

OPTIMIZACIÓN DE LA ECD EN LA PERFORACIÓN DE POZOS CON PRESIÓN CONTROLADA (MPD): MODELOS, VARIABLES, Y FACTORES QUE INFLUYEN EN SU CÁLCULO

Breit, Andrés, Andrés.Breit@La.Weatherford.com (Autor)

Garmendia, Andrés, Andres.Garmendia@La.Weatherford.com (Autor)

Rampellotto, Robertino, Robertino.Rampellotto@La.Weatherford.com (Autor)

Ruiz, Ismael, Ismael.Ruiz@La.Weatherford.com (Autor)

Weatherford International de Argentina

Abraham, Mario Gabriel, Mario.G.Abraham@YPF.com (Co-Autor)

YPF S.A.

Sinopsis

El presente trabajo tiene por objetivo focalizar y evaluar la influencia de las variables que afectan a los cálculos de la densidad equivalente de circulación (ECD); tales como, los errores instrumentales para la determinación de la reología y densidad del lodo de perforación, eficiencia de trabajo de la bombas de lodo, parámetros de perforación (rpm, ROP, concentración de cutting, etc.), configuraciones y accesorios del Drill String, la precisión de los sensores de presión anular en superficie, entre otros factores. Todos estos parámetros afectan en mayor o menor medida a los cálculos de pérdidas de cargas por fricción en el espacio anular, por ende, a la ECD.

Por otro lado, el trabajo tiene como fin optimizar el cálculo de la ECD en la perforación de pozos con presión controlada (MPD), comparando la influencia de todos los factores anteriormente mencionados para un pozo horizontal de alcance extendido; teniendo en cuenta los resultados hidráulicos obtenidos con los distintos modelos reológicos.

Introducción

La aplicación de la técnica Perforación con Presión Controlada (MPD) ha demostrado a través de los distintos tipos de pozos, la importancia de los cálculos hidráulicos y como afectan estos al momento de estimar la Densidad Equivalente de Circulación (ECD), a partir de las variables que no son tenidas en cuenta, tales como eficiencia de trabajo de las bombas de lodo (eff), tasa de penetración (ROP), velocidad de rotación (rpm), la exactitud de los sensores de presión anular en superficie, y el diámetro promedio del pozo, entre otros.

La aplicación de esta tecnología y a través de distintos software nos permite llevar un control continuo y minucioso de la densidad equivalente de circulación a lo largo de la perforación para cualquier tipo de pozo, ya sea; vertical, dirigido, horizontal de corto, intermedio y/o larga extensión.

En función a la complejidad y a la gran importancia que tienen los cálculos hidráulicos para estimar la densidad equivalente de circulación, teniendo en cuenta las variables antes mencionadas, se analizará cómo influyen estos al comportamiento de la ECD para un pozo horizontal en particular (pozo Cfp - 1) de alcance extendido, según la clasificación utilizada para dichos pozos.

El objetivo de este artículo es analizar cómo influyen ciertos factores que usualmente no son tenidos en cuenta al momento de calcular la Densidad Equivalente de Circulación en la perforación de pozos horizontales con presión controlada, especialmente en los cuales la etapa de aislación se perfora de 6,125 pulgadas (155.6 mm), donde el espacio anular se ve considerablemente reducido respecto de las etapas anteriores. Para ello se realizaron diversas simulaciones con distintos software analizando los siguientes puntos:

- Excentricidad del pozo y velocidad de rotación de la sarta de perforación.
- Densidad del cutting.
- Carga anular (concentración de cutting en el espacio anular).
- Lectura del viscosímetro de Fann.

- Modelo reológico seleccionado.
- Lectura de la balanza de lodo.
- Efecto de los Tool Joint (TJ).
- Exactitud del sensor de presión anular (WHP).
- Diámetro promedio del pozo.
- Eficiencia volumétrica de las bombas.

Perforación con presión controlada (MPD)

Conforme a la definición de la IADC, la Perforación con presión controlada es “un proceso de perforación adaptativo utilizado para controlar con precisión el perfil de presión anular a lo largo del pozo. Los objetivos son determinar los límites reales de presión en fondo de pozo y manejar el perfil de presión hidráulica anular, en consecuencia”. La técnica MPD busca evitar que se presente continuo influjo de fluidos de formación a superficie. Todo influjo imprevisto que se presente durante la operación será contenido con seguridad usando un proceso apropiado. Se define la presión de fondo en condición de circulación (BHCP) como:

$$\text{BHCP} = \text{Presión hidrostática} + \text{Pérdidas por fricción en el espacio anular} + \text{Contrapresión} \quad (1)$$

Densidad Equivalente de Circulación:

Conforme a la definición de la IADC, la densidad equivalente de circulación es la suma del valor de densidad en uso y las pérdidas de presión por fricción en el espacio anular convertidas a valores de densidad. Para el caso de la perforación con la técnica MPD, la fórmula es la siguiente:

$$\text{ECD} \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right] = \text{densidad del lodo} \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right] + \frac{0.000102 \times \text{Pérdidas por fricción anular [Pa]}}{\text{profundidad vertical verdadera (TVD)[m]}} + \frac{\text{Presión anular [Pa]}}{9804 \times \text{TVD [Pa]}} \quad (2)$$

Desarrollo del trabajo: Pozo CfP - 01

Clasificación de pozos de alcance extendido:

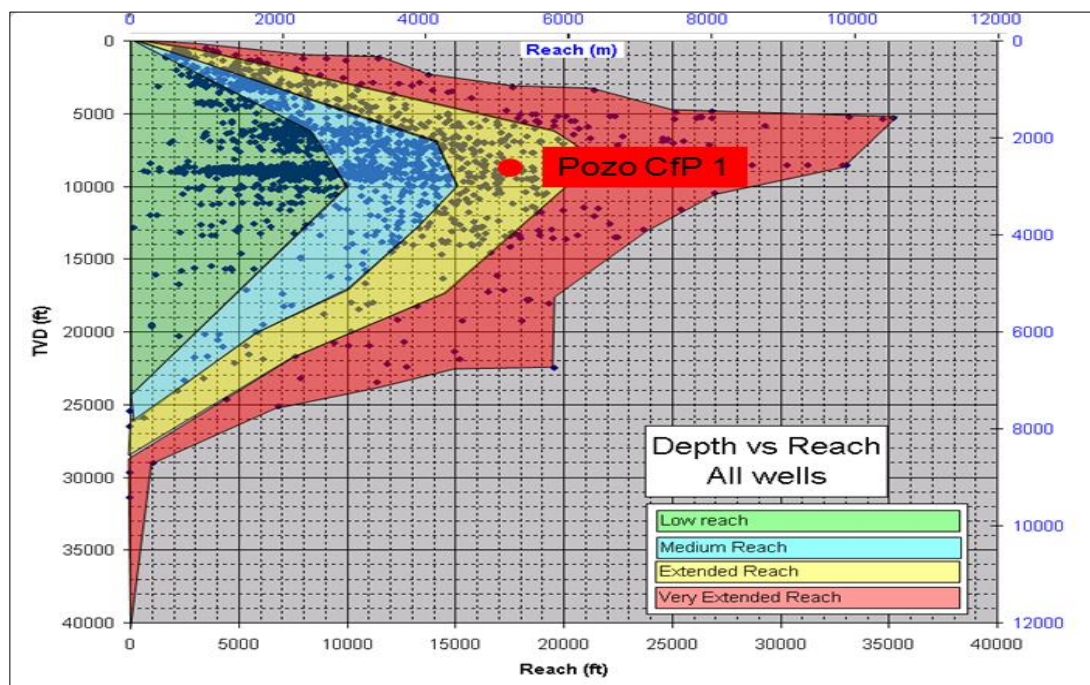


Figura 1: Clasificación de pozos de alcance extendido.

Datos del pozo CfP – 1

- Trayectoria Direccional

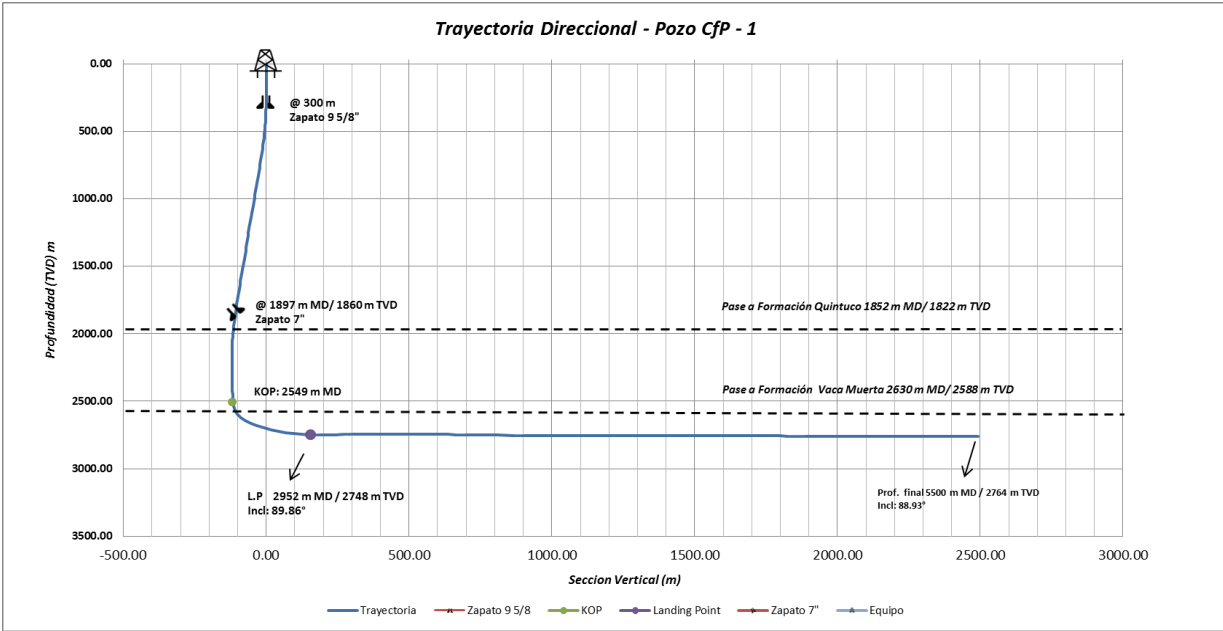


Figura 2: Plot final del pozo

- Arreglo de Fondo (BHA)

Descripción	Longitud [m]	Diámetro externo		Diámetro interno	
		[in]	[mm]	[in]	[mm]
Drill Pipe (DP)		4	101.6	3.34	84.8
Heavy Weight (HW)	27.81	3.713	94.3	2.563	65.1
Reducción	0.88	4.74	120.4	2.125	54.0
Prensa	0.59	4.75	120.7	2	50.8
Válvula Flotadora	0.6	4.625	117.5	2	50.8
Prensa	0.7	4.625	117.5	2	50.8
Válvula Flotadora	0.58	4.625	117.5	2	50.8
Reducción	0.92	4.625	117.5	2.5	63.5
Elemento Direccional	9.19	4.75	120.7	2.25	57.2
Estabilizador	1.75	4.75	120.7	2.25	57.2
Reducción	0.89	4.75	120.7	2.5	63.5
Elemento Direccional	9.17	4.75	120.7	2.25	57.2
Drill collar (DC)	2.19	4.75	120.7	2.375	60.3
Reducción	0.96	4.781	121.4	2.5	63.5
Reducción	0.4	4.75	120.7	3	76.2
Estabilizador	4.1	4.98	126.5	3.64	92.5
Trépano	0.25	6.125	155.6	3.25	82.6

Tabla 1a: BHA final

- Propiedades del lodo

Datos del lodo (base aceite)	
Propiedad	Valor
Densidad [kg/m ³]	1700
Viscosidad Plástica (PV) [cP]	31
Punto Cedente (YP) [lb/100 ft ²]	6 (2.873 Pa)
L 600	68
L 300	37
L 200	30
L 100	16
L 6	5
L 3	4

Tabla 1b: Propiedades del lodo

Simulaciones y situaciones a analizar.

Caso #1: Comportamiento de la ECD en función de la excentricidad del pozo y las rpm

Para los pozos de alcance extendido la velocidad rotacional y la excentricidad de la sarta de perforación influyen de manera directa al cálculo final de la ECD.

El término excentricidad se utiliza para describir cuán descentrada se encuentra el Drill String dentro del casing o dentro del pozo abierto, la misma se expresa en porcentaje, varía en función de la geometría del pozo y de la configuración de la Drill String, considerando como excentricidad máxima (100%, $e = 1$), cuando el Drill String está totalmente apoyado contra las paredes del pozo. El caso opuesto, la excentricidad es cero (0%, $e = 0$ o concéntrico) cuando la sarta de perforación está perfectamente centrada al diámetro del pozo y/o casing.

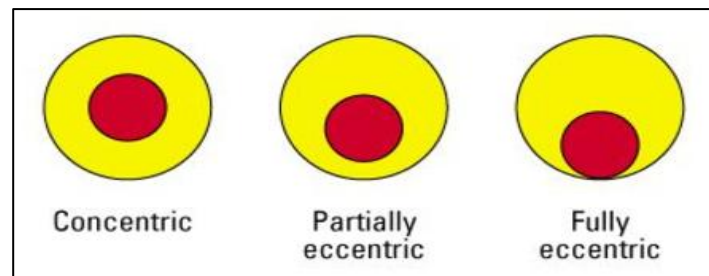


Figura 3: excentricidad de la herramienta en el pozo.

La velocidad de rotación de la sarta de perforación puede ajustarse para optimizar la ECD y la limpieza del espacio anular para cualquier tipo de pozo.

Se ha demostrado que el incremento de la velocidad de rotación refleja un aumento sobre los valores de la ECD, este aumento puede variar en función a la excentricidad, la geometría del pozo y la configuración del Drill String, ya que, por ejemplo, para un pozo horizontal con una excentricidad del 100%, las velocidades máximas de lodo de perforación (son las que están impactando fuertemente en la ECD) se encuentran en la parte superior del pozo. Al rotar la herramienta se produce el acoplamiento viscoso del lodo que está casi estacionario provocando que el fluido gire en espiral alrededor del Drill String recorriendo desde un 25% hasta un 50% de la longitud del pozo, esto provoca el aumento la ECD y la limpieza del pozo. En pozos de diámetros pequeños las ECD son más afectadas por las rpm.

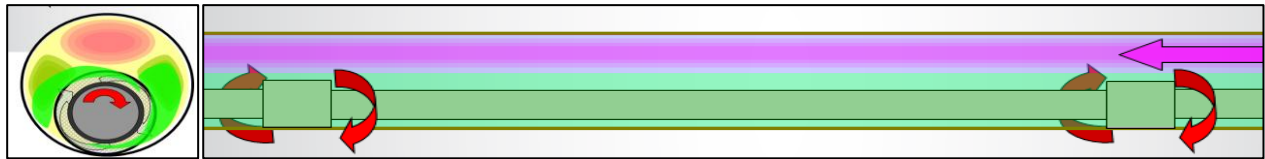


Figura 4: Efecto de las rpm en pozos de gran diámetro (ej: 12 1/4" (311.2 mm)).

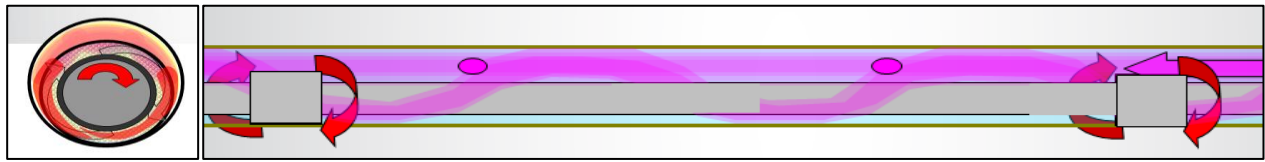


Figura 5: Efecto de las rpm en de pequeño diámetro (ej: 8 1/2" y 6 1/8" (215.9 y 155.6 mm)).

Es importante determinar la variación de la ECD y cómo influye durante la operación de perforación de un pozo horizontal. Para ellos se realizaron las siguientes simulaciones en función a las situaciones a analizar.

- Situación #1: Comportamiento de la ECD en función a la excentricidad.

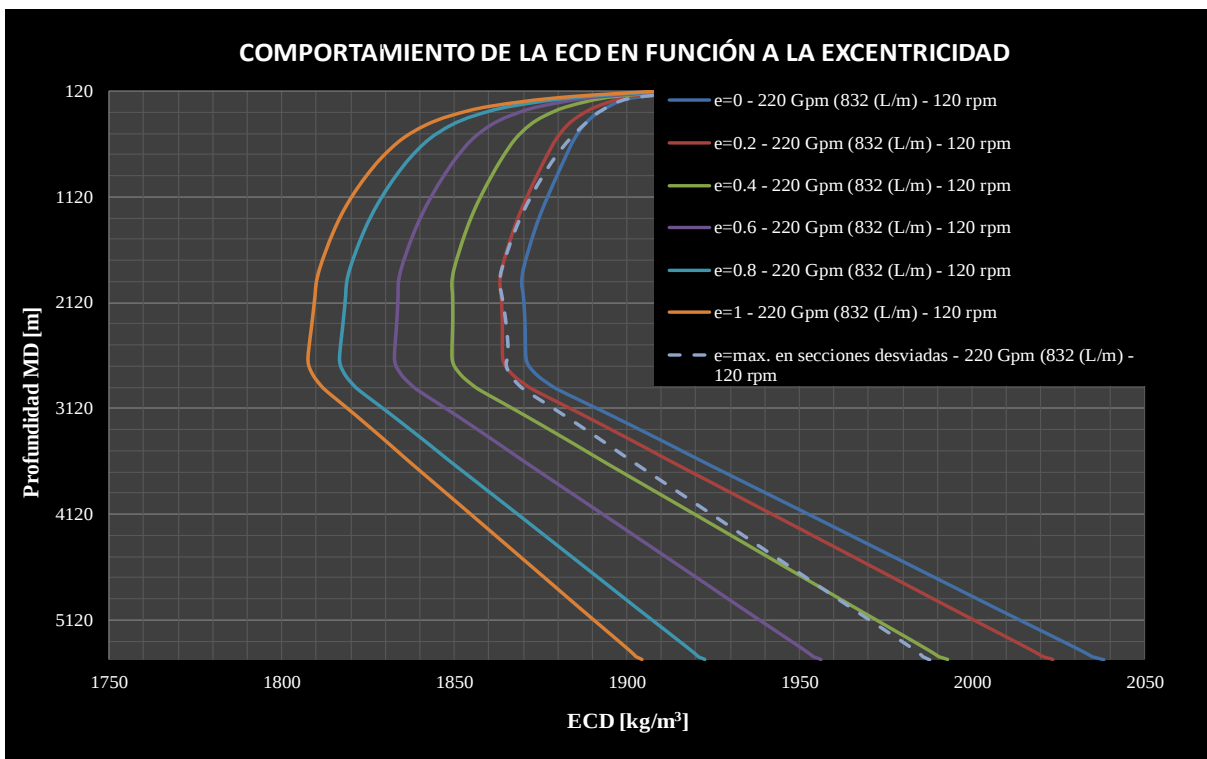


Gráfico 1: Comparación del perfil de ECD a distintos porcentajes de excentricidad.

Excentricidad [%]	ECD [kg/m ³]	Diferencia de ECD cada 20% de exc. [kg/m ³]	Porcentaje de ECD cada 20% de exc. [%]
0	2039	0	0.00
20	2024	-15	-0.71
40	1994	-31	-1.51
60	1957	-37	-1.85
80	1923	-34	-1.73
100	1905	-18	-0.91
Máxima en secciones desviadas	1982	n/a	n/a

Tabla 2: Valores de ECD para diferentes excentricidades (Densidad 1700 kg/m³, WHP 0 Pa, caudal 220 Gpm (833 L/m), 120 rpm).

La tabla 2 muestra el comportamiento de la ECD en función de la excentricidad a lo largo del pozo. Para ello se realizaron simulaciones variando el porcentaje de excentricidad de 0 a 100% ($e = 0$ a $e = 1$) y considerando excentricidad máxima en las secciones desviadas ($e = \text{máx. en secciones desviadas}$), con un caudal de 220 Gpm (833 L/m) y 120 rpm. A partir de las curvas se puede concluir que, a medida que aumenta el porcentaje de excentricidad se observa una disminución de la ECD, esto se debe a que, para una excentricidad en aumento desde $e = 0$ hasta $e = 1$ el perfil de flujo en el espacio anular pierde distribución uniforme alrededor del Drill String afectando de esta manera perfil de velocidad del líquido y consecuentemente a los valores ECD.

Para el caso de excentricidad máxima en las secciones desviadas (opción del software) la simulación muestra que el perfil de la ECD se encuentra entre las curvas para excentricidades desde 0% a 43%.

- Situación #2. Comportamiento de la ECD en función de las rpm y a la excentricidad en el fondo del pozo (TD).

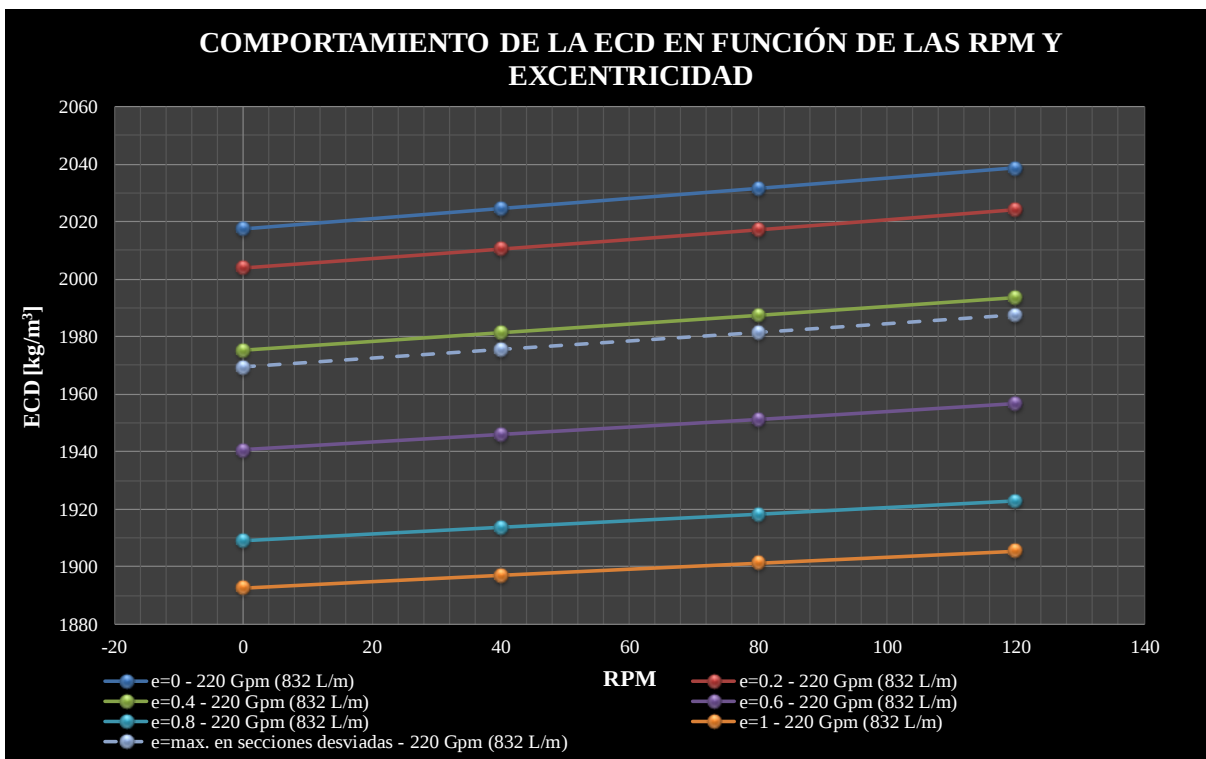


Gráfico 2: Comparación de la ECD en función de las rpm con distintos porcentajes de excentricidad.

Excentricidad [%]	ECD [kg/m ³]				Diferencia de ECD cada 40 rpm [kg/m ³]	Porcentaje de ECD cada 40% de rpm [%]
	0 rpm	40 rpm	80 rpm	120 rpm		
0	2018	2025	2032	2039	7	0.35
20	2004	2010	2017	2024	7	0.33
40	1975	1981	1987	1994	6	0.31
60	1941	1946	1951	1957	5	0.27
80	1909	1914	1918	1923	5	0.24
100	1893	1897	1901	1905	4	0.24
Máxima en secciones desviadas	1963	1970	1976	1982	n/a	n/a

Tabla 3: Valores de ECD para una combinación de excentricidad y rpm (Densidad 1700 kg/m³, WHP 0 Pa, caudal 220 Gpm (833 L/m), 120 rpm)

La tabla 3 muestra el comportamiento de la ECD a profundidad final en función a la velocidad de rotación con distintos porcentajes de excentricidad. A partir de los resultados se puede concluir que la velocidad de rotación tiene una mínima influencia sobre el valor final de la ECD. Esto implica que, a medida que aumenta la rpm se observa un incremento de la ECD en el orden de 7 kg/m³ por cada 40 rpm y consecuentemente a medida que aumenta el porcentaje de excentricidad el incremento ECD en función a las rpm aumenta en menor proporción, llegando hasta 4.27 kg/m³ cada 40 rpm para una e = 1.

Analizando el comportamiento del ECD en función a la velocidad de rotación y a la excentricidad de manera simultánea se puede concluir que a medida que aumenta la velocidad de rotación se observa un incremento en la ECD, la cual disminuye a medida que aumenta la excentricidad.

- Situación #3: Comportamiento de la ECD en función al caudal con e = 0 y e = máx. en sección con desviación.

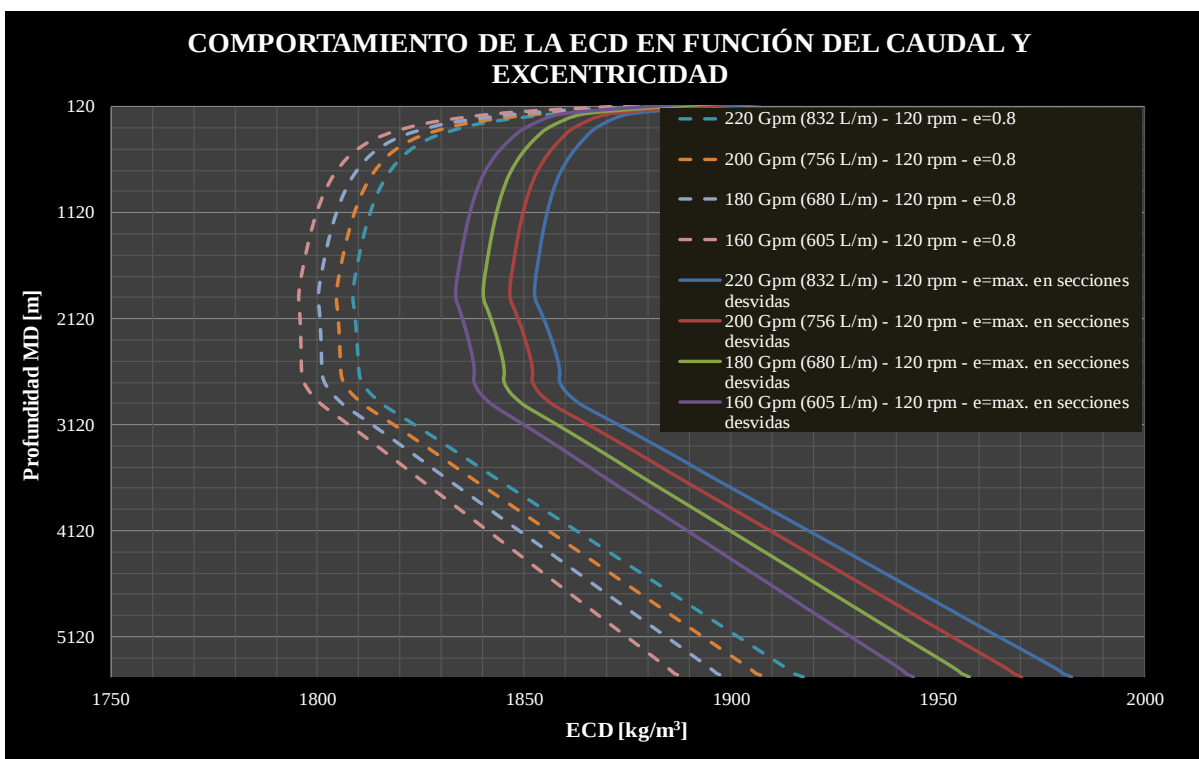


Gráfico 3: Comparación de la ECD en función del caudal.

Caudal		Excentricidad	ECD
[Gpm]	[L/m]		
220	1053	80	1917
200	957	80	1908
180	861	80	1898
160	766	80	1888
220	1053	máxima	1982
200	957	máxima	1970
180	861	máxima	1958
160	766	máxima	1944

Tabla 4: Valores de ECD para diferentes caudales de trabajo.

De la tabla 4 puede apreciarse el comportamiento de la ECD en función a distintos caudales de trabajo considerando una $e = 0.8$ y máxima excentricidad en las secciones desviadas. Los resultados muestran una disminución de la ECD a medida que se disminuye el caudal de trabajo debido a la disminución de las pérdidas de presión por fricción en el espacio anular. Comparando los resultados a partir de las excentricidades planteadas, que para una $e = 0.8$ los valores de ECD son menores que para los $e = \text{máx.}$ en secciones desviadas debido a la variación del perfil de velocidad en el espacio anular.

Se ha demostrado que la rotación no es un factor que influye en gran medida en cuanto a la variación de la ECD para las velocidades de rotación de trabajo, este factor puede tener relevancia cuando se utilizan altas rotaciones (alrededor de 600 rpm). Con respecto al porcentaje de excentricidad se ha demostrado que es un factor importante en cuanto al resultado final de la ECD. Los factores analizados para este caso deben ser considerados al momento de realizar cálculos hidráulicos durante la operación de perforación con la técnica MPD, ya que el perfil de presión de fondo debe ajustarse al perfil de presión poral y/o admisión, dados por la ventana operativa.

Caso #2: Comportamiento de ECD en función de la densidad del cutting

Densidad del cutting [kg/m ³]	ECD [kg/m ³]
2050	1847
2300	1852
2600	1855
3000	1860

Tabla 5: Valores de ECD para diferentes densidades de cutting (100 Gpm (378 L/m), 15 m/h, 100 rpm).

Densidad del cutting [kg/m ³]	ECD [kg/m ³]
2050	1913
2300	1914
2600	1916
3000	1919

Tabla 6: Valores de ECD para diferentes densidades de cutting (220 Gpm (833 L/m), 15 m/h, 100 rpm).

Densidad del cutting [kg/m ³]	ECD [kg/m ³]
2050	1880
2300	1876
2600	1889
3000	1907

Tabla 7: Valores de ECD para diferentes densidades de cutting (100 Gpm (378 L/m), 50 m/h, 100 rpm).

Densidad del cutting [kg/m ³]	ECD [kg/m ³]
2050	1922
2300	1925
2600	1930
3000	1938

Tabla 8: Valores de ECD para diferentes densidades de cutting (220 Gpm (833 L/m), 50 m/h, 100 rpm).

Para el presente caso, se ha establecido un rango de densidad de cutting desde 2050 kg/m³ hasta 3000 kg/m³. Valores que exceden el valor promedio establecido en 2400 kg/m³.

Se ha considerado un caso de ROP de 15 m/h y uno de 50 m/h, combinado con un caudal del 100 Gpm (378 L/m) y 220 Gpm (833 L/m), con el fin de aumentar la cantidad de cutting presente en el espacio anular y que la diferencia en la densidad de este con respecto a la del lodo tenga más peso. Los resultados indican que a mayor densidad del cutting, mayor ECD, para todos los casos, y esto es debido al efecto de adición en la densidad global del fluido en el espacio anular que afecta la presión hidrostática. También se observa que a mayor ROP mayor ECD, caso que se discutirá en detalle a continuación. Por último, se observa mayor ECD a mayor caudal, aunque en este caso el efecto predominante se debe al aumento en las pérdidas por fricción dado que incrementa la velocidad anular. En el siguiente caso se toma en cuenta el porcentaje de cutting en el espacio anular para estimar su influencia en la ECD.

Caso #3: Comportamiento de ECD en función de la carga anular

%cutting (ROP asociado)	ECD [kg/m ³]
1 (7)	1845
2 (14)	1846
3 (22)	1855
4 (29)	1859
5 (36)	1863

Tabla 9: Valores de ECD para diferentes porcentajes de cutting presente (100 Gpm (378 L/m), 100 rpm).

%cutting (ROP asociado)	ECD [kg/m³]
1 (7)	1915
2 (14)	1919
3 (22)	1921
4 (29)	1927
5 (36)	1931

Tabla 10: Valores de ECD para diferentes porcentajes de cutting presente (220 Gpm (833 L/m), 100 rpm).

Se ha considerado un porcentaje de cutting en el espacio anular de entre 1 y 5 %, esta consideración tiene en cuenta un bajo porcentaje de cutting (1%), asociado a una ROP de 7 m/h. Si bien en muchos casos la ROP puede ser menor que este valor, se comprobó numéricamente que un valor de porcentaje de cutting menor al 1% no tiene influencia significativa en los cálculos de hidráulica del espacio anular. En contrapartida, un valor del 5% (ROP asociado de 36 m/h) ha sido considerado como el máximo dado que es el límite superior en cuando a recomendaciones de carga de cutting en el espacio anular, más allá de que en la práctica este valor pueda superarse. Los valores de caudal de lodo considerados fueron de 100 (378 L/m) y 220 (833 L/m) Gpm respectivamente. De las tablas anteriores puede estimarse que los valores de ECD pueden variar hasta un 0.98%. Siendo los casos más distantes los de 1 a 5 % de cutting para un caudal de 100 Gpm (378 L/m). Una vez más la influencia de un bajo caudal incrementa el peso de la variable considerada.

Caso #4: Comportamiento de ECD en función de la lectura del viscosímetro de Fann

PV [cP]	ECD [kg/m³]
29	1843
30	1844
31	1845
32	1846
33	1847

Tabla 11: Valores de ECD para diferentes PV (100 Gpm (378 L/m), 100 rpm).

YP		ECD [kg/m³]
[lb/100 ft²]	[Pa]	
4	1.915	1827
5	2.394	1836
6	2.873	1845
7	3.352	1854
8	3.830	1862

Tabla 12: Valores de ECD para diferentes YP (100 Gpm (378 L/m), 100 rpm).

PV [cP]	ECD [kg/m ³]
29	1913
30	1916
31	1919
32	1922
33	1924

Tabla 13: Valores de ECD para diferentes PV
(220 Gpm (833 L/m), 100 rpm).

YP		ECD [kg/m ³]
[lb/100 ft ²]	[Pa]	
4	1.915	1899
5	2.394	1909
6	2.873	1919
7	3.352	1928
8	3.830	1937

Tabla 14: Valores de ECD para diferentes YP
(220 Gpm (833 L/m), 100 rpm).

En el presente caso se ha intentado describir la influencia en las lecturas del viscosímetro de Fann, en el cálculo de ECD. Su influencia está directamente relacionada con la viscosidad del lodo y la fricción anular que este generaría, y su correspondiente aporte a la ECD.

El error causado por la descalibración del viscosímetro, como así también el error en la lectura, puede ser tan pequeño que resulte insignificante, o tan grande que resulte predominante. En un intento por cuantificar este valor se ha optado por establecer un valor general de PV y YP y desviarlos dos puntos por encima y dos puntos por debajo. Luego se ha realizado el correspondiente análisis de sensibilidad. Los resultados indican que el error para un rango tan estrecho es prácticamente lineal, teniendo más influencia en el YP que en la PV, y esto es debido a que un punto de variación representa un porcentaje de variación más grande cuanto mayor es el valor numérico de la variable estudiada. Nuevamente se repite el caso de que a mayor caudal mayor influencia. Eso último se debe únicamente a que el aumento de caudal incrementa la fricción anular y el error en la viscosidad del lodo se propaga más rápidamente.

Caso #5: Comportamiento de ECD en función del modelo reológico seleccionado

Luego de estudiar los errores causados en la estimación de la viscosidad, consideraremos los diferentes modelos reológicos con los que se ajusta una curva suave y continua para finalmente calcular la fricción en el espacio anular, a partir de los valores anteriormente estudiados.

En esta sección el error que pueda generarse estaría relacionado al ajuste de una curva que intente no solo suavizar las variaciones entre las lecturas conociendo ya la tendencia reológica del fluido, sino que también estimar valores intermedios a los leídos en el viscosímetro de Fann.

Es bien conocido que los lodos de perforación poseen un comportamiento reológico del tipo pseudoplástico, esto quiere decir que una viscosidad relativamente baja será apreciada a velocidades de corte altas y una viscosidad relativamente alta a velocidades de corte bajas.

Los modelos para ajuste de una curva de esfuerzo de corte versus velocidad de corte fueron los utilizados comúnmente en la industria del petróleo, y se presentan a continuación junto a una breve descripción:

- **Plástico de Bingham:** Es el modelo más sencillo matemáticamente, dado que consta de una línea recta que en principio se ajusta con dos valores de reología (típicamente lecturas de 600 y 300 rpm), aunque podría ajustarse la línea con más valores obtenidos de las lecturas. Como se mencionó, este modelo es lineal y posee una ordenada al origen, que es aproximadamente el valor real del punto cedente.
- **Herschel-Bulkley o ley de la potencia modificada:** Este modelo requiere de al menos tres valores para su ajuste dado que entrega por resultado una curva. Describe mejor la realidad ya que acompaña a la idea de que la viscosidad disminuye proporcionalmente con el aumento en la tasa de corte. En este caso el punto de fluencia es considerado como la lectura de 3 rpm.
- **Robertson-Stiff:** Es una combinación entre el modelo de plástico de Bingham y la ley de la potencia. Es muy usado en fluidos de cementación aunque también posee un buen ajuste para lodos de perforación.

Se ha considerado como valor referencial al resultado obtenido a partir del modelo de Herschel-Bulkley, y se han corrido simulaciones con los otros modelos buscando una estimación del error porcentual relativo a esta referencia.

Para el caso del modelo de plástico de Bingham se han realizado dos estudios, uno correspondiente al ajuste con todos los valores de reología disponibles, y otro utilizando solo los valores de lectura de 600 y 300 rpm.

En todos los casos el error fue por defecto en el cálculo de la ECD, siendo el que mayor error arroja el modelo de plástico de Bingham, y esto se debe principalmente a la no linealidad del modelo.

A diferencia de los resultados previos, el efecto de aumentar el caudal del lodo ha resultado en una baja en el error estimado de ECD en comparación con el modelo de Herschel-Bulkley, viéndose más afectado el caso de 100 Gpm (378 L/m) en comparación con el de 220 Gpm (833 L/m). En este caso dicha diferencia es debido a que el caudal tiene predominancia numérica en la ecuación de pérdida de carga por fricción anular, y esto es esperable dado que la dependencia de la fricción con el caudal es superlineal o cuadrática, en contraste con el coeficiente de fricción que es supralineal o lineal.

Modelo	ECD [kg/m ³]
Herschel-Bulkley	1845
Plástico de Bingham	1807
Plástico de Bingham (600 y 300)	1810
Robertson-Stiff	1821

Tabla 15: Valores de ECD para diferentes modelos reológicos (100 Gpm (378 L/m), 15 m/h, 100 rpm).

Modelo	ECD [kg/m ³]
Herschel-Bulkley	1884
Plástico de Bingham	1845
Plástico de Bingham (600 y 300)	1850
Robertson-Stiff	1865

Tabla 16: Valores de ECD para diferentes modelos reológicos (220 Gpm (833 L/m), 15 m/h, 100 rpm).

Caso #6: Comportamiento de ECD en función de la lectura de la densidad en la balanza

Análogamente al caso #4, la descalibración de la balanza y el error humano en la lectura pueden ser muy variables. Considerando el lodo tipo de 1700 kg/m^3 , se han asumido variaciones de hasta 20 kg/m^3 por exceso y defecto, ya que la escala mínima en la balanza de campo es en general 10 kg/m^3 .

La variación en el resultado de la ECD es prácticamente el mismo que la variación de densidad de lodo en cuestión. Esto se debe a que la densidad influye directa y casi exclusivamente en la ECD dado que la presión anular no es función de esta misma, y en las pérdidas por fricción predomina el valor del caudal de lodo y reología, teniendo un peso prácticamente insignificante las variaciones en la densidad del lodo consideradas para el cálculo.

Densidad del lodo [kg/m ³]	ECD [kg/m ³]
1680	1826
1690	1835
1700	1845
1710	1855
1720	1865

Tabla 17: Valores de ECD para diferentes densidades del lodo (100 Gpm (378 L/m), 15 m/h, 100 rpm).

Densidad del lodo [kg/m ³]	ECD [kg/m ³]
1680	1864
1690	1874
1700	1883
1710	1894
1720	1903

Tabla 18: Valores de ECD para diferentes densidades del lodo (220 Gpm (833 L/m), 15 m/h, 100 rpm).

Caso #7: Efecto de las Tool Joint sobre el valor final del ECD

En este caso se estudiará la variación de la ECD al tener en cuenta o no las Tool Joint del Drill String en el pozo mencionado. En repetidas ocasiones se observa que en las simulaciones de hidráulicas de pozo, los TJ no son tenidos en cuenta, o bien, no se ingresa en forma adecuada sus dimensiones. El presente análisis se desarrolla sobre el pozo extendido, que emplea la siguiente Drill Pipe (valores nominales):

- Diámetro externo: 4" (101.6 mm); grado: S-135; peso: 20.8 kg/m; diámetro interno: 3.34" (84.8 mm); largo: 9.75 m.
- Tool Joint: Diámetro externo: 4.875" (123.8 mm); diámetro interno: 2.688" (68.3 mm).
- Pin: Largo: 0.3 m; Box: largo: 0.38 m.

Teniendo en cuenta el BHA que se utiliza en el presente pozo de ejemplo, se emplean 4939 metros de Drill Pipe de acuerdo a las características de los TJ, esa cantidad de sondeo presenta 344.2 metros de TJ, que representa el 6.97% del total de la longitud total del sondeo. Como se puede apreciar, esta longitud es de gran dimensión, por eso la importancia de tenerlos en cuenta.

Considerando el diámetro del pozo igual a 6.125” (155.6 mm) (este diámetro se debe ajustar de acuerdo al calíper del pozo, cuestión que se analizará más adelante), y que el diámetro interno del casing de la etapa intermedia es de 6.276” (159.4 mm), se presentan los siguientes espacios anulares con y sin TJ:

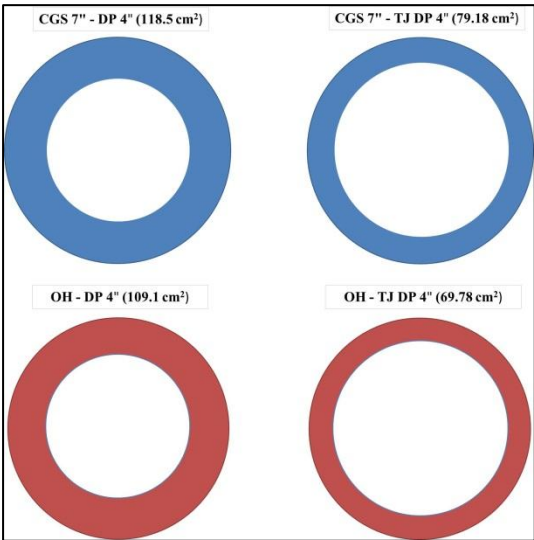


Figura 6: Reducción del área de flujo anular

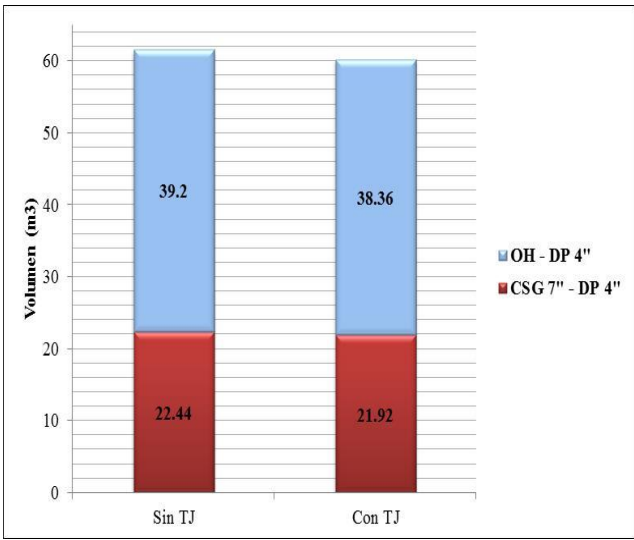


Figura 7: Volumen anular

Como se observa en las figuras anteriores, la reducción del volumen del espacio anular al considerar los TJ resulta despreciable, bajando de 61.64 m³ a 60.28 m³. No ocurre lo mismo con el área de flujo anular en las zonas donde se encuentran los TJ, reduciéndose un 33.2% dentro del casing de la etapa intermedia y un 36% en el pozo abierto. A continuación se muestra el valor que toma el ECD a lo largo del pozo, teniendo en cuenta o no a los TJ, para los siguientes escenarios: distintos caudales, variación en la densidad del lodo, cambios en la PV.

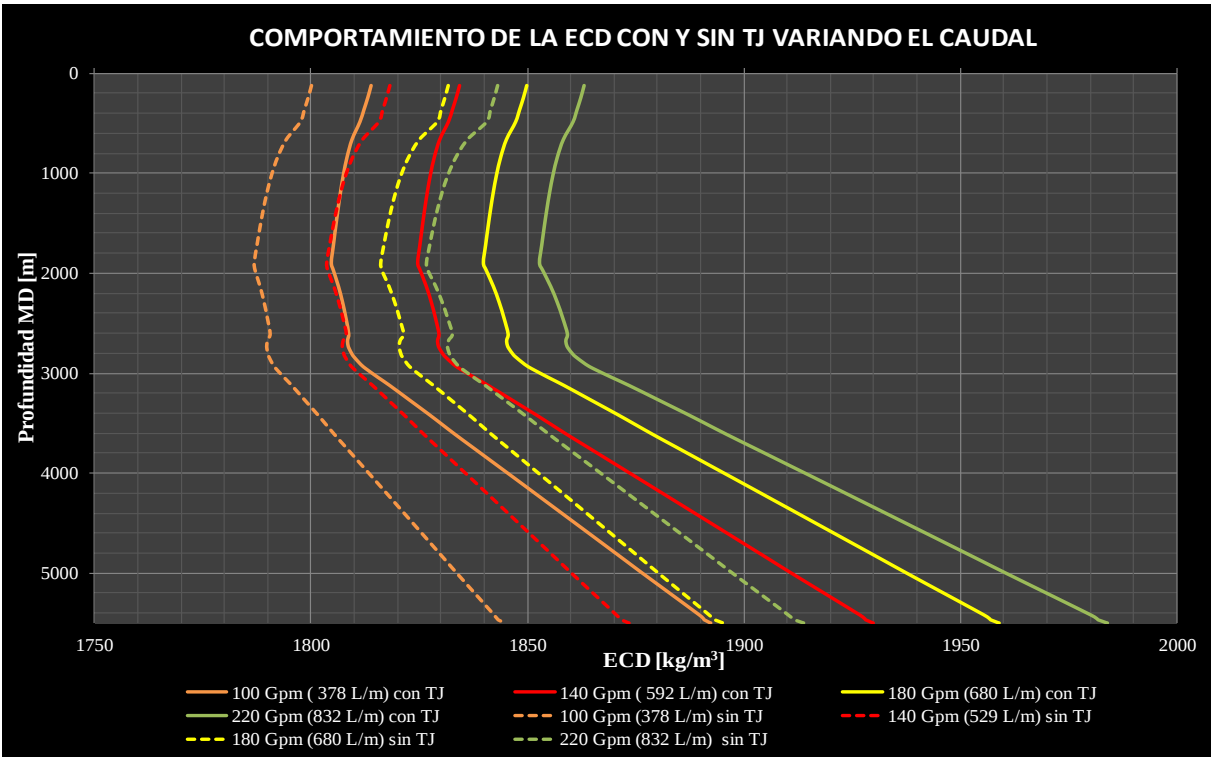


Gráfico 4: Comparación del ECD con y sin TJ, variando el caudal (1700 kg/m³; 100 rpm).

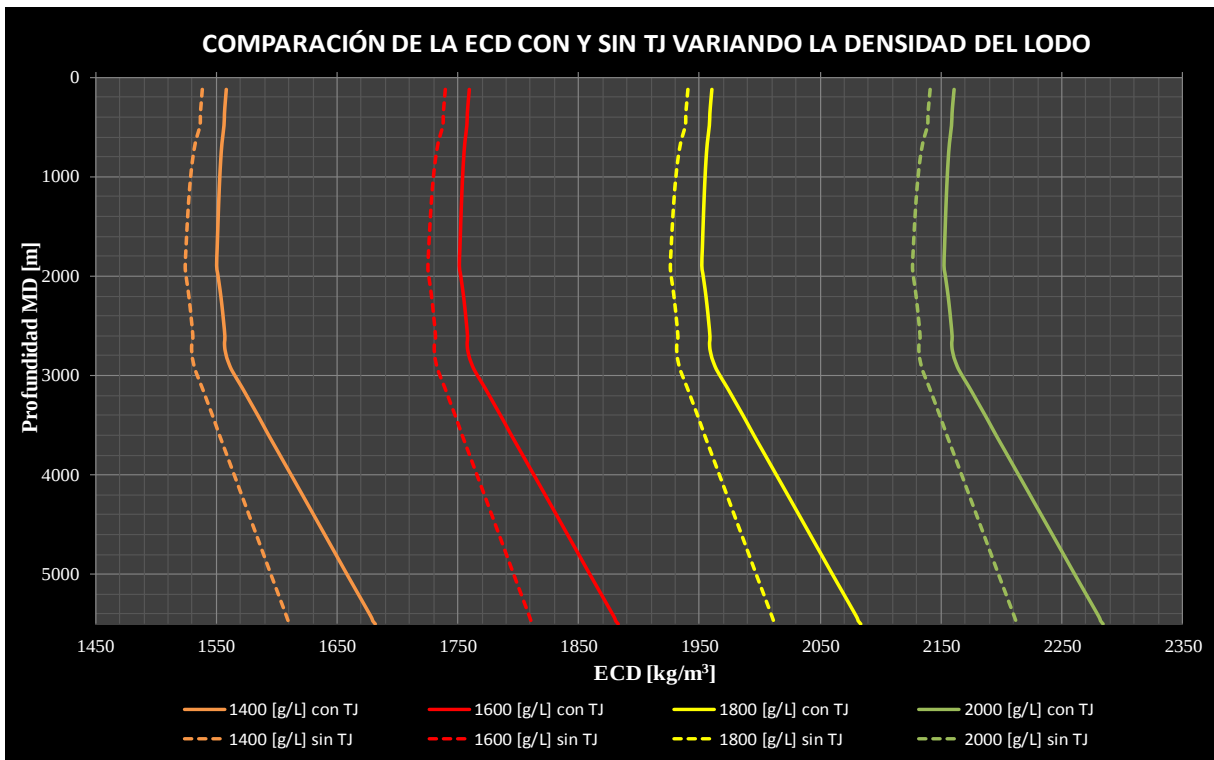


Gráfico 5: Comparación del ECD con y sin TJ, variando la densidad del lodo (1700 kg/m^3 ; 100 rpm).

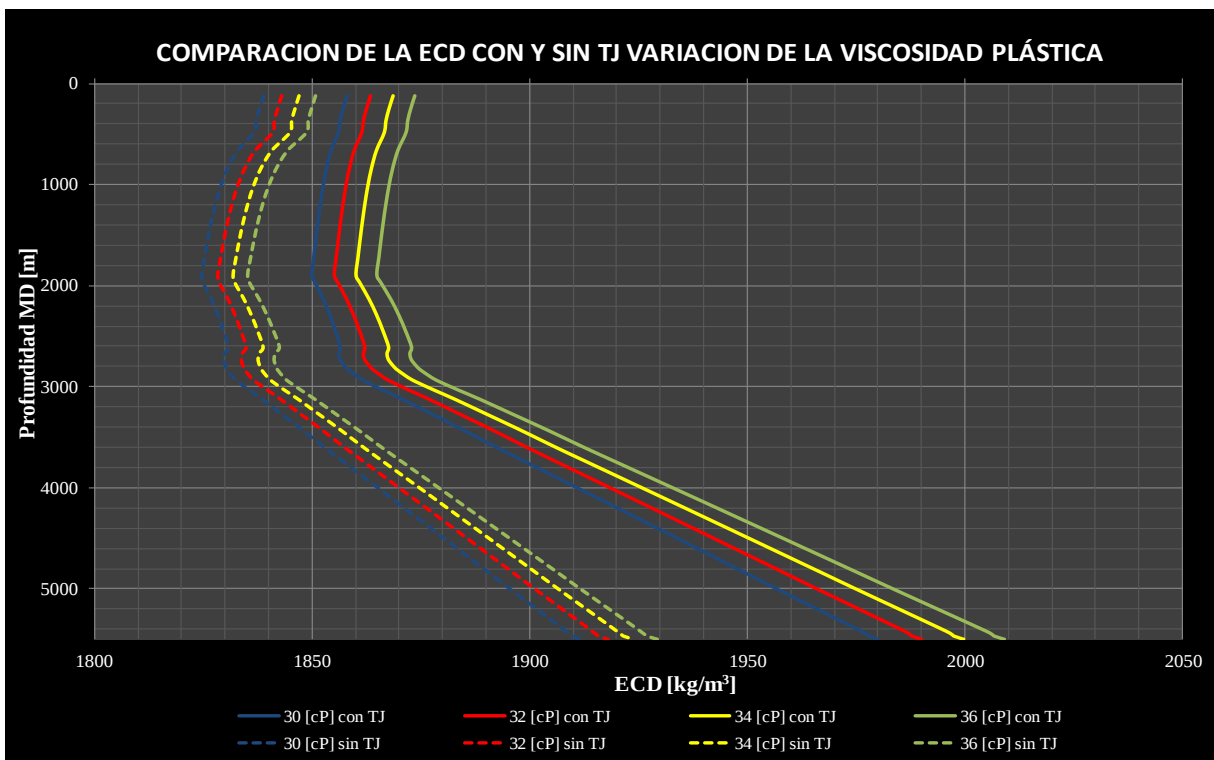


Gráfico 6: Comparación del ECD con y sin TJ, variando la viscosidad plástica (1700 kg/m^3 ; 100 rpm).

Caudal		ECD [kg/m ³]		
[Gpm]	[L/m]	con TJ	sin TJ	Diferencia
100	379	1891	1844	47
140	530	1928	1872	56
180	681	1957	1894	63
220	833	1982	1912	70

Tabla 19: Resultados de ECD para diferentes caudales (1700 kg/m³, WHP 0 Pa, 120 rpm).

Densidad [Kg/m ³]	ECD [kg/m ³]		
	con TJ	sin TJ	Diferencia
1400	1681	1611	70
1600	1882	1812	70
1800	2083	2013	70
2000	2284	2214	70

Tabla 20: Resultados de ECD para diferentes densidades del lodo (220 Gpm (833 L/m), WHP 0 Pa, 120 rpm).

PV [cP]	ECD [kg/m ³]		
	con TJ	sin TJ	Diferencia
30	1979	1911	68
32	1990	1918	72
34	1999	1923	76
36	2009	1929	80

Tabla 21: Resultados de ECD para diferentes PV.

Como se observa en las gráficas, la incidencia de la consideración adecuada de los TJ se incrementa a medida que aumenta el régimen de bombeo, debido al aumento en la fricción. Los resultados muestran que en este tipo de pozos de larga extensión, podemos llegar a tener una diferencia de 70 kg/m³ en la densidad equivalente en el fondo del pozo si no se consideran los TJ, que en este caso representan una diferencia de 276 psi (1902953 Pa) en la presión de fondo. Evidentemente para pozos de menor extensión, la variación va a ser menor, pero siempre de valores considerables.

Si bien los TJ se distribuyen a lo largo de toda la herramienta, la extensión total de ellos y su incidencia en el espacio anular, tienen un gran peso en el valor final del ECD.

Al incrementar la densidad del lodo, la diferencia en ingresar o no los TJ, se mantiene constante. Esto debido a que la densidad del lodo por sí sola solo afecta a la presión hidrostática, y consecuentemente a la BHCP. Esta variación no produce un cambio en la fricción, es por ello que la geometría del espacio anular no le afecta.

Por último, con el aumento en la PV, la diferencia en el valor del ECD aumenta muy rápidamente en la comparación realizada. Esto se debe, a que la PV por definición afecta a la condición dinámica del pozo, y está estrechamente relacionada con las pérdidas por fricción. Se observa que con un incremento de 6 cP, el ECD presenta una diferencia de 80 kg/m³, al considerar adecuadamente los TJ.

De este estudio se desprende la importancia de cargar adecuadamente las TJ al momento de realizar las hidráulicas del pozo. No considerarlas podría suponer una ECD considerablemente menor, presentar un perfil de presiones incorrecto a lo largo del pozo. Cuando se trabaja en MPD, se debe tener la mayor certidumbre posible en cuanto a los cálculos del perfil de presiones del pozo, que resultan imprescindibles para determinar adecuadamente presiones porales y/o admisión, y así trabajar dentro de la ventana operativa presentada.

Caso #8: Influencia de la exactitud del transmisor de presión WHP sobre el valor final de la ECD

Como se menciona en el título de este punto, se realizará un análisis de la influencia de la exactitud de los sensores de presión cuyo valor se debe ingresar para correr una hidráulica de pozo, y así determinar la densidad equivalente de circulación (ECD). La variable mencionada es la presión anular, cuyo valor se obtiene mayormente de los transmisores electrónicos colocados aguas arriba de los chokes de MPD. Dentro de los sensores electrónicos de presión empleados en la industria, se pueden distinguir dos grandes grupos, los analógicos y los digitales. Estos últimos tienen una exactitud muy superior a los primeros, y son empleados en los equipos de MPD de última generación.

La exactitud que se menciona en las hojas de datos de los fabricantes de estos sensores, tienen en cuenta la histéresis, repetibilidad y precisión entre otras características. Los valores que se mencionan a continuación son los que se presentan en condiciones normales de funcionamiento, para instrumentos de fábrica y/o con sus respectivas calibraciones.

Tipo	Escala [psi]	Escala [Pa]	Exactitud $\pm$ [% respecto FS]	Exactitud $\pm$ [psi]	Exactitud $\pm$ [Pa]
Baja calidad (analógico)	5000	34475000	0.5	25	172375
	10000	68950000	0.5	50	344750
Estándar (analógico)	5000	34475000	0.25	12.5	86187.5
	10000	68950000	0.25	25	172375
Alta calidad (digital)	5000	34475000	0.01	0.5	3447.5
	10000	68950000	0.01	1	6895

Tabla 22: Exactitud de sensores.

De la tabla, se desprende que para los sensores estándar, que son los más empleados, la exactitud ronda de 0.2 a 0.25 % respecto del fondo de escala. Son instrumentos que emplean mayormente un lazo de corriente de 4 a 20 miliamperios (mA). Como se mencionó, se observa la elevada precisión de los sensores digitales de presión, en los cuales la discrepancia del valor real de la medida puede ser despreciable. Dichos instrumentos se comunican empleando protocolos de comunicación como Modbus o Fieldbus, entre otros.

A continuación se muestran los valores que se obtienen del ECD en el fondo del pozo al adquirir el dato de WHP de sensores estándar, considerando los errores máximos en los que puede incurrir. Se estudiaron dos casos, uno con un valor real de WHP = 100 psi (689475 Pa) y otro WHP = 1000 psi (6894750 Pa).

Rango [psi]	Rango [Pa]	Valor real WHP [psi]	Valor real WHP [Pa]	Valor leído WHP [psi]	Valor leído WHP [Pa]	ECD [kg/m ³]	Diferencia [Kg/m ³]
0 a 5000	0 a 34473786	100	689500	87.5	603313	1920	6
				112.5	775688	1926	
		1000	6895000	987.5	6808813	2148	
				1012.5	6981188	2155	
0 a 10000	0 a 68947572	100	689500	75	517125	1917	13
				125	861875	1930	
		1000	6895000	975	6722625	2145	
				1025	7067375	2158	

Tabla 23: Exactitud de transmisores de presión estándar.

Se observa que si se emplean sensores estándar con un rango de 0 a 5000 psi (0 a 34473790 Pa), la máxima variación que presenta el valor de la densidad equivalente es de 6 kg/m³, utilizando los dos extremos que puede presentar WHP. En cambio con los instrumentos de 0 a 10000 psi (0 a 68947500 Pa), esta diferencia en el ECD ronda los 13 kg/m³.

Del análisis realizado se desprende, que siempre conviene utilizar sensores del rango adecuado, según los límites del equipamiento donde se monten. Con esto se logra reducir la incertidumbre del cálculo de la ECD, y reducir las oscilaciones en el valor de WHP. Cabe mencionar que el estudio se realizó con valores de fábrica, que con el uso y el paso del tiempo pueden modificarse (empeorar la exactitud). Por ello es de suma importancia realizar calibraciones periódicas, y contrastar las medidas contra un instrumento patrón debidamente certificado.

Con la tecnología disponible en la actualidad, y empleando sensores digitales, estas errores pueden ser prácticamente eliminados.

Caso #9: Efecto del diámetro del pozo sobre el valor final del ECD

El diámetro del pozo es un factor que influye en el cálculo del ECD, el mismo es variable durante toda la trayectoria del pozo y está muy lejos de ser un cilindro regular de diámetro conocido. Cuanto mayor es el diámetro mayor será el área transversal comprendida entre el Drill Pipe y las paredes del mismo, disminuyendo de esta manera la fricción anular. Caso contrario cuando el diámetro del pozo disminuye. Para realizar los cálculos hidráulicos muchas veces se toma como fijo el diámetro del pozo e igual al diámetro del trépano debido a que no se tiene información suficiente como para estimar un diámetro promedio.

Existen numerosos factores que pueden llegar a afectar las dimensiones de pozo logrando que en trayectos sean menores al diámetro del trépano y en otros iguales o mayores al mismo.

Los casos en que el diámetro sea mayor, se lo puede atribuir a presencia de derrumbes o desmoronamientos por formaciones no consolidadas, cavernas, o en ocasiones donde se trabaja con un gradiente de presión por debajo de la presión de colapso.

Por otro lado si el diámetro es menor que el diámetro de la trépano, puede indicar que se tratan de lutitas expansivas o que se formó un revoque muy grueso. Por último si el diámetro es similar al diámetro de la del trépano, indica que la roca es consolidada o dura.

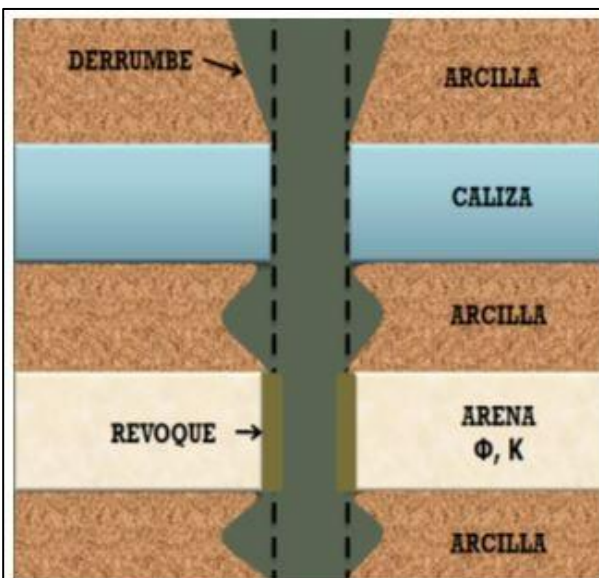
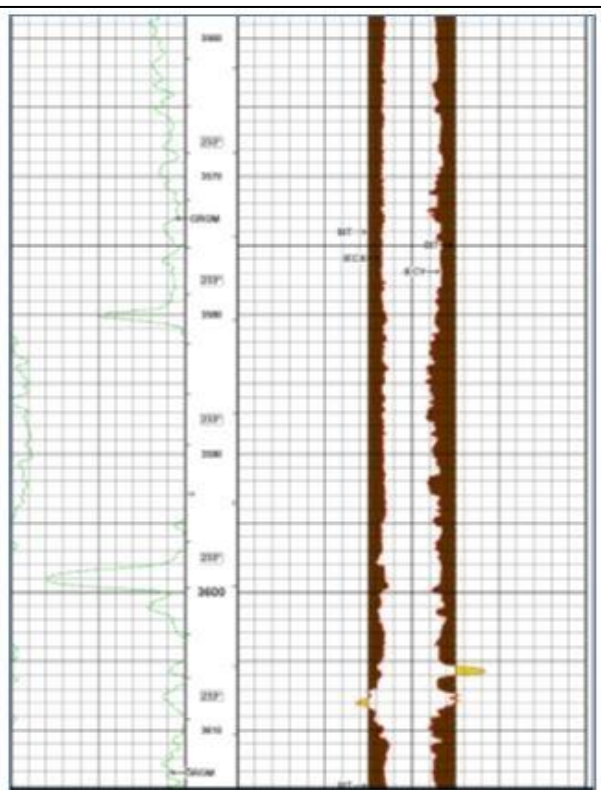


Figura 8: Columna litológica y calíper de pozo.



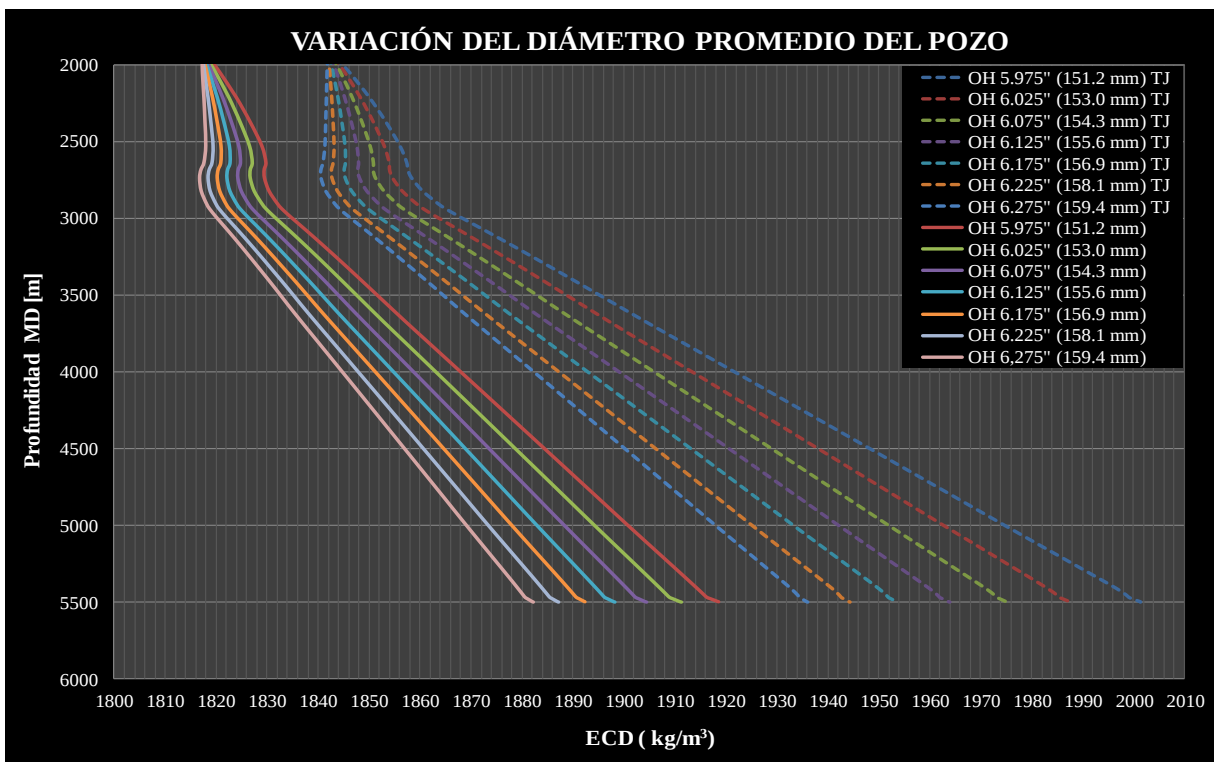


Gráfico 7: Perfil de ECD en TD con y sin TJ, variando el diámetro del pozo

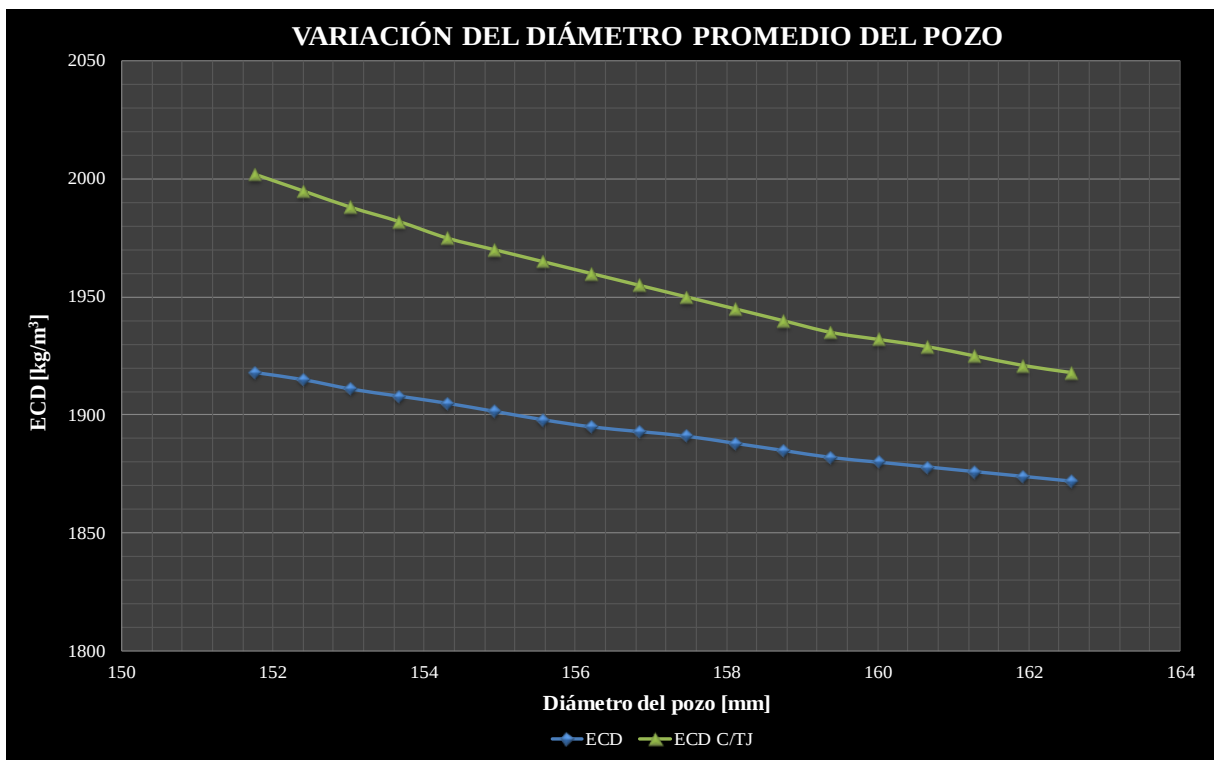


Gráfico 8: Comparación del ECD en TD con y sin TJ, variando el diámetro del pozo

Diámetro promedio		ECD [kg/m^3]		
[in]	[mm]	sin TJ	con TJ	Diferencia
5.975	152	1918	2002	84
6	152	1915	1995	80
6.025	153	1911	1988	77
6.05	154	1908	1982	74
6.075	154	1905	1975	70
6.1	155	1902	1970	68
6.125	156	1898	1965	67
6.15	156	1895	1960	65
6.175	157	1893	1955	62
6.2	157	1891	1950	59
6.225	158	1888	1945	57
6.25	159	1885	1940	55
6.275	159	1882	1935	53

Tabla 24: Valores de ECD para diferentes diámetros considerados (1700 kg/m^3 , WHP 0 psi, 220 Gpm (833 L/m), 100 rpm).

Como se observa en la figura anterior, una reducción del diámetro del pozo del 0.025" (0.635 mm) genera un aumento del ECD en el fondo de aproximadamente 0.04 kg/m^3 dando una variación porcentual del 0.18 % respecto al diámetro nominal. A medida que reducimos el diámetro la curva tiende cada vez a alargar esa diferencia, esto es debido que la variación tanto en las velocidades como en el área del flujo no es lineal. Por otro lado este efecto se ve más pronunciado cuando se simula el Drill Pipe con los TJ dando una diferencia máxima entre ambos casos simulados de 84 kg/m^3 .

Cabe destacar que los casos que se usaron como máximos y mínimos fueron seleccionados a partir de diámetros promedios determinados por calíper en distintos pozos horizontales.

De este análisis se desprende la influencia que puede tener una variación en el diámetro promedio del pozo para el cálculo del ECD en operaciones de MPD y saber que tanto influye en pozos donde un diámetro promedio pueda llegar a ser menor al diámetro del trépano o mayor al mismo.

Caso #10: Influencia de la eficiencia volumétrica de las bombas sobre el valor final del ECD

La eficiencia volumétrica se determina como el cociente entre el volumen del caudal real de una bomba de desplazamiento positivo y el volumen geométrico máximo teórico de líquido que podría extraer la bomba en condiciones ideales. En otras palabras, es una medida de las pérdidas en volumen debidas a fugas internas de la bomba hidráulica y se calcula dividiendo el caudal actual que entrega la bomba en litros o galones por minuto, entre el caudal teórico que por construcción la bomba debería de entregar expresada.

Las ineficiencias pueden ser causadas por:

- los componentes gaseosos (aire y metano) que quedan atrapados en el lodo líquido.
- las válvulas con fugas que no sellan en forma instantánea en las bombas
- la derivación del fluido de los sellos de pistón de las bombas.
- los juegos mecánicos de los diversos cojinetes y barras de conexión de las bombas.
- Presión y temperatura del fluido hidráulico que se transporta.
- Problemas en los filtros en la succión de la bomba.

La capacidad volumétrica de una bomba triplex, se calcula como volumen desplazado por embolada (stk), y se puede calcular con la siguiente formula:

$$\text{Capacidad} \left[\frac{\text{L}}{\text{stk}} \right] = 0.000002356 \times \phi_{\text{pistón}}^2 [\text{mm}] \times \text{carrera} [\text{mm}] \times \text{eff} \quad (3)$$

La eficiencia se expresa generalmente como porcentaje, y oscila entre 90% y 98% aproximadamente, en la mayoría de las bombas de los equipos de perforación modernos.

Se ha confeccionado una tabla variando el rendimiento de la bomba para determinar así cuanto afecta de manera directa en el caudal volumétrico.

Eficiencia [%]	Pistón		Carrera		Strokes/min	Capacidad [L/stk]	Caudal [Gpm]	Caudal [L/min]
	[in]	[mm]	[in]	[mm]				
98	5.5	140	12	304.8	63	13.7	230	871
97	5.5	140	12	304.8	63	13.6	227	859
96	5.5	140	12	304.8	63	13.5	225	852
95	5.5	140	12	304.8	63	13.3	222	840
94	5.5	140	12	304.8	63	13.2	220	833
93	5.5	140	12	304.8	63	13	217	821
92	5.5	140	12	304.8	63	12.9	215	814
91	5.5	140	12	304.8	63	12.8	213	806
90	5.5	140	12	304.8	63	12.6	210	795

Tabla 25: Diferentes caudales bombeados según la eficiencia total de la bomba.

En muchos casos el rendimiento de la bomba puede variar a lo largo de la perforación del pozo o puede que no sea la que realmente se cree que es. Por este motivo una buena práctica sería periódicamente recalculer el rendimiento volumétrico de las bombas antes de comenzar a perforar. Esta eficiencia puede ser determinada mediante una prueba en la cual el personal del equipo de perforación cuenta el número de emboladas de la bomba requeridas para bombear un volumen conocido de fluido documentando parámetros como presión de trabajo, propiedades del lodo y temperatura del mismo.

A partir de este punto se realizan simulaciones para determinar cómo varía el ECD a partir de cambios en el rendimiento de la bomba.

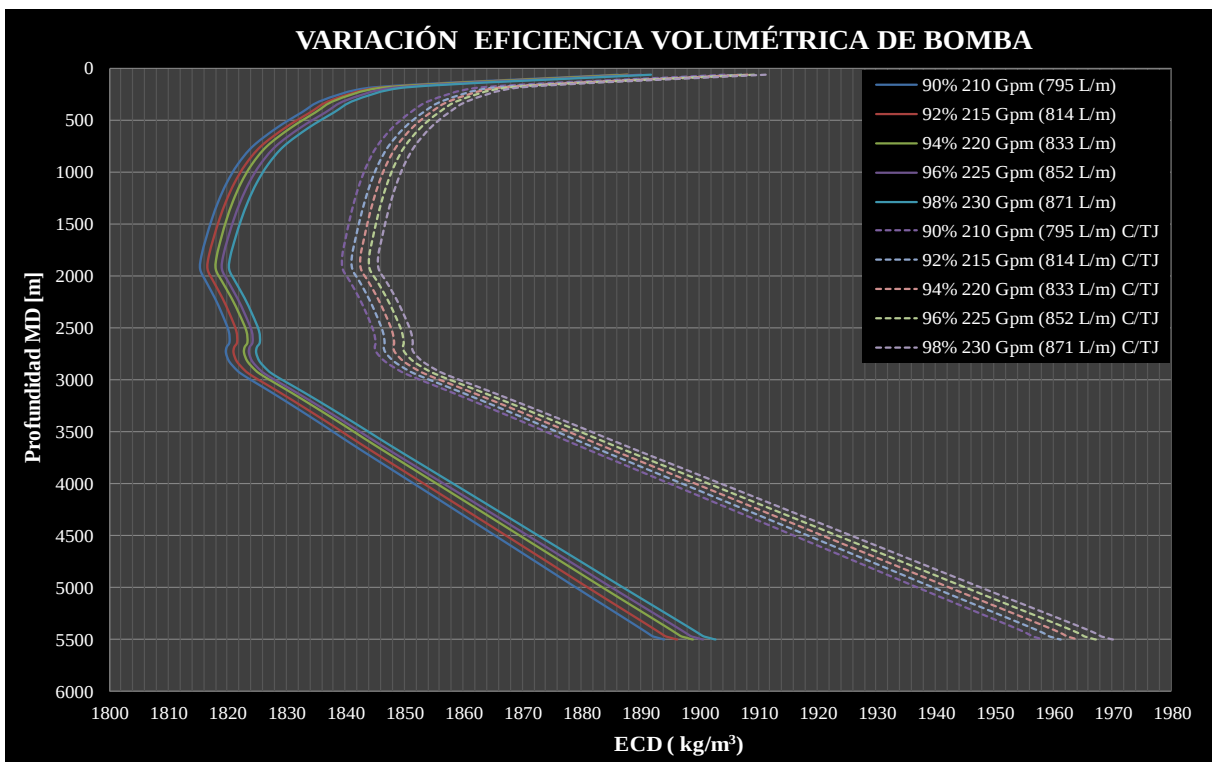


Gráfico 9: Perfil de ECD con y sin TJ, variando el rendimiento de la bomba

Se puede observar como una variación en la eficiencia de la bomba cambia el perfil de presión del pozo. A medida que cambia el caudal, automáticamente cambian las pérdidas de carga en el anular trasladando de un lado u otro la curva de ECD en las mismas proporciones para cada uno de los casos.

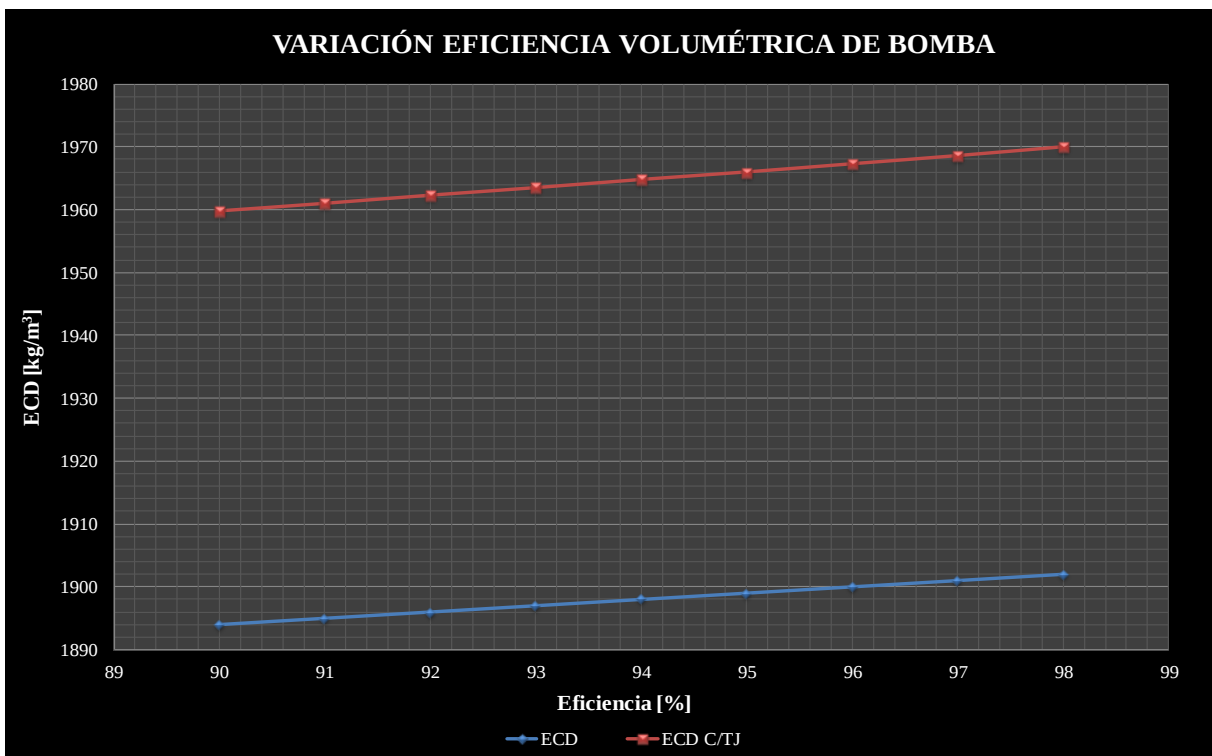


Gráfico 10: ECD en TD con y sin TJ, variando la eficiencia volumétrica de la bomba

En esta gráfica se puede apreciar el aumento casi lineal del ECD a medida incrementamos la eficiencia de la bomba. Lo mismo ocurre al modelar la tubería con TJ. La diferencia entre ambas gráficas es de unos 67 kg/m^3 y se mantiene casi constante para cada uno de los casos.

Eficiencia [%]	Caudal		ECD [Kg/m^3]		Diferencia
	[Gpm]	[L/m]	sin TJ	con TJ	
98	230	871	1902	1970	68
97	227	859	1901	1969	68
96	225	852	1900	1967	67
95	222	840	1899	1966	67
94	220	833	1898	1965	67
93	217	821	1897	1964	67
92	215	814	1896	1962	66
91	213	806	1895	1961	66
90	210	795	1894	1960	66

Tabla 26: Resultado de ECD según eficiencia de la bomba (1700 Kg/m^3 , WHP 0 Pa).

En la gráfica se puede observar como una disminución del 1% del rendimiento de la bomba estaría disminuyendo aproximadamente en 0.01 kg/m^3 el equivalente de circulación y en un porcentaje de 0.053% respecto al valor nominal tomando en este caso como 94%.

Como resumen, es muy recomendable determinar el rendimiento volumétrico de las bombas de lodo antes de comenzar operaciones en MPD y más que nada cuando se cambian en alguna medida los parámetros de perforación como caudales, presiones de trabajo y propiedades del lodo.

Conclusiones

Del análisis de los casos estudiados, puede concluirse que el error porcentual inducido por cada condición estudiada individualmente es, en términos generales, relativamente bajo, ya que no supera el tres por ciento (3%) por exceso/defecto. A excepción de las variables medidas, en las cuales la descalibración de equipos puede llevar a valores mayores. De todas formas resulta importante destacar que, si bien el error podría ser nulo, también podría ser máximo, y estas condiciones no son solo no predecibles sino que además podrían sumarse entre sí o contrarrestarse. Todas condiciones aleatorias.

Más allá del resultado numérico bajo que se mencionó anteriormente, dependiendo de la situación de un pozo en particular, este error (o combinación de errores que resulte en un error global mayor) podría resultar determinante en el cálculo de la ECD, incluso cambiando la condición de perforación (a desbalance por ejemplo). Puede presentar una importante dificultad al operar dentro de ventanas operativas estrechas. Algunos de los errores en cuestión son fácilmente minimizados con la aplicación de una buena práctica. Se debe destacar la importancia de la utilización de programas de hidráulica de perforación, que permitan el ingreso de las variables estudiadas para realizar la simulación.

A continuación se presenta una tabla con la descripción del error porcentual en cada caso, y la condición potencial que lo generaría.

Caso #	Detalle	Error porcentual mínimo		Error porcentual máximo	
		[%]	Condición	[%]	Condición
1	Excentricidad del pozo	0	herramienta y pozo concéntricos (situación ideal)	-2.63	máxima excentricidad (100%); 0 rpm
	Velocidad de rotación			-2.75	máxima excentricidad (100%); 120 rpm
2	Densidad del cutting	0	Misma densidad que el lodo de perforación.	1.65	Cutting de alta densidad (3000 Kg/m ³)
3	Carga anular (% cutting)	0	sin presencia de cutting (circulando)	0.98	5% cutting (36 m/h); 100 Gpm (378 L/m)
4	Lectura del viscosímetro de Fann	0	Lectura exacta (condición ideal)	-1.04	Δ 2 lb/100 ft ² (0.9576 Pa); 220 Gpm (833 L/m)
5	Modelo reológico seleccionado	n/a	no aplica debido a que cualquier modelo ya es una aproximación.	-2.07	modelo de Bingham; 220 Gpm (833 L/m)
6	Lectura de la balanza de lodo	0	Lectura exacta (condición ideal)	1.08	Δ 20 kg/m ³ ; 100 Gpm (378 L/m)
7	Efecto de los Tool Joint	0	Considerando los Tool Joint	-3.53	Sin considerar los Tool Joint; 220 Gpm (833 L/m)
8	Exactitud del sensor de presión anular	0	Lectura exacta (condición ideal)	0.76 -0.76	Baja calidad del sensor; escala de 10000 psi (68947500 Pa)
9	Diámetro promedio del pozo	0	Diámetro uniforme, cilindro perfecto (condición ideal)	1.88	5.975 in (151.8 mm); (con TJ)
10	Eficiencia volumétrica de las bombas	0	Conociendo la eficiencia real de la bomba (cualquiera sea su valor)	0.5	Δ 8% eff

Tabla 27: Errores porcentuales para cada caso estudiado, y la condición que lo generaría.

Bibliografía

- <http://workstringsinternational.com/index.aspx>
- www.oilproduction.net
- www.aks-technologies.com
- www.keller-druck.com
- www.nov.com
- www.measurementsensors.honeywell.com
- www.gp50.com
- www.weighingsolutions.com
- Manual de fluidos de perforación API. Rev. A.1, 14-02-2001.
- Pozos de alcance extendido, Copyright© 2011, Schlumberger.
- Drilling Design and Implementation for Extended Reach and Complex Wells, Published by K&M TECHNOLOGY GROUP, LLC Houston, Texas, 2003.

Agradecimientos

A todo el personal y colegas que colaboraron para que la realización del presente Paper Técnico fuera posible.

CV

Breit, Andrés: Ingeniero Electrónico; UTN Facultad Regional de Bahía Blanca; Weatherford, YPF, TGS. Actualmente en Weatherford Int. de Argentina (Field Engineer Level II).

Garmendia, Andrés: Ingeniero Químico; Universidad Nacional de Sur; Weatherford, M-I Swaco. Actualmente en Weatherford Int. de Argentina (Field Engineer Level II).

Rampellotto, Robertino: Ingeniero Electromecánico con Orientación en Automatización Industrial; UNLPam, UNSJ, Instituto Balseiro; Weatherford, Meier & Fischer. Actualmente en Weatherford Int. de Argentina (Field Engineer Level II).

Ruiz, Ismael: Ingeniero en Perforaciones; UNSa Facultad Regional Tartagal; Weatherford, Tecpetrol SA, HidroPlus SRL. Actualmente en Weatherford Int. de Argentina (Field Engineer Level II).

Abraham, Mario Gabriel: Técnico Electromecánico; Escuela Santa María de Oro; YPF SA. Actualmente en YPF SA (Especialista de Perforación Bajo Balance).