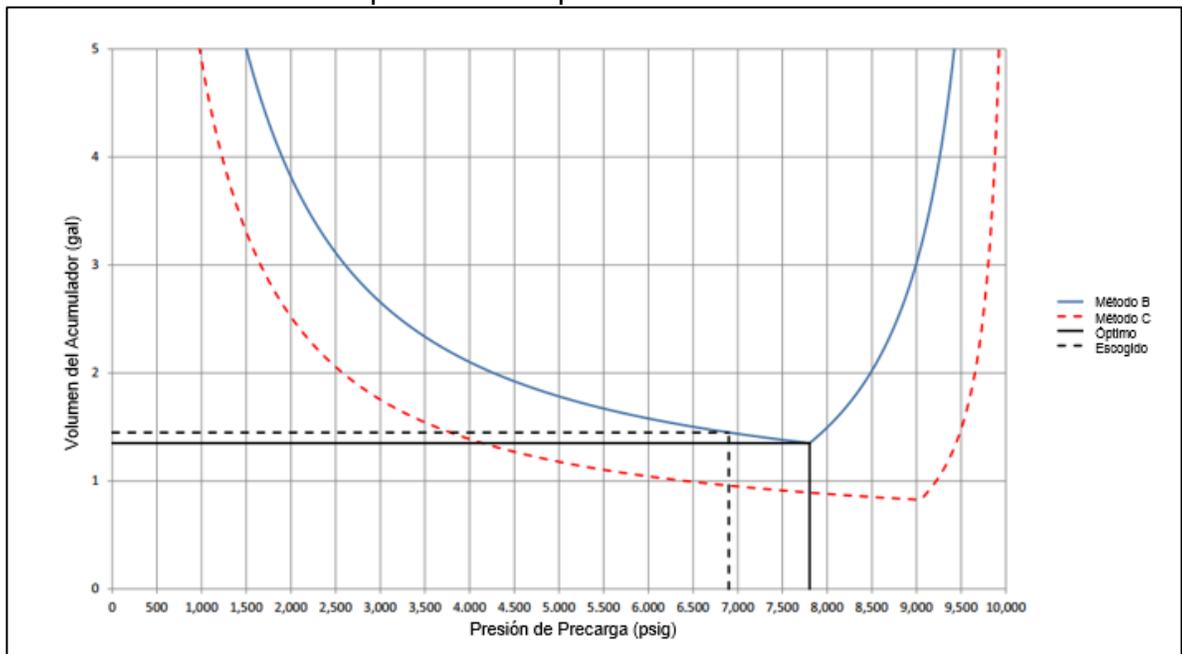
Con base en los resultados presentados en la **Tabla 16**, es posible indicar que es uno de los escenarios más exactos que reproduce la herramienta AC-GLOR, debido a que el error que allí se muestra es bastante bajo, y el cálculo de parámetros de diseño es casi igual al que se indica en la norma.

Por otro lado, tenemos un valor bastante pequeño en la capacidad requerida del acumulador, lo cual nos indica específicamente el tipo de dispositivo que se está diseñando, ya que al ser un equipo de asistencia maneja volúmenes de apertura y cierre muy pequeños que se ven reflejado en su volumen total.

Es de gran importancia resaltar que con los resultados de la **Tabla 16** se da cumplimiento a los requerimientos de la norma API 16D de 2018, Puesto que en dicho estándar se especifica que un acumulador piloto debe tener mínimo dos botellas y que el fallo de una de las mismas no afecta el funcionamiento general del equipo en cuestión.

Por último, como se ha visto en todos los escenarios sometidos a análisis, se muestra a continuación en la **Grafica 8** la convergencia de los resultados que evidencia un correcto modelamiento de acumulador suministrado por la herramienta AC-GLOR.

**Grafica 8.** Resultados de parámetros óptimos de diseño del escenario 8.



**Fuente:** API. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 16D Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment 2018. p. 122

**3.1.1.9 Conjunto submarino – Acumulador de corte (*DeadMan*).** El escenario número nueve (9) que se encuentra enmarcado en la norma API16D, busca modelar un dispositivo que supla el sistema *DeadMan*, el cual permite realizar sello en el pozo ante la ausencia de equipos hidráulicos que suministren sello al hoyo.

Para poder calcular los parámetros de diseño de un acumulador con las características anteriormente mencionadas, es necesaria la información plasmada en la **Tabla 13**. Sin embargo, es esencial contar con la información mostrada a continuación en la **Tabla 17**, puesto que permite el modelamiento del sistema de auto corte (*DeadMan*).

**Tabla 17.** Variables adicionales de entrada para la reproducción del escenario 9.

OPERADOR DE FUNCIÓN	SECUENCIA	RWP (psia)	PRESIÓN REQUERIDA (Psig)		VOL FUNCIONAL (GAL)	RELACIÓN DE CIERRE O DE CORTE	PRESION AJUSTADA (psig)
RAM CORTE DE CSG 18-3/4"	1	15000	2035	corete	40,3	15,24	2654,422572
TIEMPO DE CIRCUITO	2	3000	1500		1	-	1500
RAM CIEGO-CORTADOR SUPERIOR 18-3/4"	2	15000	1710	corete	40,3	15,24	2329,422572
			520	MOPFLPS		6,4	1995
SECUENCIA		1	2				
REQUERIMIENTO DE VOLUMEN FUNCIONAL TOTAL		40,3	41,3	gal			
PRESION REQUERIDA		2654,4226	2329,4226	Psig			
<b>CONDICIONES AMBIENTALES</b>							
PROFUNDIDAD DEL AGUA		12500	ft				
ESPACIO DE AIRE DEL FLUIDO DE CONTROL		75	ft				
ESPACIO DE AIRE EN EL RISER		75	ft				
PESO DEL FLUIDO DE CONTROL		8,34	ppg				
PESO DEL AGUA MARINA		8,54	ppg				
PRESION ESTÁTICA DEL FLUIDO DE CONTROL		5463	psia				
PRESION ESTÁTICA DEL AGUA MARINA		5560	psia				
PRESION ATMOSFERICA		14,7	psia				
TEMP DE SUPERFICIE A LA PRECARGA		90	°F				
TEMP DE OPERACIÓN SUBMARINA		35	°F				
MAX TEMP DE SUPERICIE		120	°F				

**Fuente:** elaboración propia.

Una vez los datos anteriormente mostrados han sido ingresados a la herramienta AC-GLOR, ésta procede a realizar el cálculo de variables que definen el dimensionamiento del dispositivo en cuestión. Para la reproducción de este escenario la herramienta arrojó los siguientes resultados mostrados en la **Tabla 18**.

**Tabla 18.** Resultados de la herramienta AC-GLOR para el escenario 9.

	TEMPERATURA °F	DENSIDAD DE PRECARGA (lb/ft3)	PRESIÓN DE PRECARGA (Psig)	CAPACIDAD REQUERIDA (Gal)	NUMERO DE BOTELLAS
<b>EJEMPLO 9</b>	90	24,609	6900	1576,9	158
<b>AC-GLOR</b>	90	24,609	6900	1594,8852	160
<b>ERROR</b>		0,00%	0,00%	1,14%	1,27%

**Fuente:** elaboración propia.

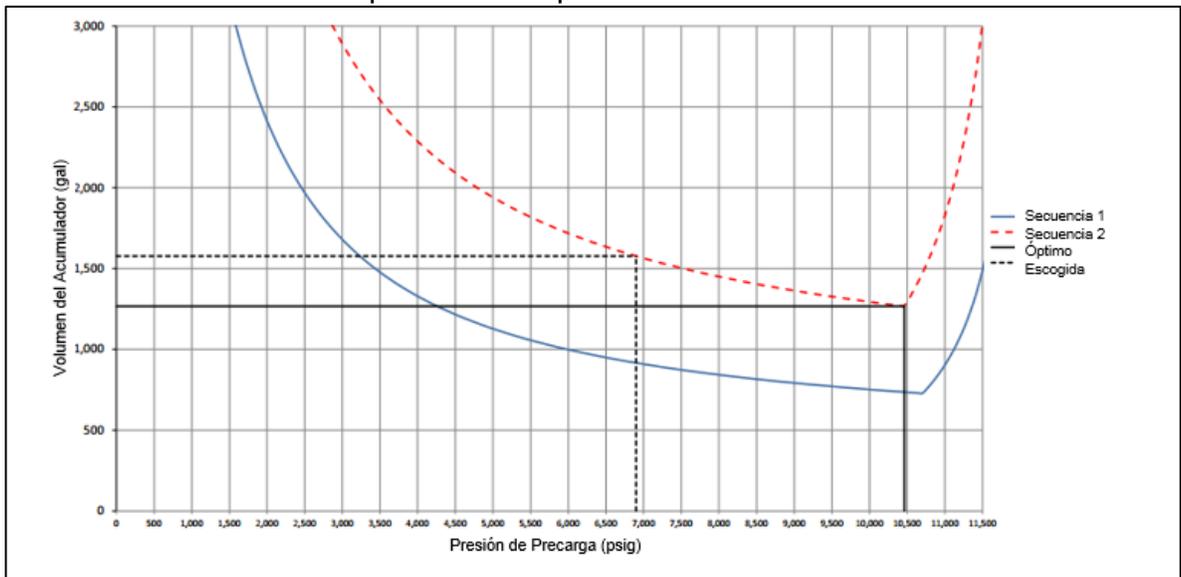
Según los resultados obtenidos de la herramienta AC-GLOR, mostrados en la **Tabla 17**, se observa que existe una incongruencia entre los valores de capacidad del acumulador y el número de botellas respectivas. A pesar de que el error que éstas presentan es bajo, explicado por el número tan alto de cada variable, la diferencia entre los parámetros es significativa.

La desviación entre los resultados de los parámetros se ve explicada por una presión de precarga tan elevada. Cuando este parámetro es tan cercano a la presión de trabajo de todo el sistema, las propiedades termodinámicas del gas tienen mayor variación, entre ellas la densidad y la entropía.

Una vez estos valores cambian a cada condición de cálculo (precarga, carga, MOP, descarga total) crece la desviación respecto a la teórica por pérdida o cambio de decimales, que al final del resultado de la capacidad requerida generan una desviación del número, por lo que la herramienta AC-GLOR, arroja como resultado un volumen mayor al expresado en la norma. Como consecuencia de lo anterior el número de botellas también sufrirá un incremento.

A pesar de que la capacidad del acumulador tiene cierta variación respecto a la teórica, se puede observar en la **Gráfica 9** que el valor del parámetro satisface los métodos de cálculo, al igual que la presión de precarga, por lo que se afirma que la herramienta diseña un acumulador de auto corte de forma correcta.

**Gráfica 9.** Resultados de parámetros óptimos de diseño del escenario 9.



**Fuente:** API. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 16D Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment 2018. p. 124

**3.1.1.10 Conjunto submarino – Acumulador acústico.** En el escenario operativo número diez (10) que se encuentra descrito en la norma API 16D, se observa el diseño de un dispositivo accionador de control de pozos tipo acústico, el cual permite tener un sistema de emergencia para el cierre de las barreras de pozo en caso de que las líneas ya sea hidráulicas, eléctricas o neumáticas fallen.

Para la reproducción de este escenario de operación es necesaria la información presentada en la **Tabla 13**. Allí se especifican los datos que se utilizan en el desarrollo de los cálculos de parámetros de diseño para un acumulador acústico. De la misma manera se hace obligatorio ingresar a la herramienta AC-GLOR los datos mostrados en la **Tabla 19** mostrada a continuación:

**Tabla 19.** Variables adicionales de entrada para la reproducción del escenario 10.

OPERADOR DE FUNCIÓN	RWP (psia)	MOPFLPS (psig)	VOLUMEN FUNCIONAL (gal)	RELACION DE CIERRE	PRESION AJUSTADA REQUERIDA (psig)
RAM TUBERIA SUPERIOR	15000	750	20,75	7,2	2061,111111
RAM TUBERIA MEDIO	15000	750	20,75	7,2	2061,111111
RETRAER TODAS LAS GUIAS	3000	1500	5		1500
CONECTOR PRIMARIO RISER+APERTURA SECUNDARIA	3000	1500	16		1500
REQUERIMIENTO DE VOLUMEN FUNCIONAL TOTAL		62,5	gal		
PRESION REQUERIDA		2061,111111	Psig		

**Fuente:** elaboración propia.

Cuando los datos sean ingresados a la herramienta AC-GLOR, ésta ejecuta su secuencia lógica para determinar el dimensionamiento del dispositivo en cuestión. Una vez esto suceda, para el escenario número diez (10) los resultados son los siguientes, presentados en la **Tabla 20**:

**Tabla 20.** Resultados de la herramienta AC-GLOR para el escenario 10.

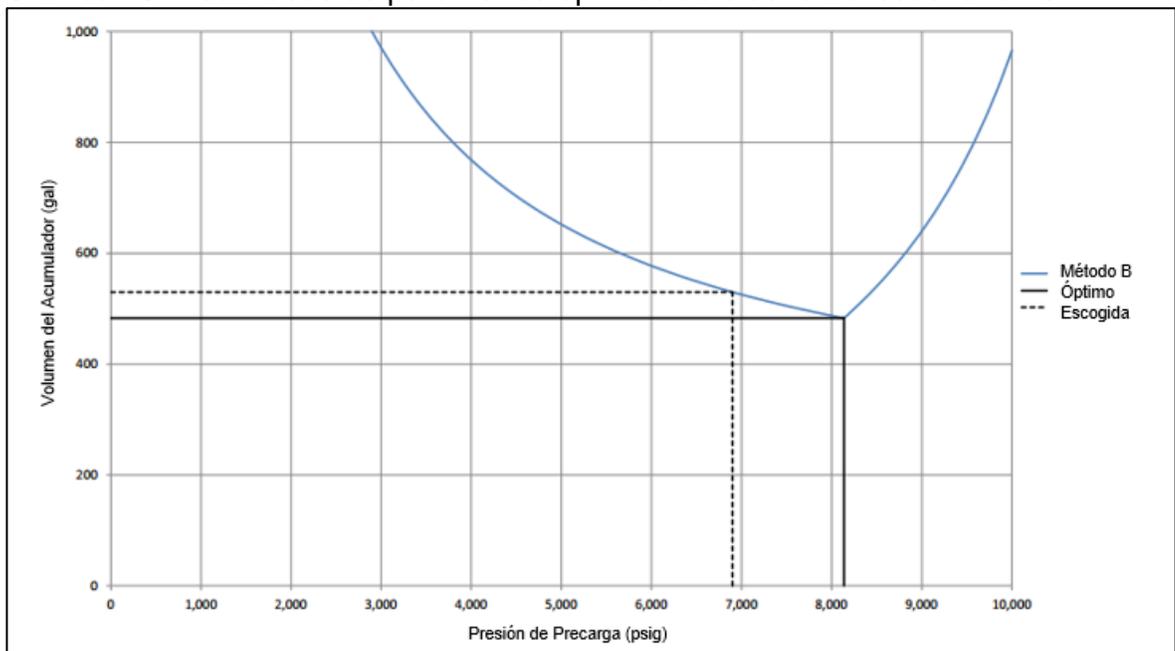
	TEMPERATURA °F	DENSIDAD DE PRECARGA (lb/ft3)	PRESIÓN DE PRECARGA (Psig)	CAPACIDAD REQUERIDA (Gal)	NUMERO DE BOTELLAS
<b>EJEMPLO 10</b>	90	24,609	6900	530	53
<b>AC-GLOR</b>	90	24,609	6900	530,006069	54
<b>ERROR</b>		0,00%	0,00%	0,00%	1,89%

**Fuente:** elaboración propia.

Realizando un análisis de la **Tabla 20**, se puede observar que el error en casi todas las variables de diseño es inexistente. Sin embargo, en el número de botellas existe una gran diferencia, puesto que el cálculo difiere en una botella. Al calcular el error no es algo representativo puesto que es menor al dos (2) por ciento, pero el tener esa diferencia, significa sobre dimensionar o sub dimensionar el equipo. En este caso se identifica que la herramienta AC-GLOR arroja un valor mayor de botellas, y es posible inferir que la norma API16D puede fallar al aproximar el cálculo de sus valores, puesto que en sus resultados estaría sub dimensionando un acumulador indispensable en las operaciones de cierre y control del pozo en plataformas costa afuera.

No obstante, con el valor de capacidad requerida que la herramienta determina como resultado se logra obtener las curvas de convergencia de dicha variable en función de la presión de precarga. Dichas curvas se muestran a continuación en la **Gráfica 10**:

**Gráfica 10.** Resultados de parámetros óptimos de diseño del escenario 10.



**Fuente:** API. *AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 16D Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment* 2018. p. 126

Los datos de capacidad requerida y presión de precarga validados con la gráfica 10, pueden ser usados en el diseño del acumulador. Es de importancia exponer que en este escenario el volumen del dispositivo se encuentra en 530 galones, lo cual es un valor bastante alto. Esto se debe a que este dispositivo específico debe suplir un acumulador principal, pero sin poseer líneas físicas, ya que su accionamiento es mediante ondas acústicas; Es por eso que el volumen debe ser alto para así ser

capaz de accionar todas las cámaras de apertura y cierre de las barreras secundarias ubicadas en el lecho marino.

**3.1.1.11 Conjunto submarino – Acumulador para *Diverter*.** El acumulador dedicado al funcionamiento del desviador que será diseñado por la herramienta AC-GLOR basado en el escenario operativo enmarcado en la norma API tendrá como objetivo satisfacer la operación de apertura y cierre del *diverter*. Para ello requiere de información mostrada en la **Tabla 13**, y adicionalmente la que se encuentra presentada a continuación en la **Tabla 21**:

**Tabla 21.** Variables adicionales de entrada para la reproducción del escenario 11.

OPERADOR DE FUNCIÓN	RWP (psig)	PRESION REQUERIDA (psig)	VOLUMEN FUNCIONL (gal)
SECUENCIA FUNCIONAL DELDIVERTER	1500	1500	11
DIVERTER	500	1500	25
REQUERIMIENTO DE VOLUMEN FUNCIONAL TOTAL		36	gal
PRESION REQUERIDA		1500	Psig
CONDICIONES AMBIENTALES			
PRESION ATMOSFERICA	14,7	psia	
TEMP DE SUPERFICIE A LA PRECARGA	90	°F	
MAX TEMP DE SUPERICIE	120	°F	
ACUMULADORES			
GAS DE PRECARGA	NITROGENO		
RWP DEL ACUMULADOR	5000	Psig	
PRESIÓN DE SUMINISTRO REGULADA	5000	Psig	

**Fuente:** elaboración propia.

Como se aprecia anteriormente, en la **Tabla 21** se muestran los volúmenes necesarios para operar el desviador, así mismo la presión con la que trabaja dicho dispositivo. Cuando los datos se encuentran compilados en la herramienta AC-GLOR, ésta arroja como resultado las variables de dimensionamiento del acumulador en cuestión que se muestran en la **Tabla 22**:

**Tabla 22.** Resultados de la herramienta AC-GLOR para el escenario 11.

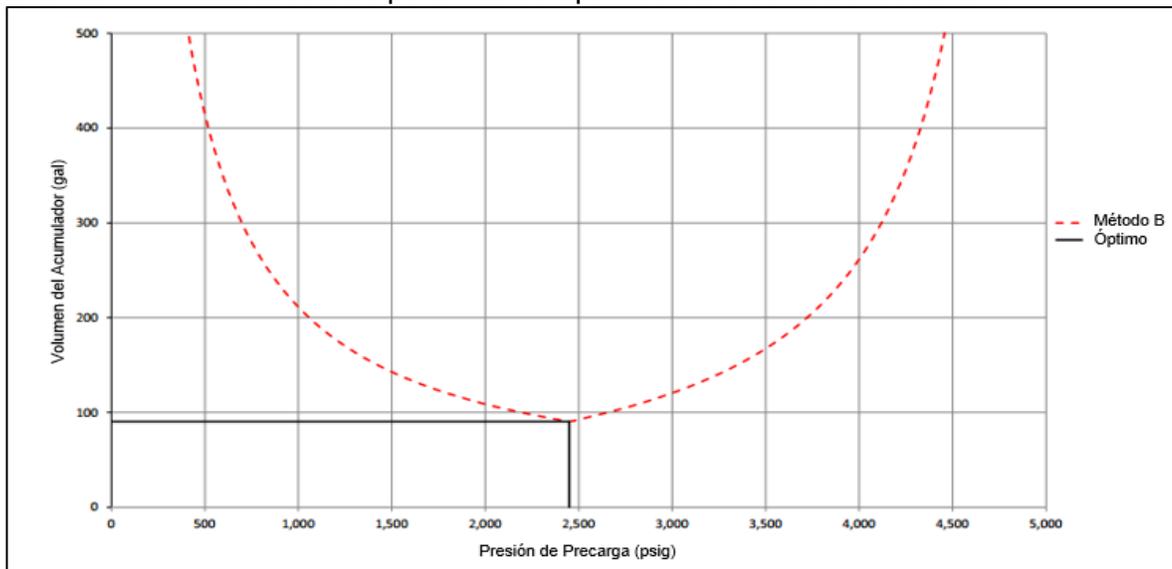
	TEMPERATURA °F	DENSIDAD DE PRECARGA (lb/ft3)	PRESIÓN DE PRECARGA (Psig)	CAPACIDAD REQUERIDA (Gal)	NUMERO DE BOTELLAS
<b>EJEMPLO 11</b>	90	11,247	2450	90,5	10
<b>AC-GLOR</b>	90	11,20953357	2440,8	90,0918642	10
<b>ERROR</b>		0,33%	0,38%	0,45%	0,00%

**Fuente:** elaboración propia.

Al realizar la comparación en el escenario número once (11) de los resultados de la herramienta digital con los teóricos, se puede observar que el mayor error se encuentra en la capacidad requerida del acumulador. Para explicar este error es necesario hacer énfasis en las variables de densidad y presión de precarga. Al revisarlas se hace evidente un valor creciente del error en cada una de ellas, lo cual permite inferir que el valor de error en el volumen del acumulador se debe a un error de decimales y aproximaciones que va siendo creciente a medida que todos los cálculos se llevan a cabo

Sin embargo, el cálculo del volumen en función de la presión de precarga arroja un gráfico asertivo en el que se evidencia la convergencia del cálculo con los métodos de cálculo de los parámetros de diseño del dispositivo en cuestión. La convergencia explicada se muestra a continuación en la **Gráfica 11**.

**Gráfica 11.** Resultados de parámetros óptimos de diseño del escenario 11.



**Fuente:** API. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 16D Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment 2018. p. 128

**3.1.1.12 Conjunto submarino – Acumulador compensado por profundidad (Propósito especial).** Los diseños de acumuladores que tienen un propósito especial se realizan con el fin de dimensionar un equipo de presión que cumplirá una tarea específica. Para la reproducción del escenario doce (12) se ejecuta el modelamiento de un acumulador que abre y cierra las preventoras ubicadas en lecho marino, pero corrige las pérdidas de energía que tiene el gas al comprimirse cuando viaja a través de tuberías ubicadas grandes profundidades entre la plataforma y el lecho marino (Aguas profundas).

Para poder realizar el diseño de un acumulador especial, la herramienta AC-GLOR requiere el ingreso por parte del usuario de los siguientes datos mostrados en la **Tabla 23:**

**Tabla 23.** Variables de entrada para la reproducción del escenario 12 y 13.

STACK	RWP (psia)	MOP (Psig)	VOL CIERRE (GAL)	VOL APERTURA (GAL)	RELACIÓN DE CIRRE O CORTE
ANULAR SUPERIOR BOB 18-3/4"	10000	1500	85,3	64,8	-
ANULAR INFERIOR BOB 18-3/4"	10000	1500	85,3	64,8	-
RAM CIEGO-CORTADOR SUPERIOR 18-3/4"	15000	1710	40,3	35	15,24 Corte
		520			6,4 Sello
RAM CORTADOR CSG 18-3/4"	15000	2035	40,3	35	15,24
RAM CIEGO-CORTADOR INFERIOR 18-3/4"	15000	1710	40,3	35	15,24 Corte
		520			6,4 Sello
RAM TUBERIA SUPERIOR 18-3/4"	15000	750	20,75	17,3	7,2
RAM TUBERIA MEDIO 18-3/4"	15000	750	20,75	17,3	7,2
RAM TUBERIA INFERIOR 18-3/4"	15000	750	20,75	17,3	7,2
CHOKEY Y VALVULA DE MATAR	15000	780	0,65	0,65	-

PARAMETROS DEL SISTEMA	
PRESION DE SISTEMA	5000 psig
PRESION REGULADA DE SUMINISTRO	3000 psig
ESPACIO DE AIRE EN EL RISER	75 ft
ESPACIO DE AIRE EN EL FLUIDO DE CONTROL	75 ft
PESO DE FLUIDO DE CONTROL	8,34 ppg
PESO DEL AGUA MARINA	8,54 ppg
PROFUNDIDAD DEL AGUA	12500 ft

OPERADOR DE FUNCIÓN	SECUENCIA	RWP (psia)	PRESIÓN REQUERIDA (Psig)	VOL FUNCIONAL (GAL)	RELACIÓN DE CIERRE O DE CORTE	PRESION AJUTSADA (psig)
RAM CORTE DE CSG 18-3/4"	1	15000	2035	40,3	15,24	2654,357
TIEMPO DE CIRCUITO	2	3000	1500	1	-	1500
RAM CIEGO-CORTADOR SUPERIOR 18-3/4"	2	15000	1710	40,3	15,24	2329,357
			520	MOPFLPS	6,2	2042,4194

SECUENCIA	1	2
REQUERIMIENTO DE VOLUMEN FUNCIONAL TOTAL	40,3	41,3 gal
PRESION REQUERIDA	2654,357	2329,357 Psig

**Fuente:** elaboración propia.

Dentro de los datos que se pueden apreciar anteriormente se encuentran los volúmenes de accionamiento de todos los elementos de control d pozo, parámetros del sistema y los volúmenes requeridos para cada secuencia que llevara a cabo el acumulador para dar sello al pozo. De la misma manera, con los datos que fueron descritos en la **Tabla 23** se procede a realizar el cálculo de los parámetros de diseño

del dispositivo a dimensionar. Obteniendo los resultados mostrados a continuación en la **Tabla 24**:

**Tabla 24.** Resultados de la herramienta AC-GLOR para el escenario 12.

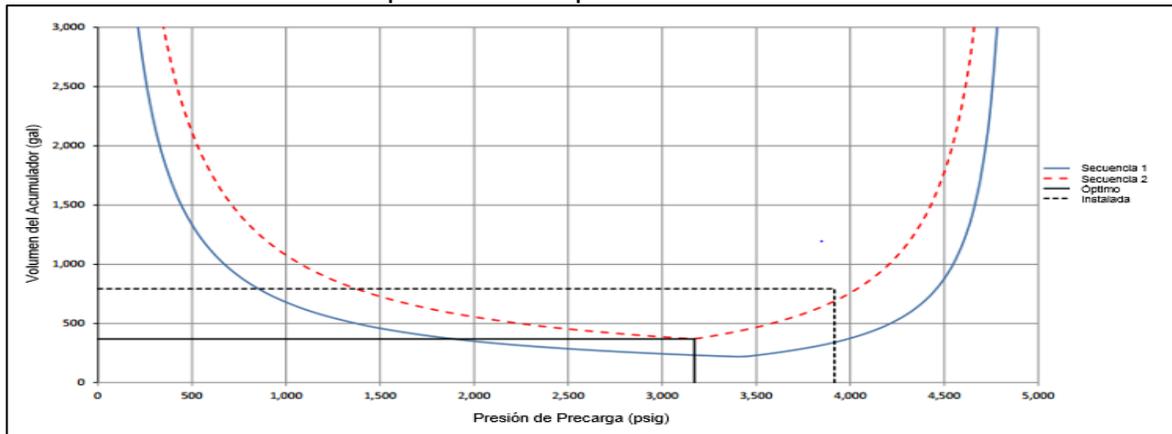
	TEMPERATURA °F	DENSIDAD DE PRECARGA (lb/ft3)	PRESIÓN DE PRECARGA (Psig)	CAPACIDAD REQUERIDA (Gal)	NUMERO DE BOTELLAS
<b>EJEMPLO 12</b>	90	16,697	3916	687,9	14
<b>AC-GLOR</b>	90	16,697	3916,3	696,306952	14
<b>ERROR</b>		0,00%	0,01%	1,22%	0,00%

**Fuente:** elaboración propia.

La herramienta AC-GLOR con base en los datos de entrada que le fueron ingresados, produjo los resultados mostrados en el Cuadro 30. En ellos podemos observar que el único valor alto de porcentaje de error se encuentra en la capacidad requerida con un desfaz de 8,4 galones. Si bien esto no representa ninguna alteración en el dimensionamiento de las botellas, es importante recalcar que no hay una exactitud tan alta en el diseño de dicha variable. El error es producido por el uso de decimales durante todos los cálculos de los parámetros.

Así mismo, es de importancia realizar énfasis en el alto volumen que presenta el diseño del acumulador. Esto se debe a las fuerzas gravitacionales y de presión hidrostática que debe vencer para poder accionar las cámaras de las barreras de control que se encuentran en el lecho submarino. Como resultado de este valor se observa a continuación en la **Gráfica 12** la convergencia de los datos según el método de dimensionamiento:

**Gráfica 12.** Resultados de parámetros óptimos de diseño del escenario 12.



**Fuente:** API. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 16D Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment 2018. p. 131

**3.1.1.13 Conjunto submarino – Acumulador de asistencia de cierre de la línea de estrangulamiento y de matar.** En el último escenario de reproducción que se encuentra especificado en la norma API 16D DE 2018 se tiene el diseño de un acumulador de propósito especial cuya operación ejecuta procedimientos de cierres específicos en las líneas de control de pozo, las cuales son las de estrangulamiento y las de matar.

Para que la herramienta AC-GLOR tenga la capacidad de ejecutar la secuencia lógica de cálculos de diseño, es necesario los datos presentados en la **Tabla 23**, y de manera alterna las variables que se presentan a continuación en la **Tabla 25**:

**Tabla 25.** Variables adicionales de entrada para la reproducción del escenario 13.

OPERADOR DE FUNCIÓN	RWP (psia)	PRESION REQUERIDA (psig)	VOLUMEN FUNCIONL (gal)
TODAS LAS VALVULAS INTERNAS DEL CHOKE Y LINEA DE MATAR	15000	780	3,9
REQUERIMIENTO DE VOLUMEN FUNCIONAL TOTAL		3,9	gal
PRESION REQUERIDA		780	Psig
CONDICIONES AMBIENTALES			
PROFUNDIDAD DEL AGUA	12500		ft
ESPACIO DE AIRE DEL FLUIDO DE CONTROL	75		ft
PESO DEL FLUIDO DE CONTROL	8,34		ppg
PESO DEL AGUA MARINA	8,54		ppg
PRESION ESTATICA DEL FLUIDO DE CONTROL	5463		psia
PRESION ESTATICA DEL AGUA MARINA	5561		psia
PRESION ATMOSFERICA	14,7		psia
TEMP DE SUPERFICIE A LA PRECARGA	90		°F
TEMP DE OPERACIÓN SUBMARINA	35		°F
MAX TEMP DE SUPERICIE	120		°F

**Fuente:** elaboración propia.

Una vez los anteriores datos mostrados son ingresados a la herramienta, ésta realiza el cálculo de los parámetros de diseño del acumulador, y para este caso, dimensionar un dispositivo de asistencia de cierre para las dos líneas de control de

pozo (estrangulamiento y matado). Los resultados que la herramienta arrojó se muestran a continuación en la **Tabla 26**:

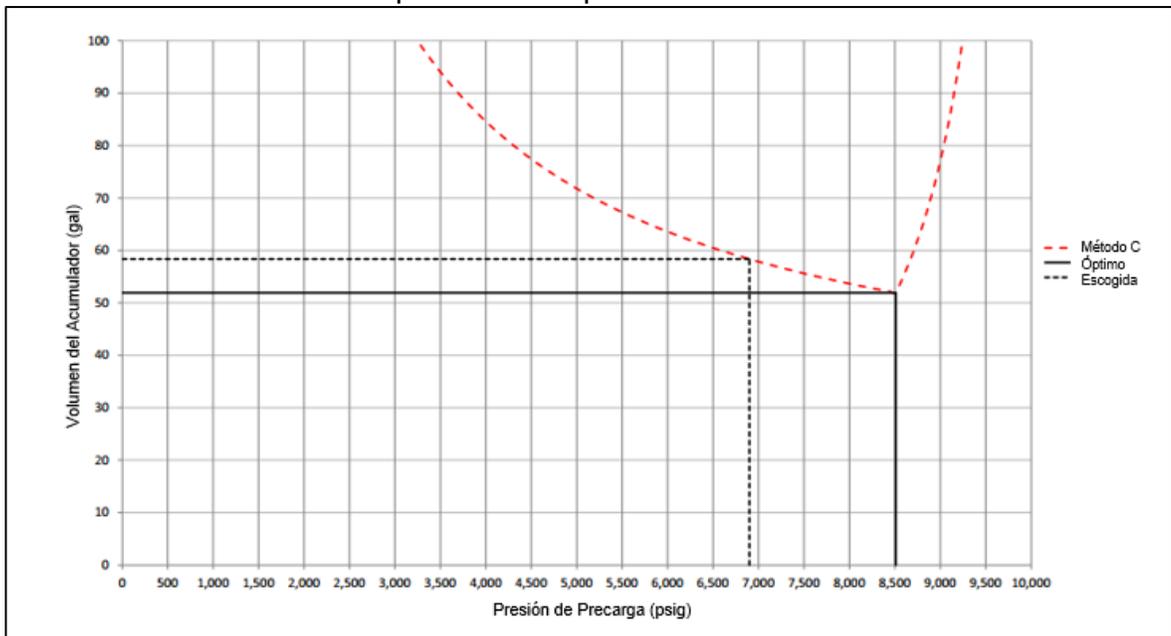
**Tabla 26.** Resultados de la herramienta AC-GLOR para el escenario 13.

	TEMPERATURA °F	DENSIDAD DE PRECARGA (lb/ft3)	PRESIÓN DE PRECARGA (Psig)	CAPACIDAD REQUERIDA (Gal)	NUMERO DE BOTELLAS
<b>EJEMPLO 13</b>	90	24,609	6900	58,4	6
<b>AC-GLOR</b>	90	24,609	6900	58,6980257	6
<b>ERROR</b>		0,00%	0,00%	0,51%	0,00%

**Fuente:** Elaboración propia.

Con los resultados que la herramienta presentó, se observa una alta exactitud en los parámetros de diseño del acumulador, puesto que los errores generados no superan el uno (1) por ciento. Adicionalmente a esto, se observa en la **Gráfica 13** la convergencia de los datos que demuestran que la capacidad requerida en función de la presión de precarga satisface el método de cálculo.

**Gráfica 13.** Resultados de parámetros óptimos de diseño del escenario 13.



**Fuente:** API. *AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 16D Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment* 2018. p. 131

### 3.2 IMPLEMENTACIÓN DE LA HERRAMIENTA AC-GLOR EN TALADROS REALES QUE OPERAN EN COLOMBIA

En esta sección del presente trabajo se dará a conocer los resultados que se obtuvieron al llevar a cabo el cuarto objetivo. Allí se enmarca la implementación de la herramienta AC-GLOR en taladros en tierra reales que operan en Colombia con la finalidad de verificar el cumplimiento de la norma API 16D de 2015. El cumplimiento se basa principalmente en el número de botellas que cumplan con el requerimiento de volumen del diseño, y la presión con la que debe ser precargado el dispositivo acumulador de presión.

A continuación, en la **Tabla 27** se presentan los datos operativos de cuatro (4) taladros en tierra. Allí se encuentra información relacionada a las preventoras que actualmente se encuentran en operación. Con base en los datos se procede a realizar el cálculo de parámetros de diseño a través de la herramienta AC-GLOR para posteriormente verificar el cumplimiento de la norma.

Así mismo en la **Tabla 28** se muestran las condiciones ambientales en las cuales los acumuladores de todos los taladros a analizar se encuentran operando. Éstos son datos indispensables para realizar el diseño del dispositivo para cada uno de los taladros a los cuales se les realizará la verificación de cumplimiento de la norma API 16D de 2018.

**Tabla 27.** Datos operativos de taladros sometidos a análisis.

TALADROS VERIFICACION DISEÑO ACUMULADOR								
TALADROS	BOP	RWP (Psig)	DIAMETRO (Pulgadas)	VOLUMEN DE CIERRE (Gal)	VOLUMEN DE APERTURA (Gal)	RELACION DE CIERRE	PRESION DE PRECARGA (Psig)	NUMERO DE BOTELLAS
Nabors 1500 HP	1 Anular T 90	5000	13 5/8	25,09	18,54	-----	1000	31
	1 RAM TIPO U	10000	13 5/8	5,8	5,5	7		
	1 RAM TIPO U	10000	13 5/8	5,8	5,5	7		
	1 RAM TIPO U	10000	13 5/8	5,8	5,5	7		
	1 HCR	10000		0,65	0,65			
Nabors 1000 HP	1 Anular T 90	5000	11	19,06	14,92	-----	1000	24
	1 RAM T 82	5000	11	3,19	2,81	5,59		
	1 RAM T 82	5000	11	3,19	2,81	5,59		
	1 HCR	5000		0,65	0,65			
Petroworks 1000 HP	1 Anular T 90	5000	11	19,06	14,92	-----	1000	16
	1 RAM T 82	5000	11	3,19	2,81	5,59		
	1 RAM T 82	5000	11	3,19	2,81	5,59		
Petroworks 750 HP	1 Anular T 90	5000	7 1/16	4,84	3,41	-----	1000	8
	1 RAM T 82	5000	7 1/16	1,24	1,04	4,46		
	1 RAM T 82	5000	7 1/16	1,24	1,04	4,46		

**Fuente:** elaboración propia.

**Tabla 28.** Condiciones ambientales de taladros sometidos a análisis.

PARÁMETROS DEL SISTEMA	
PRESIÓN DEL SISTEMA:	3000 P <sub>sig</sub> GAS DE PRECARGA NITROGENO
CONDICIONES AMBIENTALES	
TEMP DE SUPERFICIE EN LA PRECARGA:	70 F
RANGO DE TEMP (+/- F)	50 F
MIN TEMP SUPERFICIE	20 F
MAX TEMP SUPERFICIE	120 F
PRESIÓN ATMOSFÉRICA	14.7 P <sub>sia</sub>

**Fuente:** elaboración propia.

Como se puede apreciar en la **Tabla 27**, los cuatro (4) taladros a analizar manejan un conjunto de preventoras similar; la diferencia radica en la configuración de las mismas, la cantidad de *rams* usados en cada escenario operativo, y los volúmenes de apertura y cierre que cada uno maneja, el cual está dado por los diámetros de hueco que se tienen en cada pozo.

La descripción de cada una de las preventoras que manejan los taladros de análisis se encuentra en el **ANEXO B** del presente documento.

Adicionalmente, las condiciones ambientales que se muestran en la **Tabla 28**, serán usadas para reproducir los cuatro (4) escenarios de análisis, ya que, al encontrarse en Colombia, el rango de temperaturas es totalmente aplicable (20-120 °F). Así mismo, la presión del sistema permanece fija en 3000 libras de presión ya que ninguna de los taladros a analizar maneja una presión mayor que la establecida anteriormente.

**3.2.1 Diseño de acumulador para taladro 1 – Nabors (1500 HP).** La simulación de este taladro real se realiza con base en la información presentada en las **Tablas 27 y 28**. Allí se encuentran todos los valores de las variables que la herramienta AC-GLOR requiere para ejecutar el dimensionamiento del acumulador. Una vez se tienen todos los datos de las variables, se procede a ingresarlos en la herramienta digital como se muestra a continuación en la **Figura 10**:

**Figura 10.** Interfaz de entrada de datos para el taladro 1.

STACK	RWP (psig)	MOP (psig)	VOL CIERRE (gal)	VOL APERTURA (gal)	RELACIÓN DE CIERRE
ANULAR BOP	5000	1500	25,09	18,54	
RAM CIEGO	10000	600	5,8	5,5	7
RAM TUBERIA	10000	750	5,8	5,5	7
RAM TUBERIA	10000	750	5,8	5,5	7
CHOKE Y VALVULA DE MATAR	10000	780	0,65	0,65	

PARÁMETROS DEL SISTEMA		CONDICIONES AMBIENTALES	
PRESION DE SISTEMA (psig)	3000	TEMP DE SUPERFICIE EN LA PRECARGA (°F)	70
		RANGO DE TEMP (+/-°F)	50
		MIN TEMP SUPERFICIE (°F)	20
		MAX TEMP SUPERFICIE (°F)	120
		PRESIÓN ATMOSFÉRICA (psia)	14,7

**Fuente:** elaboración propia.

Cuando los datos fueron ingresados a la herramienta AC-GLOR, los datos de salida se muestran a continuación en la **Tabla 29**. Allí se observan los parámetros de diseño arrojó la herramienta, y a su vez las condiciones de diseño que tiene actualmente el taladro Nabors 1500 HP.

**Tabla 29.** Comparación de resultados para el taladro 1.

PARAMETROS DE DISEÑO	TALADRO NABORS 1500 HP	AC-GLOR
Capacidad del Acumulador (Gal)	Aprox. 310	385,3
Numero de botellas	31	39
Densidad de precarga (Lb/ft3)	-	11,3618
Presión de precarga (Psig)	1000	2358

**Fuente:** elaboración propia.

Cabe resaltar que en los taladros actuales no se tiene un valor exacto del volumen o capacidad requerida del acumulador, debido a que con los cálculos de dimensionamiento que se manejan en la actualidad no se determina dicha variable. El cálculo manejado en la actualidad es el Método A de diseño, que determina el

número de botellas con base en el manejo del gas inerte como gas ideal y fijando una presión de precarga en 1000 psig.

Al observar los resultados mostrados en la **Tabla 29**, se puede observar en primera medida el número de botellas. El taladro Nabors 1500 debería tener 39 botellas para satisfacer el requerimiento de volumen establecido por la norma API 16D de 2018 pero solo tiene 31. La consecuencia de no cumplir con el requerimiento volumétrico es que en las ejecuciones de cierre de preventoras puede existir una falla en la operación en el accionamiento de las cámaras de apertura y cierre lo que permitiría escape de fluidos presurizados desde el pozo hacia la superficie.

Por otra parte, se puede detallar la presión de precarga del acumulador actual. Al ser un método de dimensionamiento inapropiado se establece un valor fijo para dicha variable, mientras que, con base en los cálculos de diseño expresados en la norma, la presión de precarga del acumulador para el conjunto específico de preventores que se tiene en la operación, debería ser de 2358 libras manométricas, es decir un 235,8% mayor a la utilizada actualmente.

Es de importancia recalcar que una apropiada presión de precarga determina el fluido remanente en el acumulador en el momento del MOP<sup>6</sup>. Como consecuencia, si el precargado del dispositivo es indebido el fluido que se aloje allí no será suficiente para una secuencia operativa de apertura y cierre, así que se corre el riesgo de no tener suficiente almacenamiento hidráulico para la ejecución de operaciones de cierre en el pozo. Adicional a lo anterior, a pesar de que pueden existir fallas operacionales, la norma exige que debe existir un margen de seguridad en el almacenamiento de fluido hidráulico en las botellas del dispositivo del 25%, así pues, el no tener una presión de precarga óptima en el dispositivo conlleva al incumplimiento de la norma y por tal motivo al decreto 1073 del 2015 del código de petróleos, donde se estipula que las operaciones de exploración y producción de hidrocarburos deben acogerse a normas y estándares internacionales como la API y las NORSHOK.

**3.2.2 Diseño de acumulador para taladro 2 – Nabors (1000 HP).** Con base en la información presentada en las **Tablas 27 y 28**, se procede a realizar la simulación del escenario operativo para el taladro Nabors 1000 HP a través de la herramienta AC-GLOR. Cuando se tienen compilados todos los datos de entrada, que se muestra en la **Figura 11**, la herramienta procede a ejecutar su secuencia lógica para determinar el correcto dimensionamiento del acumulador, evidenciando los parámetros de diseño que se estipulan en la norma API 16D.

---

<sup>6</sup> API. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 16D Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment 2018. p. 26

**Figura 11.** Interfaz de entrada de datos para el taladro 2.

STACK	RWP (psig)	MOP (psig)	VOL CIERRE (gal)	VOL APERTURA (gal)	RELACIÓN DE CIERRE
ANULAR BOP	5000	1500	19,06	14,92	
RAM CIEGO	5000	600	3,19	2,81	5,59
RAM TUBERIA					
RAM TUBERIA	5000	750	3,19	2,81	5,59
CHOKE Y VALVULA DE MATAR	5000	780	0,65	0,65	

PARÁMETROS DEL SISTEMA	CONDICIONES AMBIENTALES
PRESION DE SISTEMA (psig)	TEMP DE SUPERFICIE EN LA PRECARGA (°F)
3000	70
	RANGO DE TEMP (+/-°F)
	50
	MIN TEMP SUPERFICIE (°F)
	20
	MAX TEMP SUPERFICIE (°F)
	120
	PRESIÓN ATMOSFÉRICA (psia)
	14,7

**Fuente:** elaboración propia.

Como primera medida, se observa en la **Figura 11** que el taladro en análisis solo tiene un conjunto doble de Rams, es decir solo tiene una barrera ciega y otra de tubería. Esto está dado simplemente por el tamaño del taladro.

Al igual que en el taladro previamente analizado en la **Sección 5.3.1**, a continuación, se muestra el esquema comparativo de los valores de cada parámetro de diseño del acumulador actual del taladro con los datos de salida que arrojó la herramienta AC-GLOR en la **Tabla 30**:

**Tabla 30.** Comparación de resultados para el taladro 2.

PARAMETROS DE DISEÑO	TALADRO NABORS 1000 HP	AC-GLOR
Capacidad del Acumulador (Gal)	Aprox. 240	86,5
Numero de botellas	24	9
Densidad de precarga (Lb/ft3)	-	9,298
Presión de precarga (Psig)	1000	1896

**Fuente:** elaboración propia.

Previamente, en la sección inmediatamente anterior, se especificó por qué los datos de capacidad requerida y densidad de precarga no están descritos en los parámetros de diseño de los taladros actuales. Una vez descrito esto, se puede observar en primera instancia la gran diferencia que se tiene en el dimensionamiento del acumulador, tanto en su número de botellas como en la presión de precarga.

Se identifica en la comparación que el taladro Nabors 1000 HP, cuenta con más del doble de número de botellas. Con base en esto se asegura que cumple con los requerimientos de volumen, pero muy seguramente el dispositivo se encuentra sobredimensionado, ya sea por error de cálculo, o por la implementación del equipo proveniente de un taladro mucho más grande. Este sobredimensionamiento no afecta en lo absoluto la operación, puesto que su desempeño será el mismo que un dispositivo que tenga nueve (9) botellas como lo determina la norma a través de la herramienta AC-GLOR.

No obstante, se tiene el valor de la presión de precarga en 1000 psi, cuando según los requerimientos operativos de las preventoras en uso debería ser de 1896 psi. Al igual que en el caso anterior, una errónea presión de precarga conlleva errores operativos serios, no solo en la incertidumbre del cierre de las preventoras en una eventualidad de cierre de emergencia, sino que arriesga la integridad económica de toda la instalación operativa y la integridad física del personal que se encuentra en la operación

Por último, como recomendación para el taladro Nabors 1000 HP, se recomienda al menos precargar su acumulador en un valor de 1273,6 psi, ya que la herramienta AC-GLOR, en sus variables de salida expone los valores de precarga para el método B, el método C, y la cual satisface ambos métodos. La menor presión de precarga entre las tres anteriormente nombradas es la cual satisface el Método B, por lo que se sugiere que éste sea el valor mínimo de precarga, y no los 1000 psi que se manejan actualmente.

**3.2.3 Diseño de acumulador para taladro 3 – Petroworks (1000 HP).** Para la implementación de la herramienta AC-GLOR en el tercer taladro de análisis, al igual que en los otros dos anteriores, es necesaria toda la data de entrada que presentada en las **Tablas 27 y 28**. Una vez son ingresados a la herramienta digital de diseño, ésta realiza las secuencias lógicas necesarias para calcular los parámetros de diseño del acumulador, que cumplirá con los requisitos operativos que demanda el taladro Petroworks 1000 HP, y que al mismo tiempo cumplen los estándares de la norma API 16D, base de este trabajo de investigación.

De la misma manera, en la **Figura 12**, se muestra la interfaz de los datos de entrada para el taladro de análisis. Con ellos, la herramienta procede a realizar el dimensionamiento adecuado para el escenario operativo requerido.

**Figura 12.** Interfaz de entrada de datos para el taladro 3.

STACK	RWP (psig)	MOP (psig)	VOL CIERRE (gal)	VOL APERTURA (gal)	RELACIÓN DE CIERRE
ANULAR BOP	5000	1500	19,06	14,92	
RAM CIEGO	5000	600	3,19	2,81	5,59
RAM TUBERIA	5000	750	3,19	2,81	5,59
RAM TUBERIA					
CHOKE Y VALVULA DE MATAR	5000	780	0,65	0,65	

PARÁMETROS DEL SISTEMA	CONDICIONES AMBIENTALES
PRESION DE SISTEMA (psig)	TEMP DE SUPERFICIE EN LA PRECARGA (°F)
3000	70
	RANGO DE TEMP (+/-°F)
	50
	MIN TEMP SUPERFICIE (°F)
	20
	MAX TEMP SUPERFICIE (°F)
	120
	PRESIÓN ATMOSFÉRICA (psia)
	14,7

**Fuente:** elaboración propia.

Con base en los datos mostrados anteriormente y mediante los cálculos desarrollados por la herramienta AC-GLOR; ésta genera una serie de parámetros de diseño que satisfacen los requerimientos operacionales del taladro Petroworks 1000 HP. Dichos resultados, en comparación con el dimensionamiento actual, se presentan a continuación en la **Tabla 31**:

**Tabla 31.** Comparación de resultados para el taladro 3.

PARAMETROS DE DISEÑO	TALADRO PETROWORKS	AC-GLOR
Capacidad del Acumulador (Gal)	Aprox 160.	138,7
Numero de botellas	16	14
Densidad de precarga (Lb/ft3)	-	9,298
Presión de precarga (Psig)	1000	1896

**Fuente:** elaboración propia.

Con los resultados mostrados previamente, es pertinente enmarcar la condición de cumplimiento de la norma del taladro Petroworks 1000 HP, pero no en su totalidad. Por un lado, el volumen del acumulador actual es suficiente para cubrir la demanda volumétrica que posee todo el conjunto de preventores utilizados en la operación,

ya que el mínimo de botellas según la norma API 16D debe ser de 14 y actualmente se usan 16. La razón por la que se tiene un exceso en volumen puede ser por dos motivos. El primero es un uso de un dispositivo que se encuentra dentro de los activos de la empresa operadora, o segundo, posiblemente es por el método de diseño.

Un método de diseño mal ejecutada puede traer como consecuencia un mal dimensionamiento del equipo. Esto es debido a que, si los cálculos se hacen basándose en gases ideales, al asumir un factor de compresibilidad de uno (1), se infiere que la transferencia de masa del gas inerte se lleva a cabo en su totalidad, sin sufrir ninguna pérdida de masa durante las cargas o descargas del acumulador. En el análisis de gases reales, esta asunción pierde validez, pues al asumir un gas real, la compresión y descompresión traen como consecuencia una pérdida volumétrica entre las etapas de ejecución. Como consecuencia el diseño se tiene que realizar con factores de seguridad que aumenten en cierta medida la capacidad total requerida del acumulador que supla los requerimientos del movimiento del gas real alojado en las botellas del mismo.

En otro lugar, se observa la presión de precarga, que al igual que en los casos anteriores, no se encuentra en el cumplimiento de la norma API 16D de 2018. Previamente se explicó en la **Sección 3.3.2** las consecuencias de una errónea presurización de precarga en el acumulador. No obstante, se sugiere precargar el dispositivo a un valor mínimo de 1273,6 psi, ya que este valor es la presión de precarga que satisface el Método B de dimensionamiento, al igual que el taladro analizado en la sección inmediatamente anterior. Se recomienda este valor al ser el mínimo entre las presiones de precarga que sugiere la herramienta AC-GLOR, sin desmeritar que la presión óptima utilizar debería ser de 1896 psi.

**3.2.4 Diseño de acumulador para taladro 4 – Petroworks (750 HP).** Como último taladro de análisis, se tiene uno de baja potencia (750 HP) que es usado para operaciones de reacondicionamiento de pozos. Las condiciones en las cuales éste opera se encuentran expresados en las **Tablas 27 y 28**. Al igual que en los otros taladros, los datos de entrada se muestran en la interfaz de la herramienta AC-GLOR, que se presenta a continuación en la **Figura 13**:

**Figura 13.** Interfaz de entrada de datos para el taladro 4.

STACK	RWP (psig)	MOP (psig)	VOL CIERRE (gal)	VOL APERTURA (gal)	RELACIÓN DE CIERRE
ANULAR BOP	5000	1500	4,84	3,41	
RAM CIEGO	5000	600	1,24	1,04	
RAM TUBERIA	5000	750	1,24	1,04	
RAM TUBERIA					
CHOKE Y VALVULA DE MATAR					

PARÁMETROS DEL SISTEMA		CONDICIONES AMBIENTALES	
PRESION DE SISTEMA (psig)	3000	TEMP DE SUPERFICIE EN LA PRECARGA (°F)	70
		RANGO DE TEMP (+/-°F)	50
		MIN TEMP SUPERFICIE (°F)	20
		MAX TEMP SUPERFICIE (°F)	120
		PRESIÓN ATMOSFÉRICA (psia)	14,7

**Fuente:** elaboración propia.

Al igual que en los taladros de análisis que fueron presentados previamente, se realiza una comparación de los resultados del dimensionamiento del acumulador según los datos reales y los parámetros de diseño que son expuestos a través de la herramienta AC-GLOR. Dicha comparación se muestra a continuación en la **Tabla 32**:

**Tabla 32.** Comparación de resultados para el taladro 4.

PARAMETROS DE DISEÑO	TALADRO PETROWORKS 750	AC-GLOR
Capacidad del Acumulador (Gal)	Aprpx. 80	61,4
Numero de botellas	8	7
Densidad de precarga (Lb/ft3)	-	10,2623
Presión de precarga (Psig)	1000	2109

**Fuente:** elaboración propia.

Al mostrar los resultados de la herramienta AC-GLOR, para el taladro Petroworks 750 HP, se observa que se encuentra bajo el requerimiento volumétrico que exige la norma base de este trabajo. El hecho de que esto suceda asegura que el

accionamiento de las cámaras de apertura y cierre se accionan de manera efectiva una vez el acumulador sea operado.

No obstante, la presión de precarga no es la adecuada, puesto a que la necesaria supera a más del doble de la que se encuentra hoy día en operación. Bajo esta premisa, es posible inferir que el accionamiento del acumulador no es del todo correcto. Una presión de precarga menor a la indicada, no permite un almacenamiento adecuado de fluido hidráulico en la condición del MOP, lo que ocasiona que, en una eventualidad de control de pozo, no exista un factor de seguridad óptimo y el acumulador puede llegar a sufrir una descarga indeseada, dejando al dispositivo falta de volumen al momento de accionar las preventoras.

Con base en los parámetros de diseño del acumulador actual, se recomienda precargar el dispositivo con al menos a 1485,1 psi, siendo este el valor de precarga que satisface ambos métodos de diseño (B y C) para una condición de presión limitada. Esta recomendación se realiza teniendo en cuenta que el volumen con el que cuenta el acumulador es el adecuado, por tal motivo, el factor de seguridad de presión limitada debe emplearse y es por eso que el valor de presión de precarga es menor. Técnicamente el equipo debe cargarse a 2109 psi, pero con un valor de 1485,1 psi, hace que la condición operativa sea más segura y efectiva.

## 4. CONCLUSIONES

- ✓ En lo que concierne a la validación de la herramienta AC-GLOR, de manera generalizada, se observó que el error promedio de la reproducción de los trece (13) escenarios operativos fue del 0,37%, es decir, menor al 2% de error; valor que se estipuló como máximo en la metodología para determinar la funcionalidad de la herramienta en cuestión. Por tal motivo, se concluyó que la herramienta es apta para la implementación en taladros reales operativos, ya sean en tierra o costa afuera.
- ✓ Dentro de la validación, se hizo notable el escenario cinco (5), diseño de un acumulador detallado para el *diverter* en un conjunto costa afuera, donde el error del cálculo de número de botellas fue de 6,67% respecto al valor teórico de la norma API 16D. Esto se atribuye a la aproximación de valores que realiza el estándar técnico en sus cálculos. Por lo que se concluye que la herramienta AC-GLOR tiene más exactitud al contemplar los cálculos con su totalidad de decimales, dando más confianza a la exposición de los resultados de los parámetros de diseño del dispositivo.
- ✓ Abordar el problema mediante la elaboración de una herramienta digital (AC-GLOR), elaborada a partir de cálculos estipulados en la norma API 16D de 2018, permite alcanzar el objetivo de obtener parámetros acertados de diseño de acumuladores, obviando la premisa anterior que traía la industria sobre realizar cálculos basados en gases ideales y alejados de la realidad operacional. Esto se evidencia, en la validación de diseños de dispositivos en taladros reales. Allí se observó, que, a nivel general, la presión de precarga tuvo una desviación mínima de 47,26%. Valor bastante alto de diferencia en un parámetro fundamental de diseño para el dispositivo hidráulico.
- ✓ Debido a la naturaleza de los parámetros de diseño de los taladros analizados por la herramienta AC-GLOR, y debido a la gran desviación que existe entre los datos actuales y los requeridos por la norma API 16D de 2018, específicamente en la presión de precarga, se concluyó que por limitaciones técnicas de cada taladro se dificulta precargar el dispositivo al valor requerido por dicha norma, por lo que se recomienda al menos tener una presión de precarga que satisfaga el Método B de cálculo, valor que en promedio es 28,7 % más alto que la presión actual estándar (1000 psi).
- ✓ Mediante la visualización de los resultados del análisis de los taladros en tierra reales, se observó el cumplimiento del 100% de la muestra respecto al requerimiento volumétrico en la capacidad requerida de cada acumulador empleado en la operación. Esto, gracias a la implementación de equipos en algunas ocasiones sobredimensionados por cálculo inadecuado de parámetros de diseño, o por disponibilidad en la logística de la operación. Dado esto, se

concluye, que independientemente a la razón, un sobredimensionamiento del equipo conlleva al cumplimiento de la norma API 16D, pero también se puede incurrir en gastos innecesarios que no tienen fundamento técnico ni operativo.

- ✓ Se concluyó que los taladros en tierra analizados, que cuentan dentro de su conjunto de preventoras con: anulares T90, Rams T82 y Rams tipo U, se encuentran, en promedio, con una desviación mayor al 40% de su diseño de acumulador actual con respecto al establecido por la norma API 16D de 2018 y la herramienta AC-GLOR; con base al parámetro de la presión de precarga que satisface ambos métodos de cálculo (B y C) y no con un valor estándar.

## 5. RECOMENDACIONES

- ✓ Se recomienda elaborar planes de acción para los taladros en tierra de Colombia para que realicen actualización de sus equipos acumuladores, ya que la mayoría de ellos cuentan con una presión de precarga de 1000 psi, y como se observó través de la herramienta AC-GLOR, nunca cumplirán con los estándares técnicos de la norma API.
- ✓ Implementar el complemento de la herramienta NIST en la secuencia lógica de AC-GLOR, con el fin de unificar como un solo conjunto el cálculo de parámetros de diseño de acumuladores, y no depender de datos externos en cuanto al cálculo de propiedades termodinámicas del gas inerte usado en el acumulador a diseñar.
- ✓ Se recomienda profundizar en los cálculos del acumulador para el *diverter* en un conjunto de superficie costa afuera, para así asegurar el correcto dimensionamiento de este tipo de dispositivo, ya que la herramienta AC-GLOR arroja un valor que difiere de forma significativa al estándar del API 16D de 2018.
- ✓ Se recomienda implementar modelos de *Machine Learning* dentro de la herramienta de cálculo, que ayuden a predecir los parámetros de diseño de acumuladores según los patrones de relaciones existentes entre las condiciones operativas y el dimensionamiento del equipo.
- ✓ Se recomienda realizar una transición de los acumuladores empleados en Colombia que aseguren, de manera exacta, el requerimiento volumétrico que tengan los dispositivos dadas las condiciones operativas. Por otro lado, al ser más compleja la ejecución, se recomienda dimensionar los equipos con una presión de precarga mínima que satisfaga el Método B de cálculo (descarga adiabática).

## BIBLIOGRAFIA

AMANI, M., RAJABI, M.M., JUVKAM-WOLD, H.C., SCHUBERT, J.J. *Current Accumulator Design Methods Are Inadequate for Deepwater Drilling*. [En línea]. Disponible en: <https://www.onepetro.org/conference-paper/OTC-17990-MS>

API. *AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE ST 16D Control Systems for Drilling Well Control Equipment and Control Systems for Diverter Equipment*. 2018.

BSEE. *Assessment of BOP Stack sequencing, monitoring and kick detection technology*. [En línea]. 2013. Disponible en: <https://www.bsee.gov/sites/bsee.gov/files/tap-technical-assessment-program//713ac.pdf>

CAMERON. *U Blowout preventers for BOP operations*. [En línea]. 2003. Disponible en: <https://www.slideshare.net/jaoliver/bop-cameron>

CHOONG, K. *Basics of well control*. [En línea]. 2013. Disponible en: <https://www.scribd.com/doc/150835309/Basic-of-Well-Control-ppt>

GOOD, Craig A., MCADAMS, James P. *Mathematical Prediction and Experimental Verification of Deep-Water Accumulator Capacity*. [En línea]. Disponible en: <https://www.onepetro.org/conference-paper/OTC-13234-MS>

HYDRAULICS AND PNEUMATICS. *Accumulators*. [En línea]. 2012. Disponible en: <https://www.hydraulicspneumatics.com/technologies/accumulators/article/21883829/accumulators>

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C. El instituto, 2018 ISBN 9789588585673 153 p.

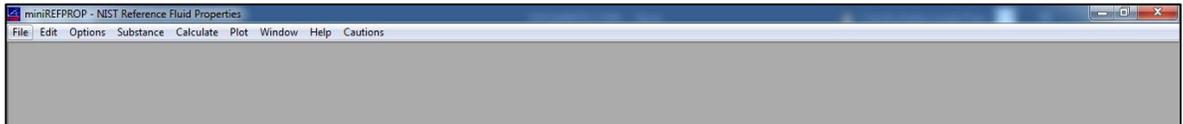
s.a. *ACCUMULATOR (KOOMEY)*. *Oil Well Cementing, Well Control*. [En línea]. 2019. Disponible en: <http://www.drillingformulas.com/accumulator-koomey/>

SATTLER, Jeffrey P. *BOP Subsea Hydraulic Accumulator Energy Availability, How to Ensure You Have What You Need*. [En línea]. Disponible en: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-74469-MS>

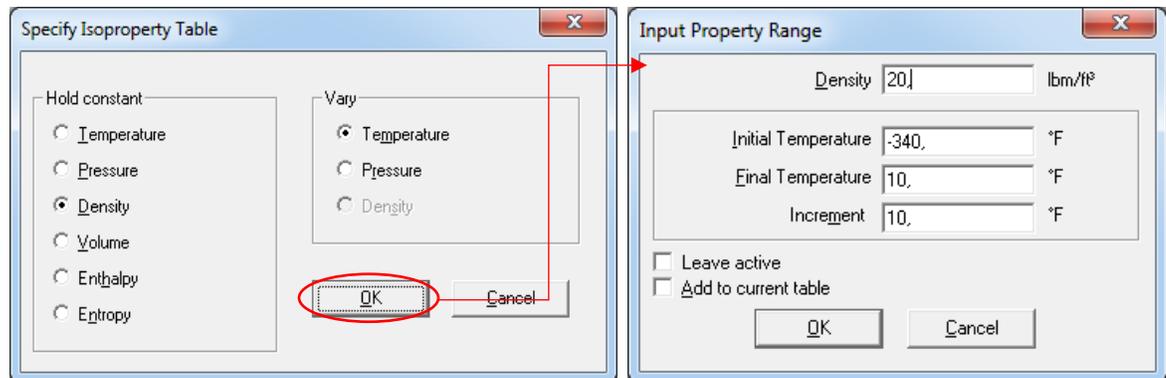
## **ANEXOS**

## ANEXO A. FUNCIONAMIENTO DE LA HERRAMIENTA DIGITAL PROPORCIONADA POR EL NIST.

El Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) proporciona una herramienta que permite encontrar todas las propiedades termodinámicas de un fluido a partir de dos características que definan dicho fluido. A continuación, se muestra la interfaz de la herramienta.



En ella se puede observar las diferentes opciones del programa, pero las opciones necesarias para el desarrollo de la herramienta AC-GLOR se encuentran en el menú de *Calculate*, donde se pueden generar las tablas de las isopropiedades del fluido. Para ello, se deben ingresar los valores de mínimo dos propiedades (una fija y otra variable) que describan el sistema termodinámico, bien sea presión, temperatura, entropía o densidad. A continuación, se presenta un ejemplo del ingreso de densidad y temperatura, manteniendo fija la densidad y variando el valor de la temperatura, como se realiza usualmente.



La herramienta AC-GLOR, al considerar rangos de temperatura, exige que la propiedad variable sea la temperatura, y ésta lo haga en saltos de diez (10) grados Fahrenheit (°F). Una vez realizado este procedimiento, la herramienta del NIST, mostrará tablas de las isopropiedades que determinan el estado termodinámico a diferentes temperaturas y a una presión descrita, que, en el caso de diseño de acumuladores, será la presión de carga, precarga o de mínima operación. Seguido, se muestra un ejemplo de tablas de isopropiedades generadas por la herramienta del NIST, las cuales son indispensables para llevar a cabo de diseño de un acumulador.

1: Nitrogen: p = 3000, psia					
	Temperature (°F)	Pressure (psia)	Density (lbm/ft³)	Enthalpy (Btu/lbm)	Entropy (Btu/lbm-R)
1	0,00000	3000,0	16,724	93,531	1,1782
2	10,000	3000,0	16,257	96,956	1,1856
3	20,000	3000,0	15,818	100,33	1,1927
4	30,000	3000,0	15,406	103,66	1,1996
5	40,000	3000,0	15,018	106,94	1,2062
6	50,000	3000,0	14,652	110,19	1,2126
7	60,000	3000,0	14,306	113,39	1,2189
8	70,000	3000,0	13,978	116,56	1,2249
9	80,000	3000,0	13,668	119,70	1,2308
10	90,000	3000,0	13,373	122,82	1,2365
11	100,00	3000,0	13,092	125,90	1,2420
12	110,00	3000,0	12,825	128,96	1,2475
13	120,00	3000,0	12,570	131,99	1,2527
14	130,00	3000,0	12,327	135,00	1,2579
15	140,00	3000,0	12,094	137,99	1,2629
16	150,00	3000,0	11,871	140,96	1,2678
17	160,00	3000,0	11,658	143,91	1,2726
18	170,00	3000,0	11,453	146,85	1,2773
19	180,00	3000,0	11,256	149,77	1,2819
20	190,00	3000,0	11,066	152,67	1,2864
21	200,00	3000,0	10,884	155,56	1,2908

**ANEXO B.  
DESCRIPCIÓN DE PREVENTORAS UTILIZADAS EN TALADROS DE  
ANÁLISIS.**

Como último resultado del presente trabajo se muestra la verificación del cumplimiento de la norma API 16D de 2018 en cuatro (4) diferentes taladros que operan en Colombia. En dichos escenarios operativos, coincide el uso de tres diferentes tipos de preventoras, las cuales son: BOP anular T-90, BOP *ram* T-82 y *ram* Cameron tipo U.

**BOP anular T-90:** El BOP T-90 es un anular fabricado por la empresa Cameron usado para operaciones de control de pozo. Sus especificaciones técnicas sugieren la implementación en operaciones de perforación y servicio a pozo para taladros en tierra.

La disponibilidad de tamaños que ofrece la empresa esta segmentada en cuatro diámetros específicos, y cada uno maneja una presión de operación distinta. Estos datos son mostrados a continuación en la siguiente tabla:

DIAMETRO (Pulgadas)	PRESION DE OPERACIÓN (Psi)		
	3000	5000	10000
7 1/16			
9			
11			
13 5/8			

De la misma manera a continuación se presentan dos tablas que provee el fabricante para determinar las dimensiones físicas del equipo y los volúmenes operativos tanto de cierre como de apertura. Es preciso recordar, que para el uso de las tablas es necesario conocer el diámetro que se va a manejar y la presión de trabajo de la operación. Con los datos nombrados, en las tablas que se presentan a continuación se muestran los datos operativos necesarios para el dimensionamiento del acumulador.

DIMENSIONES Y PESO				
DIAMETRO (Pulgadas)	PRESION DE TRABAJO (Psi)	ALTURA GENERAL (Pulgadas)	ANCHO DEL CUERPO GENERAL (Pulgadas)	PESO (Lbm)
7 1/16	3000	29,99	29	3,208
	5000	31,09	29	3,347
	10000	42,45	43	10,64
9	3000	32,71	35,5	4,947
11	3000	33,44	39,87	6,049
	5000	41,95	44,75	9,8
13 5/8	3000	44,52	50	13,14
	5000	45,52	50	13,572

CAPACIDADES DE LAS BOP				
DIAMETRO (Pulgadas)	PRESION DE TRABAJO (Psi)	MOP (PSI)	VOLUMEN DE APERTURA (Gal)	VOLUMEN DE CIERRE (Gal)
7 1/16	3000	1500	3,41	4,84
	5000	1500	3,41	4,84
	10000	1500	11,44	14,01
9	3000	1500	5,38	7,7
11	3000	1500	7,08	11,44
	5000	1500	14,92	19,06
13 5/8	3000	1500	18,54	25,09
	5000	1500	18,54	25,09

**BOP Ram T-82:** El BOP T-82 es un Ram ciego que también es fabricado por la empresa *Cameron*. Son barreras secundarias que permiten sellar el pozo cuando no hay tubería en él. El catálogo de estas BOP muestra una diversidad de tamaños mayor. Igual que con los anulares, a continuación, se muestra una tabla en donde se presentan los diámetros de operación y las presiones de trabajo que maneja cada uno:

DIAMETRO (Pulgadas)	PRESION DE OPERACIÓN (Psi)
7 1/16	3000
7 1/16	5000
11	3000
11	5000
13 5/8	3000
13 5/8	5000

En las especificaciones técnicas de las preventoras T-82 se encuentra descrito la configuración de las mismas. Dicho esquema puede ser simple o doble. Es decir, que existe un solo Ram ciego, o en un mismo conjunto se encuentran dos preventores de estas características.

A continuación, se presentan las tablas de dimensionamiento de las preventoras. El manejo de los esquemas es similar al del anular, es decir, se necesitan los datos de diámetro y presión de operación:

DIMENSIONES							
TAMAÑO	CONFIG.	7 1/16 X 3K	7 1/16 X 5K	11 X 3K	11 X 5K	13 5/8 X 3K	13 5/8 X 5K
ALTURA GENERAL	Sencillo	15	15	14,63	19,5	20,5	20,75
BRIDA X BRIDA	Doble	26,75	26,75	28,63	33	36	36
ALTURA GENERAL	Sencillo	21,82	21,82	22,86	28,87	28,77	29,21
BRIDA X FLANCHE	Doble	33,45	33,45	36,65	42,37	44,27	44,71
LONGITUD GENERAL		58,3	58,3	72,62	82,19	92,69	92,69
ANCHO GENERAL		22,05	22,05	26,76	30,03	33,22	33,22
APERTURA A TRAVES DE BOP		7,06	7,06	11	11	13,63	13,63
PRESION DE TRABAJO (Psi)		3000	5000	3000	5000	3000	5000

CAPACIDADES DE LAS BOP							
TAMAÑO	7 1/16 X 3K	7 1/16 X 5K	11 X 3K	11 X 5K	13 5/8 X 3K	13 5/8 X 5K	
MOP (Psi) -Abrir y cerrar	1500	1500	1500	1500	1500	1500	
RELACION DE CIERRE	4,46	4,46	4,46	5,59	5,59	5,59	
VOLUMEN DE APERTURA	1,04	1,04	1,44	2,81	3,05	3,05	
VOLUMEN DE CIERRE (Gal)	1,24	1,24	1,73	3,19	3,46	3,46	