



UNIVERSIDAD UTE

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA E
INDUSTRIAS**

MAESTRÍA EN PETRÓLEOS

**MODIFICACIÓN DEL MÉTODO DE EMBUDO MARSH PARA
DETERMINAR LA VISCOSIDAD DE FLUIDOS DE
PERFORACIÓN DE POZOS DE PETRÓLEO**

**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE
MAGISTER EN PETRÓLEOS, MENCIÓN EN PROCESOS DE
PRODUCCIÓN E INDUSTRIALIZACIÓN DE HIDROCARBUROS**

ROMERO CORTEZ HENRY PAUL

DIRECTOR: ING. ARIAS BEJARANO VÍCTOR HUGO, MGT

Quito, enero 2020

© Universidad UTE. 2019

Reservados todos los derechos de reproducción

FORMULARIO DE REGISTRO BIBLIOGRÁFICO TRABAJO DE TITULACIÓN

| DATOS DE CONTACTO | |
|-----------------------|--------------------------|
| CÉDULA DE CIUDADANÍA: | 1716532906 |
| APELLIDO Y NOMBRES: | Romero Cortez Henry Paul |
| DIRECCIÓN: | Amagasi del Inca |
| EMAIL: | henryrnr1080@hotmail.com |
| TELÉFONO FIJO: | 024505874 |
| TELÉFONO MOVIL: | 0982528958 |

| DATOS DE LA OBRA | |
|---|---|
| TÍTULO: | MODIFICACIÓN DEL MÉTODO DE EMBUDO MARSH PARA DETERMINAR LA VISCOSIDAD DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN DE POZOS DE PETRÓLEO |
| AUTOR O AUTORES: | Romero Cortez Henry Paul |
| FECHA DE ENTREGA DEL PROYECTO DE TITULACIÓN: | 24 de enero de 2020 |
| DIRECTOR DEL PROYECTO DE TITULACIÓN: | ARIAS BEJARANO VÍCTOR HUGO |
| PROGRAMA | PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO <input checked="" type="checkbox"/> |
| TÍTULO POR EL QUE OPTA: | MAGISTER EN PETRÓLEOS |
| RESUMEN: | El objetivo de este trabajo fue modificar el método para determinar la viscosidad de embudo de fluidos de perforación de pozos de petróleo, para lo cual se construyó un equipo que tiene sensores de temperatura, tensión y caudal, con capacidad de almacenamiento de 20000 cm ³ que trabaja con una temperatura entre 15 y 40 °C, mide la viscosidad de embudo entre 26.81 y 47.94 s/946cm ³ y la viscosidad de embudo |

de flujo continuo entre 23.34 a 38.99 s/946cm³, la construcción del equipo permitió mantener la altura del nivel constante del fluido por lo que los tiempos de medida de la viscosidad de embudo de flujo continuo son menores, Estas medidas se obtuvieron según el procedimiento de la norma API RT 13B-1, con 5 concentraciones de material viscosificante y 3 densidad diferentes, para correlacionar estas dos variables fue necesario corregir sus valores por efecto de la temperatura según la norma ASTM D3195 a la temperatura estándar de 48.89 °C (120 °F). Los valores fueron validados con análisis de varianza, tomando en cuenta la concentración de material viscosificante y la densidad para determinar grupos de datos estadísticamente diferentes y se calculó una correlación exponencial con un factor de correlación de $R^2 = 0.9975$. Los promedios de la viscosidad de embudo y viscosidad de embudo de flujo continuo se midieron con un intervalo de confianza máximo de ± 1.05 y 1.46 % respectivamente para un nivel de significancia 0.05 de la distribución t-student y por los instrumentos de medida utilizados, el modelo matemático y el método para obtener estos valores, la incertidumbre expandida máxima fue de ± 2.02 y 2.33% respectivamente, mismos que son menores al nivel de significancia.

PALABRAS CLAVES:

Palabras Clave: Fluidos de perforación, Viscosidad de embudo continua, Modificación método.

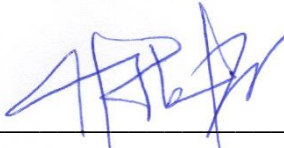
ABSTRACT:

The objective of this work was to modify the method to determine the funnel viscosity of drilling fluids, a device was built with temperature, tension and flow sensors, with storage capacity of 20,000 cm³, It works with temperature between 15 and 40 °C, it measures the funnel viscosity between 26.81 to 47.94 s/946cm³ and the continuous flow funnel viscosity between 23.34 to 38.99 s/946cm³, the construction of the equipment allowed to maintain constant the level of the fluid, so the measurement times of the continuous flow funnel viscosity are shorter than funnel viscosity, these measurements were obtained according to the procedure of standard API RT 13B-1, with 5 concentrations of viscosifying material and 3 different density, to correlate these two variables were necessary to correct their values by effect of temperature according to ASTM D3195 at the standard temperature of 48.89 °C (120 °F). The values were validated with analysis of variance using the concentration of viscosifying material and density to determine statistically different data groups and an exponential correlation with a correlation factor of $R^2 = 0.9975$ was calculated. The average funnel viscosity and continuous flow funnel viscosity were measured with a maximum confidence interval of ± 1.05 and 1.46% respectively for a 0.05 level of significance of the t-student distribution and for the measuring instruments used, the mathematical model and the method to obtain these values, the maximum expanded uncertainty was ± 2.02 and

| | |
|-----------------|---|
| | 2.33% respectively, which are lower than the level of significance. |
| KEYWORDS | Keywords: Drilling fluids, continuous funnel viscosity, Modification method. |

Se autoriza la publicación de este Proyecto de Titulación en el Repositorio Digital de la Institución.

f:



ROMERO CORTEZ HENRY PAUL
1716532906

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **ROMERO CORTEZ HENRY PAUL**, CC. 1716532906 autor del trabajo de titulación: **Modificación del método de embudo Marsh para determinar la viscosidad de fluidos de perforación de pozos de petróleo** previo a la obtención del título de **MAGISTER EN PETRÓLEOS** en la Universidad UTE.

1. Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las Instituciones de Educación Superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación de posgrado para que sea integrado al Sistema Nacional de información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2. Autorizo a la BIBLIOTECA de la Universidad UTE a tener una copia del referido trabajo de titulación de posgrado con el propósito de generar un Repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Quito, enero de 2020

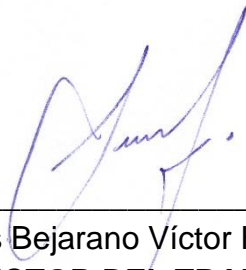
f:



ROMERO CORTEZ HENRY PAUL
1716532906

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de director de trabajo de titulación, certifico que el presente trabajo que lleva por título **Modificación del método de embudo Marsh para determinar la viscosidad de fluidos de perforación de pozos de petróleo** para aspirar al título de Magister en Petróleos fue desarrollado por **Romero Cortez Henry Paul**, bajo mi dirección y supervisión, en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería e Industrias; y que dicho trabajo cumple con las condiciones requeridas para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del Jurado examinador que se designe.

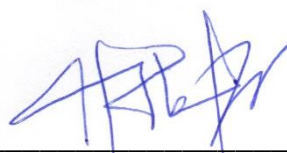


Ing. Arias Bejarano Víctor Hugo, Mgt
DIRECTOR DEL TRABAJO
C.C.: 1707211924

DECLARACIÓN JURAMENTADA DEL AUTOR

Yo, Romero Cortez Henry Paul, portador de la cédula de ciudadanía N° 1716532906, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en ese documento.

La Universidad UTE puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.



f: _____

ROMERO CORTEZ HENRY PAUL

1716532906



CNPC Chuanqing Drilling Engineering Company Limited
川庆钻探厄瓜多尔分公司 (CCDC)

Quito, 10 de septiembre del 2019

Señor Ingeniero

Fausto Ramos

COORDINADOR DE LA MAESTRÍA EN PETRÓLEOS

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA E INDUSTRIAS

UNIVERSIDAD UTE

Presente

Dando respuesta a la solicitud del Ing. Henry Romero para finalizar el tema para su trabajo de titulación en la maestría de petróleos: MODIFICACIÓN DEL MÉTODO DE EMBUDO MARSH PARA DETERMINAR LA VISCOSIDAD DE FLUIDOS DE PERFORACIÓN DE POZOS DE PETRÓLEO.

Expresamos lo siguiente:

1. El trabajo fue desarrollado en su totalidad en el laboratorio de fluidos de perforación de CNPC Chuanqing Drilling (CCDC).
2. Toda la información generada en este trabajo fue revisada por nuestro personal técnico especializado.
3. Los resultados son satisfactorios y cumplen con nuestras expectativas.

Con esto damos por finalizado la parte experimental de este trabajo de titulación.

Atentamente,


CNPC Chuanqing Drilling Engineering Company Limited
DEPARTAMENTO DE RRHH

Ing. Juan Carlos Astudillo
GERENTE DE RECURSOS HUMANOS
CNPC CHUANQING DRILLING COMPANY LIMITED

DEDICATORIA

Dedico de manera muy especial a quienes más amo en la vida.

A mi esposa, quien ha estado todo este tiempo a mi lado incondicionalmente y sabe cómo sacar lo mejor de mí en los momentos más difíciles.

A mis hijos, quienes con su amor son mi inspiración infinita.

AGRADECIMIENTOS

Mis agradecimientos a la empresa CNPC Chuanqing Drilling Company Limited (CCDC), por permitirme desarrollar este trabajo de investigación en el laboratorio de fluidos de perforación.

Agradezco a mi jefe Blass Molina por prestarme todas las facilidades durante todo el proceso de estudio y durante el desarrollo de este trabajo.

Gracias a mi esposa por su apoyo incondicional y su dedicación a nuestra familia para que yo pueda cumplir con mis metas.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

PÁGINA

RESUMEN 1

| | |
|--|-----------|
| ABSTRACT | 2 |
| 1. INTRODUCCIÓN | 3 |
| 2. METODOLOGÍA..... | 6 |
| 2.1. CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO DE VISCOSIDAD DE EMBUDO DE FLUJO CONTINUO..... | 6 |
| 2.1.1. VISCOSÍMETRO DE EMBUDO MARSH..... | 6 |
| 2.1.2. SISTEMA DE CIRCULACIÓN DE FLUIDO | 6 |
| 2.1.3. SENSORES DIGITALES Y SOFTWARE | 6 |
| 2.2. OBTENCIÓN DE LA VISCOSIDAD DE EMBUDO Y LA VISCOSIDAD DE EMBUDO DE FLUJO CONTINUO..... | 7 |
| 2.2.1. VISCOSIDAD DE EMBUDO..... | 7 |
| 2.2.2. VISCOSIDAD DE EMBUDO DE FLUJO CONTINUO..... | 7 |
| 2.2.3. VISCOSIDAD DE EMBUDO Y VISCOSIDAD DE EMBUDO DE FLUJO CONTINUO A DIFERENTES CONDICIONES..... | 7 |
| 2.2.4. EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA VISCOSIDAD DE EMBUDO..... | 7 |
| 2.3. VALIDACIÓN DE LOS DATOS..... | 8 |
| 2.3.1. CORRELACIÓN ENTRE LA VISCOSIDAD DE EMBUDO Y LA VISCOSIDAD DE EMBUDO DE FLUJO CONTINUO | 8 |
| 2.3.2. OBTENCIÓN DEL INTERVALO DE CONFIANZA | 9 |
| 2.3.3. DETERMINACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DEL MÉTODO..... | 9 |
| 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 12 |
| 3.1. CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO DE VISCOSIDAD DE EMBUDO DE FLUJO CONTINUO..... | 12 |
| 3.1.1. ESQUEMA DEL EQUIPO..... | 12 |
| 3.1.2. CALIBRACIÓN DEL EQUIPO | 13 |
| 3.2. OBTENCIÓN DE LA VISCOSIDAD DE EMBUDO Y VISCOSIDAD DE EMBUDO DE FLUJO CONTINUO..... | 13 |
| 3.2.1. VISCOSIDAD DE EMBUDO Y VISCOSIDAD DE EMBUDO DE FLUJO CONTINUO | 13 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 3.2.2. | VISCOSIDAD DE EMBUDO Y VISCOSIDAD DE EMBUDO DE FLUJO CONTINUO CORREGIDA CON LA TEMPERATURA | 14 |
| 3.3. | VALIDACIÓN DE LOS DATOS..... | 16 |
| 3.3.1. | CORRELACIÓN ENTRE LA VISCOSIDAD DE EMBUDO Y LA VISCOSIDAD DE EMBUDO DE FLUJO CONTINUO | 16 |
| 3.3.2. | INTERVALOS DE CONFIANZA PARA LA VISCOSIDAD DE EMBUDO Y VISCOSIDAD DE EMBUDO DE FLUJO CONTINUO | 24 |
| 3.3.3. | INCERTIDUMBRE PARA LA VISCOSIDAD DE EMBUDO Y VISCOSIDAD DE EMBUDO DE FLUJO CONTINUO | 25 |
| 4. | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 29 |
| 4.1. | CONCLUSIONES | 29 |
| 4.2. | RECOMENDACIONES | 29 |
| | BIBLIOGRAFÍA | 30 |
| | ANEXOS | 33 |

ÍNDICE DE TABLAS

PÁGINA

| | | |
|------------------|---|----|
| Tabla 1. | Concentración de material viscosificante y densidad de los fluidos de perforación utilizados | 7 |
| Tabla 2. | Viscosidad de embudo, viscosidad de embudo de flujo continuo y su temperatura para un fluido polimérico de densidad 1.00 g/cm ³ | 14 |
| Tabla 3. | Viscosidad de embudo, viscosidad de embudo de flujo continuo y su temperatura para un fluido polimérico de densidad 1.10 g/cm ³ | 14 |
| Tabla 4. | Viscosidad de embudo, viscosidad de embudo de flujo continuo y su temperatura para un fluido polimérico de densidad 1.20 g/cm ³ | 14 |
| Tabla 5. | Viscosidad de embudo a temperatura estándar, viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar para un fluido polimérico de densidad 1.00 g/cm ³ | 15 |
| Tabla 6. | Viscosidad de embudo a temperatura estándar, viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar para un fluido polimérico de densidad 1.10 g/cm ³ | 15 |
| Tabla 7. | Viscosidad de embudo a temperatura estándar, viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar para un fluido polimérico de densidad 1.20 g/cm ³ | 15 |
| Tabla 8. | Viscosidad de embudo a temperatura estándar para un fluido polimérico | 19 |
| Tabla 9. | Viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar para un fluido polimérico | 20 |
| Tabla 10. | Resumen de viscosidad de embudo, viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar para cualquier densidad y cualquier concentración | 20 |
| Tabla 11. | Datos estadísticos necesarios para el cálculo de los intervalos de confianza | 24 |
| Tabla 12. | Intervalos de confianza para una distribución t-student n=10, $\alpha=0.05$ de los promedios de viscosidad de embudo a una temperatura promedio..... | 24 |
| Tabla 13. | Intervalos de confianza para una distribución t-student n=10, $\alpha=0.05$ de los promedios de viscosidad de embudo de flujo continuo a una temperatura promedio..... | 25 |
| Tabla 14. | Información del certificado de calibración de los equipos utilizados | 26 |
| Tabla 15. | Incertidumbre y coeficiente de sensibilidad del tiempo y del volumen de la viscosidad de embudo | 27 |
| Tabla 16. | Incertidumbre de la viscosidad de embudo..... | 27 |
| Tabla 17. | Incertidumbre y coeficiente de sensibilidad del tiempo y del volumen de la viscosidad de embudo de flujo continuo | 28 |

| | |
|--|----|
| Tabla 18. Incertidumbre de la viscosidad de embudo de flujo continuo | 28 |
| Tabla 19. Validación de la calibración del termómetro en un intervalo bajo y un intervalo alto de temperatura | 33 |
| Tabla 20. Valores utilizados en la calibración del sensor de tensión | 34 |
| Tabla 21. Valores utilizados en la calibración del sensor de caudal | 35 |
| Tabla 22. Viscosidad de embudo, viscosidad de embudo de flujo continuo para un fluido polimérico de densidad 1.00 g/cm ³ y una concentración de goma xanthica de 0.00 g/350cm ³ | 36 |
| Tabla 23. Viscosidad de embudo, viscosidad de embudo de flujo continuo para un fluido polimérico de densidad 1.00 g/cm ³ y una concentración de goma xanthica de 0.50 g/350cm ³ | 37 |
| Tabla 24. Viscosidad de embudo, viscosidad de embudo de flujo continuo para un fluido polimérico de densidad 1.00 g/cm ³ y una concentración de goma xanthica de 1.00 g/350cm ³ | 37 |
| Tabla 25. Viscosidad de embudo, viscosidad de embudo de flujo continuo para un fluido polimérico de densidad 1.00 g/cm ³ y una concentración de goma xanthica de 1.50 g/350cm ³ | 37 |
| Tabla 26. Viscosidad de embudo, viscosidad de embudo de flujo continuo para un fluido polimérico de densidad 1.00 g/cm ³ y una concentración de goma xanthica de 2.00 g/350cm ³ | 38 |
| Tabla 27. Viscosidad de embudo, viscosidad de embudo de flujo continuo para un fluido polimérico de densidad 1.00 g/cm ³ y una concentración de goma xanthica de 2.50 g/350cm ³ | 38 |
| Tabla 28. Viscosidad de embudo, viscosidad de embudo de flujo continuo para un fluido polimérico de densidad 1.10 g/cm ³ y una concentración de goma xanthica de 0.50 g/350cm ³ | 38 |
| Tabla 29. Viscosidad de embudo, viscosidad de embudo de flujo continuo para un fluido polimérico de densidad 1.10 g/cm ³ y una concentración de goma xanthica de 1.00 g/350cm ³ | 39 |
| Tabla 30. Viscosidad de embudo, viscosidad de embudo de flujo continuo para un fluido polimérico de densidad 1.10 g/cm ³ y una concentración de goma xanthica de 1.50 g/350cm ³ | 39 |
| Tabla 31. Viscosidad de embudo, viscosidad de embudo de flujo continuo para un fluido polimérico de densidad 1.10 g/cm ³ y una concentración de goma xanthica de 2.00 g/350cm ³ | 39 |
| Tabla 32. Viscosidad de embudo, viscosidad de embudo de flujo continuo para un fluido polimérico de densidad 1.10 g/cm ³ y una concentración de goma xanthica de 2.50 g/350cm ³ | 40 |
| Tabla 33. Viscosidad de embudo, viscosidad de embudo de flujo continuo para un fluido polimérico de densidad 1.20 g/cm ³ y una concentración de goma xanthica de 0.50 g/350cm ³ | 40 |

| | |
|---|----|
| Tabla 34. Viscosidad de embudo, viscosidad de embudo de flujo continuo para un fluido polimérico de densidad 1.20 g/cm^3 y una concentración de goma xanثica de 1.00 g/350cm^3 | 40 |
| Tabla 35. Viscosidad de embudo, viscosidad de embudo de flujo continuo para un fluido polimérico de densidad 1.20 g/cm^3 y una concentración de goma xanثica de 1.50 g/350cm^3 | 41 |
| Tabla 36. Viscosidad de embudo, viscosidad de embudo de flujo continuo para un fluido polimérico de densidad 1.20 g/cm^3 y una concentración de goma xanثica de 2.00 g/350cm^3 | 41 |
| Tabla 37. Viscosidad de embudo, viscosidad de embudo de flujo continuo para un fluido polimérico de densidad 1.20 g/cm^3 y una concentración de goma xanثica de 2.50 g/350cm^3 | 41 |
| Tabla 38. Viscosidad de embudo y viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar en orden descendente..... | 43 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | PÁGINA |
|--|--------|
| Figura 1. Esquema del equipo | 12 |
| Figura 2. Correlación entre los promedios de la viscosidad de embudo y viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar a una densidad de 1.00 g/cm ³ | 16 |
| Figura 3. Correlación entre los promedios de la viscosidad de embudo y viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar a una densidad de 1.10 g/cm ³ | 17 |
| Figura 4. Correlación entre los promedios de la viscosidad de embudo y viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar a una densidad de 1.20 g/cm ³ | 18 |
| Figura 5. Promedios de viscosidad de embudo y viscosidad de embudo de flujo continuo a diferente concentración de material viscosificante y diferentes densidades D1=1.00 g/cm ³ , D2=1.10 g/cm ³ y D3=1.20 g/cm ³ | 19 |
| Figura 6. Correlación entre los promedios de la viscosidad de embudo y viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar sin considerar la densidad | 21 |
| Figura 7. Dispersión, correlación lineal y correlación exponencial entre los valores de viscosidad de embudo y viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar | 22 |
| Figura 8. Dispersión y correlación exponencial entre los valores de viscosidad de embudo y viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar sin considerar la densidad | 23 |
| Figura 9. En azul la dispersión y correlación entre los valores de viscosidad de embudo y viscosidad de embudo de flujo continuo y en naranja la dispersión y correlación entre los promedios de viscosidad de embudo y viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar sin considerar la densidad..... | 23 |
| Figura 10. Identificación de las variables de contribución a la incertidumbre de la medida de la viscosidad de embudo y a la viscosidad de embudo de flujo continuo..... | 25 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| | PÁGINA |
|--|---------------|
| ANEXO 1. CALIBRACIÓN DE LOS SENSORES..... | 33 |
| ANEXO 2. CÁLCULO DE LA VISCOSIDAD DE EMBUDO Y VISCOSIDAD DE EMBUDO DE FLUJO CONTINUO | 36 |
| ANEXO 3. CÁLCULO DE LA VISCOSIDAD DE EMBUDO Y VISCOSIDAD DE EMBUDO DE FLUJO CONTINUO A TEMPERATURA ESTÁNDAR | 42 |

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue modificar el método para determinar la viscosidad de embudo de fluidos de perforación de pozos de petróleo, para lo cual se construyó un equipo que tiene sensores de temperatura, tensión y caudal, con capacidad de almacenamiento de 20000 cm³ que trabaja con una temperatura entre 15 y 40 °C, mide la viscosidad de embudo entre 26.81 y 47.94 s/946cm³ y la viscosidad de embudo de flujo continuo entre 23.34 a 38.99 s/946cm³, la construcción del equipo permitió mantener la altura del nivel constante del fluido por lo que los tiempos de medida de la viscosidad de embudo de flujo continuo son menores, Estas medidas se obtuvieron según el procedimiento de la norma API RT 13B-1, con 5 concentraciones de material viscosificante y 3 densidad diferentes, para correlacionar estas dos variables fue necesario corregir sus valores por efecto de la temperatura según la norma ASTM D3195 a la temperatura estándar de 48.89 °C (120 °F). Los valores fueron validados con análisis de varianza, tomando en cuenta la concentración de material viscosificante y la densidad para determinar grupos de datos estadísticamente diferentes y se calculó una correlación exponencial con un factor de correlación de $R^2 = 0.9975$. Los promedios de la viscosidad de embudo y viscosidad de embudo de flujo continuo se midieron con un intervalo de confianza máximo de ± 1.05 y 1.46 % respectivamente para un nivel de significancia 0.05 de la distribución t-student y por los instrumentos de medida utilizados, el modelo matemático y el método para obtener estos valores, la incertidumbre expandida máxima fue de ± 2.02 y 2.33% respectivamente, mismos que son menores al nivel de significancia.

Palabras Clave: Fluidos de perforación, Viscosidad de embudo continua, Modificación método.

ABSTRACT

The objective of this work was to modify the method to determine the funnel viscosity of drilling fluids, a device was built with temperature, tension and flow sensors, with storage capacity of 20,000 cm³, It works with temperature between 15 and 40 °C, it measures the funnel viscosity between 26.81 to 47.94 s/946cm³ and the continuous flow funnel viscosity between 23.34 to 38.99 s/946cm³, the construction of the equipment allowed to maintain constant the level of the fluid, so the measurement times of the continuous flow funnel viscosity are shorter than funnel viscosity, these measurements were obtained according to the procedure of standard API RT 13B-1, with 5 concentrations of viscosifying material and 3 different density, to correlate these two variables were necessary to correct their values by effect of temperature according to ASTM D3195 at the standard temperature of 48.89 °C (120 °F). The values were validated with analysis of variance using the concentration of viscosifying material and density to determine statistically different data groups and an exponential correlation with a correlation factor of $R^2 = 0.9975$ was calculated. The average funnel viscosity and continuous flow funnel viscosity were measured with a maximum confidence interval of ± 1.05 and 1.46% respectively for a 0.05 level of significance of the t-student distribution and for the measuring instruments used, the mathematical model and the method to obtain these values, the maximum expanded uncertainty was ± 2.02 and 2.33% respectively, which are lower than the level of significance.

Keywords: Drilling fluids, Continuous funnel viscosity, Modification method.

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

Los fluidos de perforación tienen diferentes funciones durante el proceso de construcción de un pozo de petróleo y las más importantes se encargan de proporcionar la energía necesaria para controlar la presión de la formación y transportar los sólidos de perforación fuera del pozo. Estas funciones del fluido de perforación son cruciales y son el resultado de dos propiedades fundamentales del fluido, la densidad y la viscosidad (Martinez Vidaur, 2018).

El viscosímetro de embudo Marsh inventado en los años 30s (Marsh, 1931) es un dispositivo simple utilizado para realizar medidas rápidas de rutina de la viscosidad del fluido de perforación y es un excelente indicador de los cambios de las propiedades del fluido de perforación (OFI Testing Equipment, 2009).

La viscosidad de embudo es el tiempo necesario para llenar un cuarto de galón (946 cm³) o es el inverso del caudal, el valor para el agua es de 26 s/946 cm³ ± 0.5 s/946 cm³ (Pitt, 2000) esta medida puede ser corregida por el efecto de la temperatura por medio de la relación entre la temperatura absoluta del fluido y la temperatura absoluta estándar de la prueba (ASTM, 2015).

En las operaciones de perforación las medidas de viscosidad de embudo se obtienen cada hora y se registran junto con la densidad. La viscosidad de embudo se mide por medio de muestras puntuales tomadas de los tanques de fluido de la succión o de la descarga según sea necesario (American Petroleum Institute, 2001). La reología es medida cada 6 horas y es reportada al equipo de trabajo cada 12 horas, esta información es utilizada únicamente por las personas directamente relacionadas con el fluido de perforación (De la Torre Ramos & Ramos Rodríguez, 2017).

Los fluidos de perforación deben tener flexibilidad reológica durante la perforación para poder tomar decisiones de modificar los parámetros de: caudal, velocidad de giro de la tubería, peso sobre la broca, entre otros parámetros que ayuda a maximizar la velocidad de penetración o corregir problemas operacionales que se presentan durante la perforación (Maxey, 2007).

La reología del fluido de perforación es principalmente usado para los cálculos de hidráulica viscosidad plástica y punto cedente los cuales son necesarios para: la optimización de la limpieza de pozo, cálculo de presiones de suaveo y pistoneo, y otros cálculos necesarios para la perforación de pozos, actualmente se está buscando formas de estimar valores de viscosidad

plástica y punto cedente a partir de la viscosidad de embudo (Abdelgawad, Elkatatny, Mousa, Mahmoud, & Patil, 2018).

La tendencia moderna es migrar la información analógica a digital con el uso de nuevas tecnologías en las áreas de generación, almacenamiento y transmisión de datos de parámetros de perforación para identificar posibles problemas operacionales, dando paso al desarrollo de nuevas tecnologías que miden y transmiten los parámetros de perforación en tiempo real (Sedaghat, Abdulsalam, Omar, Damrah, & Gaith, 2016).

Durante la perforación de pozos de petróleo muchos parámetros de perforación se registran y se transmiten por internet en tiempo real, para ser analizados en otro lugar y dar recomendaciones para prevenir problemas durante la perforación y evitar pérdidas por tiempo no productivo (Miller, Minton, Colquhoun, & Ketchion, 2011).

El uso de sensores y la transmisión de datos a software por internet han migrado estos parámetros de perforación de análogo a digital, pero hay sectores que todavía utilizan métodos analógicos como lo es la viscosidad de embudo (Hestad & Gulbrandsen, 2018).

La transformación de los datos analógicos en digitales de la viscosidad de embudo permitirá monitorear en tiempo real esta información para realizar análisis de las condiciones del fluido de perforación (Miller et al., 2011).

Hay una directa entre la viscosidad efectiva, la densidad y la viscosidad de embudo, esto propone la posibilidad de encontrar relaciones entre la viscosidad de embudo y otras propiedades reológica como la viscosidad plástica y el punto cedente (Almahdawi, Al-Yaseri, & Jasim, 2014).

La viscosidad de embudo se puede utilizar para diferentes fluidos a parte de los fluidos de perforación e incluso se puede utilizar para medir la fluidez de lechadas de cemento (Roy & Roussel, 2005).

Elkatatny and Mahmoud consideran la viscosidad de embudo para obtener estimaciones de los valores reológicos que permite obtener mejores cálculos de densidad equivalente de circulación (ECD) para prevenir problemas de pega de tubería (2017).

Todos los aspectos de la sociedad se apoyan en el trabajo analítico o pruebas experimentales que tienen un costo alto adicional a los costos relacionados con las decisiones tomadas a partir de los resultados, es importante hacer una correcta medición y demostrar que el resultado es correcto, realizando una validación del método (Eurolab & Morilla, 2016).

Una correlación estadística se utiliza con dos o más variables continuas obtenidas experimentalmente, para obtener una regresión entre las variables dependientes que se utiliza para predecir o interpretar el mecanismo experimental (Sanford & Charles, 2004).

En el análisis estadístico cuando la muestra es menor a 30, el intervalo de confianza de la medida se calcula mediante la distribución t de Student, y si el coeficiente de correlación lineal es mayor a 0.999 se considerará una correlación lineal de lo contrario se puede utilizar otra correlación que se adapte mejor (Castillo Aguilar & González Hernández, 1996).

Algunas correlaciones no lineales pueden reducirse a la forma lineal aplicando logaritmo a los valores de una o de las dos variables dependientes (Spiegel, Schiller, & Srinivasan, 2006).

OBJETIVO GENERAL

Modificar el método para determinar la viscosidad de embudo de fluidos de perforación de pozos de petróleo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construir un equipo de viscosidad de embudo de flujo continuo.
- Obtener la viscosidad de embudo y la viscosidad de embudo de flujo continuo.
- Validar las medidas obtenidas con el método original y el método modificado.

METODOLOGÍA

2. METODOLOGÍA

El trabajo se desarrolló en el laboratorio de fluidos de perforación de la empresa CNPC Chuanqing Drilling Company Limited (CCDC).

2.1. CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO DE VISCOSIDAD DE EMBUDO DE FLUJO CONTINUO

Se construyó una estructura metálica de escuadra de acero de una pulgada de 50cm x 50cm x 160cm con varios soportes horizontales y verticales donde se colocó lo siguiente:

2.1.1. VISCOSÍMETRO DE EMBUDO MARSH

El viscosímetro de embudo Marsh está diseñado según la norma API RT 13B-1 Recommended Practice for Field Testing Water-based Drilling Fluids y es de marca OFI Testing Equipment (OFITE) (American Petroleum Institute, 2019).

2.1.2. SISTEMA DE CIRCULACIÓN DE FLUIDO

Se instaló un sistema de circulación de fluido de perforación con los siguientes equipos y accesorios:

- a. Bomba hidráulica de un caballo de potencia
- b. Tanque de almacenamiento de veinte litros de capacidad
- c. Calentador eléctrico domestico de una hornilla
- d. Tuberías y accesorios de PVC
- e. Válvulas de globo
- f. Mangueras y abrazaderas
- g. Recipiente metálico de cinco litros
- h. Estructura metálica y soportes de madera para nivelar

2.1.3. SENSORES DIGITALES Y SOFTWARE

Se instaló sensores digitales de tensión (AVIA), caudal (YIFA) y temperatura (TEXAS Instruments), que por medio de un micro controlador (Arduino Nano) se conectó al puerto USB del computador.

2.2. OBTENCIÓN DE LA VISCOSIDAD DE EMBUDO Y LA VISCOSIDAD DE EMBUDO DE FLUJO CONTINUO

2.2.1. VISCOSIDAD DE EMBUDO

La viscosidad de embudo Marsh se midió según el procedimiento estándar definido en la norma API RT 13B-1 Recommended Practice for Field Testing Water-based Drilling Fluids (American Petroleum Institute, 2019).

El experimento se realizó en un intervalo de temperaturas entre 19 y 37 °C, la viscosidad de embudo, viscosidad de embudo de flujo continuo, densidad y temperatura se repitieron 10 veces cada una (Sadrizadeh, Ghaffar, Halilovicc, & Hokansson, 2017).

2.2.2. VISCOSIDAD DE EMBUDO DE FLUJO CONTINUO

- Se preparó seis litros de fluido de perforación y se colocó en el tanque de almacenamiento.
- Se circuló el fluido a través del embudo Marsh y se ajustó el nivel del fluido por diez minutos para estabilizar las propiedades y la temperatura.
- Se midió el tiempo y el volumen aproximado de 1000 cm³
- Se repitió la medida diez veces y se registró.

2.2.3. VISCOSIDAD DE EMBUDO Y VISCOSIDAD DE EMBUDO DE FLUJO CONTINUO A DIFERENTES CONDICIONES

Se utilizó para las diferentes medidas las siguientes densidades y concentraciones de material viscosificante como en la tabla 1.

Tabla 1. Concentración de material viscosificante y densidad de los fluidos de perforación utilizados

| Densidad (g/cm ³) | | Concentración (g/350 cm ³) | | | |
|-------------------------------|------|--|------|------|------|
| 1.00 | 0.50 | 1.00 | 1.50 | 2.00 | 2.50 |
| 1.10 | 0.50 | 1.00 | 1.50 | 2.00 | 2.50 |
| 1.20 | 0.50 | 1.00 | 1.50 | 2.00 | 2.50 |

Se prepararon fluidos de varias densidades para cada concentración de material viscosificante.

2.2.4. EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA VISCOSIDAD DE EMBUDO

Se corrigió la temperatura a 48.89 °C (120 °F) según la norma ASTM D3195 - Standard Practice for Rotameter Calibration con la ecuación 1 (ASTM, 2015).

$$FV_{STD} = FV_T \frac{(T + 273.15)}{(T_{STD} + 273.15)} \quad [1]$$

Donde:

FV_{STD} = Viscosidad de embudo a temperatura estándar (s)

FV_T = Viscosidad de embudo a cualquier temperatura (s)

T = Cualquier temperatura (°C)

T_{STD} = Temperatura estándar (48.89 °C)

2.3. VALIDACIÓN DE LOS DATOS

Se realizó un análisis ANOVA y un análisis de varianza con promedios de 10 repeticiones para cada medida. Se determinó la correlación con todos los datos experimentales (160 datos) y sus promedios corregidos por la temperatura para obtener una regresión exponencial con un coeficiente de correlación mayor a 0.997 (Castillo Aguilar & González Hernández, 1996). Se determinó el intervalo de confianza para un nivel de significancia de 0.05 para una distribución t-student de dos colas (Spiegel et al., 2006).

Se determinó la incertidumbre expandida tomando en cuenta el factor de cobertura $K=2$ para un nivel de significancia de 0.05 y 9 grados de libertad de una distribución t-student y la incertidumbre del método calculada con la incertidumbre tipo A y la incertidumbre del modelo matemático que se calculó con las incertidumbres de las variables del tiempo y volumen junto con los coeficientes de sensibilidad obtenidos de las derivadas parciales de la ecuación utilizada para obtener la medida. La incertidumbre del tiempo y el volumen se determinaron con la información de los certificados de calibración, desviación estándar, la tolerancia y la apreciación de los instrumentos utilizados para medir (Wolfgang & Ruben, 2000).

2.3.1. CORRELACIÓN ENTRE LA VISCOSIDAD DE EMBUDO Y LA VISCOSIDAD DE EMBUDO DE FLUJO CONTINUO

- a. Se obtuvieron los datos corregidos por efecto de la temperatura de viscosidad de embudo y de viscosidad de embudo de flujo continuo para cada condición fijada en la tabla 1.
- b. Se realizó un análisis ANOVA y un análisis de varianzas
- c. Se calculó una correlación que permita determinar la viscosidad de embudo en función de la viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar.

2.3.2. OBTENCIÓN DEL INTERVALO DE CONFIANZA

- Se definió el nivel de significancia alfa de 0.05 y los grados de libertad (n-1).
- Se calculó la desviación estándar con la ecuación 2 y el intervalo de confianza con la ecuación 3 para los valores promedios de viscosidad de embudo y viscosidad de embudo de flujo continuo.

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad [2]$$

Donde:

S = Desviación estándar de la muestra

n = Tamaño de la muestra

x_i = Muestra

\bar{x} = Promedio de la muestra

$$\mu = \bar{X} \pm t_c \frac{S}{\sqrt{n}} \quad [3]$$

Donde:

μ = Promedio poblacional

\bar{x} = Promedio de la muestra

S = Desviación estándar de la muestra

n = Tamaño de la muestra

$t_c \cdot S / \sqrt{n}$ = Intervalo de confianza (IC)

2.3.3. DETERMINACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DEL MÉTODO

- Se identificó las variables de contribución a la incertidumbre por el método de espina de pescado.
- Se calculó la incertidumbre de las medidas con la ecuación 4.
- Se calculó los coeficientes de sensibilidad de las medidas con la ecuación 5.
- Se calculó la incertidumbre del modelo matemático con la ecuación 6.
- Se calculó la incertidumbre calculada tipo A con la ecuación 7.
- Se calculó la incertidumbre del método con la ecuación 8.
- Se calculó la incertidumbre expandida con la ecuación 9.

$$u_i^2 = u_{i \text{ calibración}}^2 + u_{i \text{ deriva}}^2 + u_{i \text{ resolución}}^2 \quad [4]$$

Donde:

- i = Variable (tiempo o volumen)
- u_i = Incertidumbre de la medida
- $u_{i \text{ calibración}}$ = Incertidumbre de la calibración del equipo
- $u_{i \text{ deriva}}$ = Incertidumbre de la derivada
- $u_{i \text{ resolución}}$ = Incertidumbre de la resolución del equipo

$$u_{i \text{ calibración}} = \frac{U_{i \text{ certificado}}}{2} \quad [4.1]$$

Donde:

- i = Variable (tiempo o volumen)
- $u_{i \text{ calibración}}$ = Incertidumbre de la calibración del equipo
- $U_{i \text{ certificado}}$ = Incertidumbre de dos colas de la calibración del equipo

$$u_{i \text{ deriva}} = \frac{\text{tolerancia}_i}{\sqrt{12}} \quad [4.2]$$

Donde:

- i = Variable (tiempo o volumen)
- $u_{i \text{ deriva}}$ = Incertidumbre de la derivada parcial
- tolerancia_i = Tolerancia de la calibración del equipo

$$u_{i \text{ resolución}} = \frac{\text{apreciación}_i}{\sqrt{12}} \quad [4.3]$$

Donde:

- i = Variable (tiempo o volumen)
- $u_{i \text{ resolución}}$ = Incertidumbre de la resolución del equipo
- apreciación_i = Apreciación de la calibración del equipo

$$C_i = \frac{\partial(DFV)}{\partial i} \quad [5]$$

Donde:

- i = Variable (tiempo o volumen)
- C_i = Coeficiente de sensibilidad de las medidas
- DFV = Viscosidad de embudo de flujo continuo

$$C_t = \frac{\partial(DFV)}{\partial t} \quad [5.1]$$

Donde:

t = Medida del tiempo

C_t = Coeficiente de sensibilidad de la medida del tiempo

DFV = Viscosidad de embudo de flujo continuo

$$C_{vol} = \frac{\partial(DFV)}{\partial(vol)} \quad [5.2]$$

Donde:

vol = Medida del volumen

C_{vol} = Coeficiente de sensibilidad de la medida del volumen

DFV = Viscosidad de embudo de flujo continuo

$$u_{modelo} = \sqrt{u_t^2 * C_t^2 + u_{vol}^2 * C_{vol}^2} \quad [6]$$

Donde:

u_{modelo} = Incertidumbre del modelo matemático

u_t = Incertidumbre de la medida del tiempo

u_{vol} = Incertidumbre de la medida del volumen

C_t = Coeficiente de sensibilidad del tiempo

C_{vol} = Coeficiente de sensibilidad del volumen

$$u_A = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad [7]$$

Donde:

u_A = Incertidumbre tipo A calculada

S = Desviación estándar

n = muestra

$$u_{método} = \sqrt{u_{modelo}^2 + u_A^2} \quad [8]$$

Donde:

$u_{método}$ = Incertidumbre del método

u_{modelo} = Incertidumbre del modelo matemático

u_A = Incertidumbre tipo A calculada

$$U_{EXP} = U_{método} * K \quad [9]$$

Donde:

U_{EXP} = Incertidumbre expandida

$u_{método}$ = Incertidumbre del método

K = Factor de cobertura para $n \geq 10$ y $\alpha = 0.05$, es $K = 2$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO DE VISCOSIDAD DE EMBUDO DE FLUJO CONTINUO

3.1.1. ESQUEMA DEL EQUIPO

El equipo se construyó según la metodología descrita en el punto 2.1. y el esquema final se presenta en la figura 1.

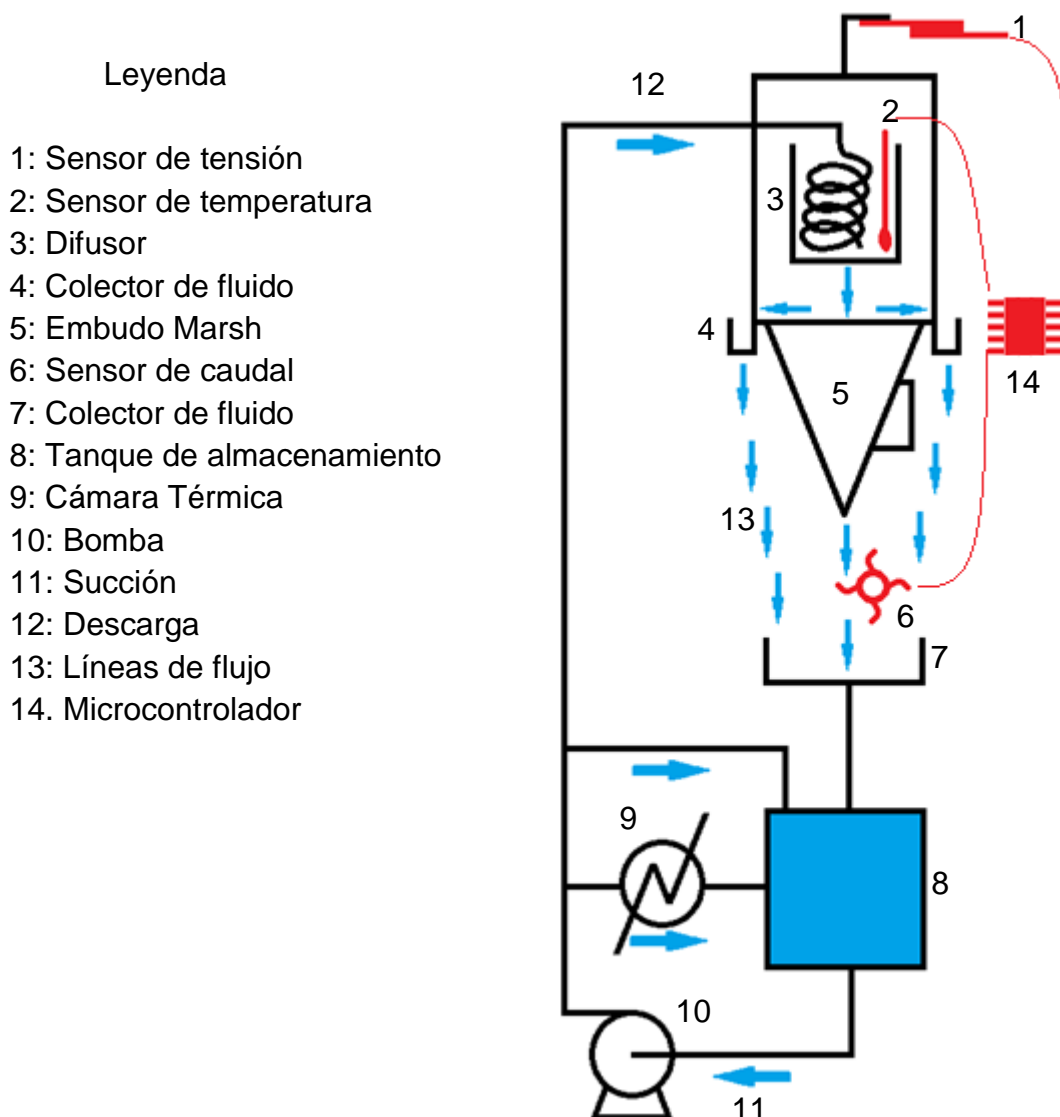


Figura 1. Esquema del equipo
Negro: Esquema del equipo, Rojo: Sensores y Azul: Flujo

Este equipo tiene la capacidad de 20000 cm³ y funciona en un intervalo de temperatura entre 15 y 40 °C, un de caudal entre 21 a 41 cm³/s, y realiza medidas de viscosidad de embudo entre 23 a 48 s/943cm³.

Los sensores instalados son: el de temperatura, marca Texas Instruments, modelo LM35, el de tensión, marca AVIA Semiconductor, modelo HX711, y el de caudal, marca YIFA The Plastics, modelo YF-S201 Hall, todos estos sensores fueron conectados a un microprocesador Arduino Nano.

3.1.2. CALIBRACIÓN DEL EQUIPO

Antes de realizar las medidas se comprobó todas las conexiones, accesorios y sensores que estén funcionando y alcancen un equilibrio dinámico y térmico con el siguiente procedimiento.

- a. Colocar el fluido en el sistema y circular.
- b. Iniciar el microcontrolador con el embudo vacío.
- c. Obtener el equilibrio dinámico a través del embudo con un nivel constante.
- d. Obtener el equilibrio térmico hasta que la temperatura sea constante.
- e. Realizar las medidas.
- f. Repetir el procedimiento si algún ajuste es necesario para garantizar la repetibilidad de la medida.

3.2. OBTENCIÓN DE LA VISCOSIDAD DE EMBUDO Y VISCOSIDAD DE EMBUDO DE FLUJO CONTINUO

3.2.1. VISCOSIDAD DE EMBUDO Y VISCOSIDAD DE EMBUDO DE FLUJO CONTINUO

Se obtuvo la viscosidad de embudo según el estándar API RT 13B-1 y la viscosidad de embudo de flujo continuo con la ecuación 10 con los datos del anexo 2.

$$FV_T = \frac{946 * t}{vol} \quad [10]$$

Donde:

T = Temperatura (°C)

FV_T = Viscosidad de embudo de flujo FV o DFV (s/946 cm³)

t = Tiempo (s)

vol = Volumen (cm³)

En la tabla 2, tabla 3 y tabla 4 se muestran los promedios de 10 medidas de la viscosidad de embudo (FV) y de la viscosidad de embudo de flujo continuo (DFV) a sus diferentes temperaturas, concentraciones de material viscosificante y densidades, todos los valores para los calculados están en el anexo 2.

Tabla 2. Viscosidad de embudo, viscosidad de embudo de flujo continuo y su temperatura para un fluido polimérico de densidad 1.00 g/cm³

| Concentración (g/350cm ³) | FV (s/946 cm ³) | Temperatura FV (°C) | DFV (s/946 cm ³) | Temperatura DFV, (°C) |
|---------------------------------------|-----------------------------|---------------------|------------------------------|-----------------------|
| 0.0 | 26.81 ± 0.09 ^a | 19.43 | 23.34 ± 0.10 ^a | 19.60 |
| 0.5 | 28.75 ± 0.20 ^b | 31.26 | 25.18 ± 0.18 ^b | 28.85 |
| 1.0 | 32.38 ± 0.45 ^c | 31.77 | 28.50 ± 0.15 ^c | 32.36 |
| 1.5 | 36.10 ± 0.07 ^d | 31.28 | 31.31 ± 0.05 ^d | 31.28 |
| 2.0 | 40.35 ± 0.40 ^e | 32.52 | 34.30 ± 0.66 ^e | 32.74 |
| 2.5 | 47.94 ± 0.25 ^f | 31.77 | 38.99 ± 0.32 ^f | 31.61 |

Diferentes letras en la misma columna significan que hay diferencia significativa estadísticamente

Tabla 3. Viscosidad de embudo, viscosidad de embudo de flujo continuo y su temperatura para un fluido polimérico de densidad 1.10 g/cm³

| Concentración (g/350cm ³) | FV (s/946 cm ³) | Temperatura FV (°C) | DFV (s/946 cm ³) | Temperatura DFV, (°C) |
|---------------------------------------|-----------------------------|---------------------|------------------------------|-----------------------|
| 0.5 | 29.57 ± 0.32 ^a | 25.76 | 26.55 ± 0.35 ^a | 25.76 |
| 1.0 | 31.92 ± 0.31 ^b | 27.04 | 28.63 ± 0.47 ^b | 27.04 |
| 1.5 | 34.76 ± 0.19 ^c | 31.25 | 30.78 ± 0.29 ^c | 31.25 |
| 2.0 | 37.91 ± 0.34 ^d | 34.54 | 33.16 ± 0.15 ^d | 34.54 |
| 2.5 | 42.71 ± 0.24 ^e | 36.16 | 36.27 ± 0.10 ^e | 36.16 |

Diferentes letras en la misma columna significan que hay diferencia significativa estadísticamente

Tabla 4. Viscosidad de embudo, viscosidad de embudo de flujo continuo y su temperatura para un fluido polimérico de densidad 1.20 g/cm³

| Concentración (g/350cm ³) | FV (s/946 cm ³) | Temperatura FV (°C) | DFV (s/946 cm ³) | Temperatura DFV, (°C) |
|---------------------------------------|-----------------------------|---------------------|------------------------------|-----------------------|
| 0.5 | 29.76 ± 0.29 ^a | 33.24 | 26.19 ± 0.25 ^a | 33.24 |
| 1.0 | 32.06 ± 0.09 ^b | 32.91 | 28.15 ± 0.19 ^b | 32.91 |
| 1.5 | 36.75 ± 0.08 ^c | 32.42 | 31.89 ± 0.04 ^c | 32.42 |
| 2.0 | 40.12 ± 0.17 ^d | 33.72 | 34.51 ± 0.05 ^d | 33.72 |
| 2.5 | 44.66 ± 0.16 ^e | 35.68 | 37.46 ± 0.11 ^e | 35.68 |

Diferentes letras en la misma columna significan que hay diferencia significativa estadísticamente

Se comprobó que estadísticamente todas las letras en minúsculas en columna son estadísticamente diferentes y que cada concentración genera un fluido con características reológicas diferentes.

3.2.2. VISCOSIDAD DE EMBUDO Y VISCOSIDAD DE EMBUDO DE FLUJO CONTINUO CORREGIDA CON LA TEMPERATURA

En la tabla 5, tabla 6 y tabla 7 se presenta la viscosidad de embudo a temperatura estándar (FV_{STD}), viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar (DFV_{STD}) para cada concentración de material viscosificante y densidad.

Tabla 5. Viscosidad de embudo a temperatura estándar, viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar para un fluido polimérico de densidad 1.00 g/cm³

| Concentración (g/350cm³) | FV_{STD} (s/946 cm³) | DFV_{STD} (s/946 cm³) |
|--|--|---|
| 0.0 | 24.36 ± 0.08 ^a | 21.22 ± 0.08 ^a |
| 0.5 | 27.18 ± 0.22 ^b | 23.83 ± 0.17 ^b |
| 1.0 | 30.66 ± 0.42 ^c | 26.98 ± 0.15 ^c |
| 1.5 | 34.13 ± 0.07 ^d | 29.60 ± 0.06 ^d |
| 2.0 | 38.29 ± 0.38 ^e | 32.57 ± 0.62 ^d |
| 2.5 | 45.36 ± 0.24 ^f | 36.92 ± 0.30 ^f |

Diferentes letras en la misma columna significan que hay diferencia significativa estadísticamente

Tabla 6. Viscosidad de embudo a temperatura estándar, viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar para un fluido polimérico de densidad 1.10 g/cm³

| Concentración (g/350cm³) | FV_{STD} (s/946 cm³) | DFV_{STD} (s/946 cm³) |
|--|--|---|
| 0.5 | 27.44 ± 0.29 ^a | 24.64 ± 0.33 ^a |
| 1.0 | 29.76 ± 0.30 ^b | 26.69 ± 0.44 ^b |
| 1.5 | 32.86 ± 0.19 ^c | 29.09 ± 0.27 ^c |
| 2.0 | 36.22 ± 0.32 ^d | 31.54 ± 0.15 ^d |
| 2.5 | 41.03 ± 0.24 ^e | 34.83 ± 0.02 ^e |

Diferentes letras en la misma columna significan que hay diferencia significativa estadísticamente

Tabla 7. Viscosidad de embudo a temperatura estándar, viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar para un fluido polimérico de densidad 1.20 g/cm³

| Concentración (g/350cm³) | FV_{STD} (s/946 cm³) | DFV_{STD} (s/946 cm³) |
|--|--|---|
| 0.5 | 28.31 ± 0.28 ^a | 24.92 ± 0.23 ^a |
| 1.0 | 30.47 ± 0.08 ^b | 26.75 ± 0.19 ^b |
| 1.5 | 34.87 ± 0.08 ^c | 30.26 ± 0.05 ^c |
| 2.0 | 38.23 ± 0.16 ^d | 32.89 ± 0.07 ^d |
| 2.5 | 42.83 ± 0.24 ^e | 35.92 ± 0.14 ^e |

Diferentes letras en la misma columna significan que hay diferencia significativa estadísticamente

3.3. VALIDACIÓN DE LOS DATOS

3.3.1. CORRELACIÓN ENTRE LA VISCOSIDAD DE EMBUDO Y LA VISCOSIDAD DE EMBUDO DE FLUJO CONTINUO

En la Figura 2 se presenta la ecuación 11 de correlación entre los promedios de la viscosidad de embudo a temperatura estándar (FV_{STD}) y la viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar (DFV_{STD}) para la densidad 1.00 g/cm^3 con los datos de la tabla 5.

$$FV_{STD} = 10.659 * e^{(0.0393 * DFV_{STD})} \quad [11]$$

Donde:

FV_{STD} = Viscosidad de embudo a temperatura estándar ($\text{s}/946 \text{ cm}^3$)

DFV_{STD} = Viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar ($\text{s}/946 \text{ cm}^3$)

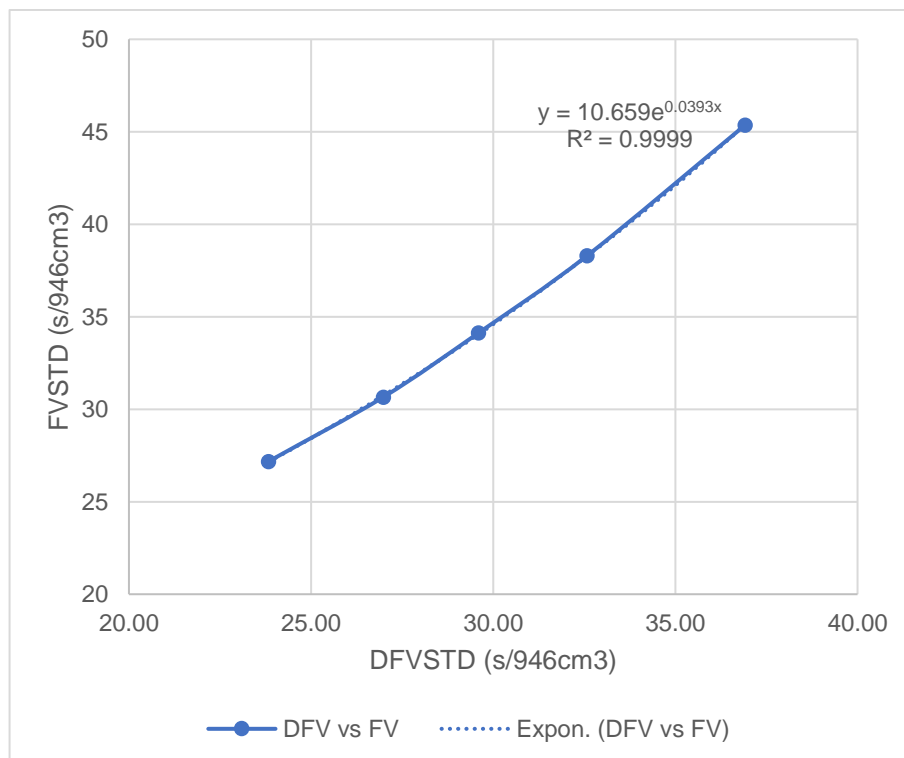


Figura 2. Correlación entre los promedios de la viscosidad de embudo y viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar a una densidad de 1.00 g/cm^3

Los valores promedio de viscosidad de embudo y viscosidad de embudo de flujo continuo corregidas a la temperatura estándar para la densidad 1.00 g/cm^3 tienen una relación exponencial y corresponde a la ecuación 11 con un coeficiente de regresión $R^2 = 0.9999$.

Se presenta la ecuación 12 de correlación entre los promedios de la viscosidad de embudo a temperatura estándar (FV_{STD}) y la viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar (DFV_{STD}) para la densidad 1.10 g/cm^3 obtenida con los datos de la tabla 6, presentados en la Figura 3.

$$FV_{STD} = 10.356 * e^{(0.0396 * DFV_{STD})} \quad [12]$$

Donde:

FV_{STD} = Viscosidad de embudo a temperatura estándar (s/946 cm^3)

DFV_{STD} = Viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar (s/946 cm^3)

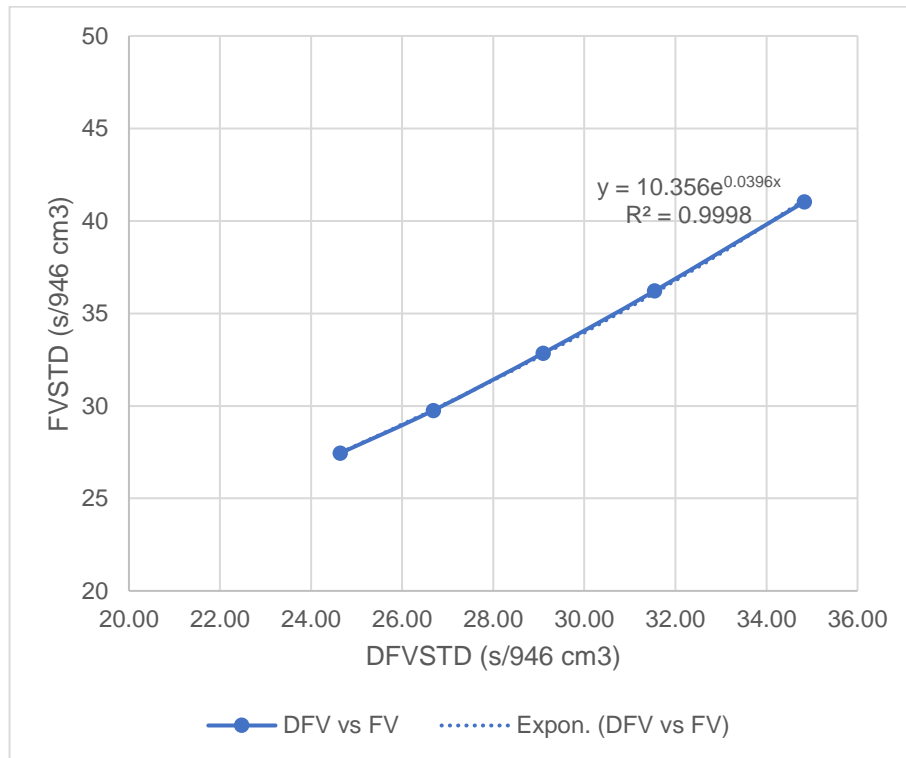


Figura 3. Correlación entre los promedios de la viscosidad de embudo y viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar a una densidad de 1.10 g/cm^3

Los valores promedio de la viscosidad de embudo y viscosidad de embudo de flujo continuo corregidos a temperatura estándar para la densidad 1.10 g/cm^3 tiene una relación exponencial y corresponde a la ecuación 12 con un coeficiente de regresión $R^2 = 0.9998$

La correlación entre los promedios de la viscosidad de embudo a temperatura estándar (FV_{STD}) y la viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar (DFV_{STD}) para la densidad 1.20 g/cm^3 con los datos de la tabla 7 se presenta en la Figura 4 con la ecuación 13.

$$FV_{STD} = 11.177 * e^{(0.0374 * DFV_{STD})} \quad [13]$$

Donde:

FV_{STD} = Viscosidad de embudo a temperatura estándar (s/946 cm³)

DFV_{STD} = Viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar (s/946 cm³)

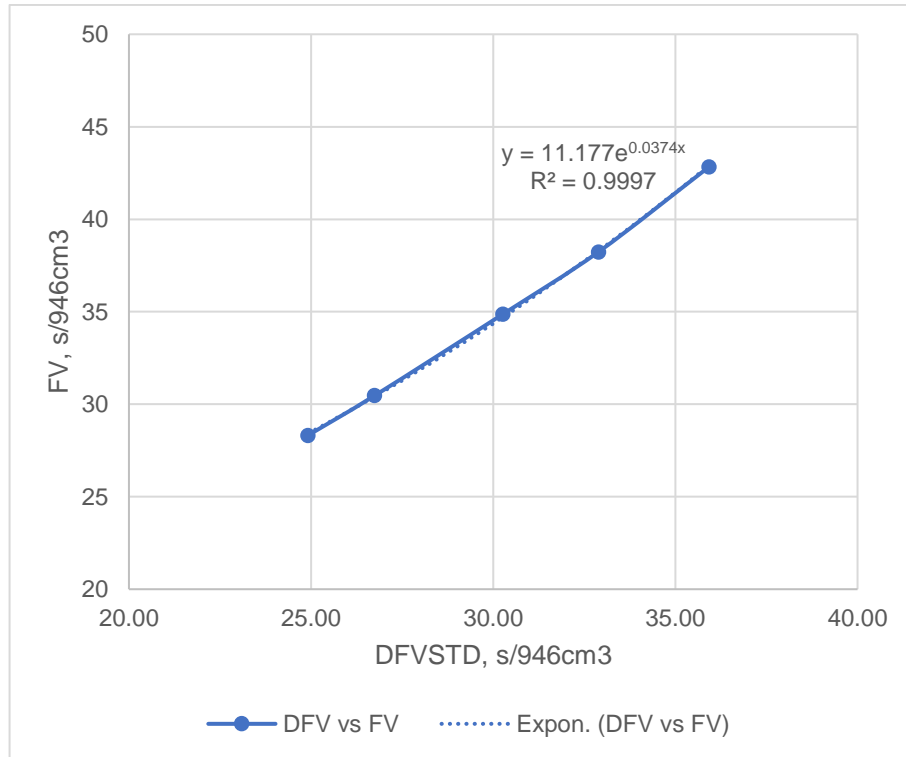


Figura 4. Correlación entre los promedios de la viscosidad de embudo y viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar a una densidad de 1.20 g/cm³

Los valores promedio de la viscosidad de embudo y viscosidad de embudo de flujo continuo corregidos a temperatura estándar para la densidad 1.20 g/cm³ tiene una relación exponencial y corresponde a la ecuación 13 con un coeficiente de regresión $R^2 = 0.9997$

Se agruparon los datos en función de la concentración de material viscosificante de los promedios de la viscosidad de embudo a temperatura estándar (FV_{STD}) y los promedios de la viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar (DFV_{STD}) para cada densidad ver figura 5, se observó tendencias diferentes de los promedios de la viscosidad de embudo y viscosidad de embudo de flujo continuo, los valores se agrupan sin importar la densidad del fluido y en algunos casos se superponen las dos curvas.

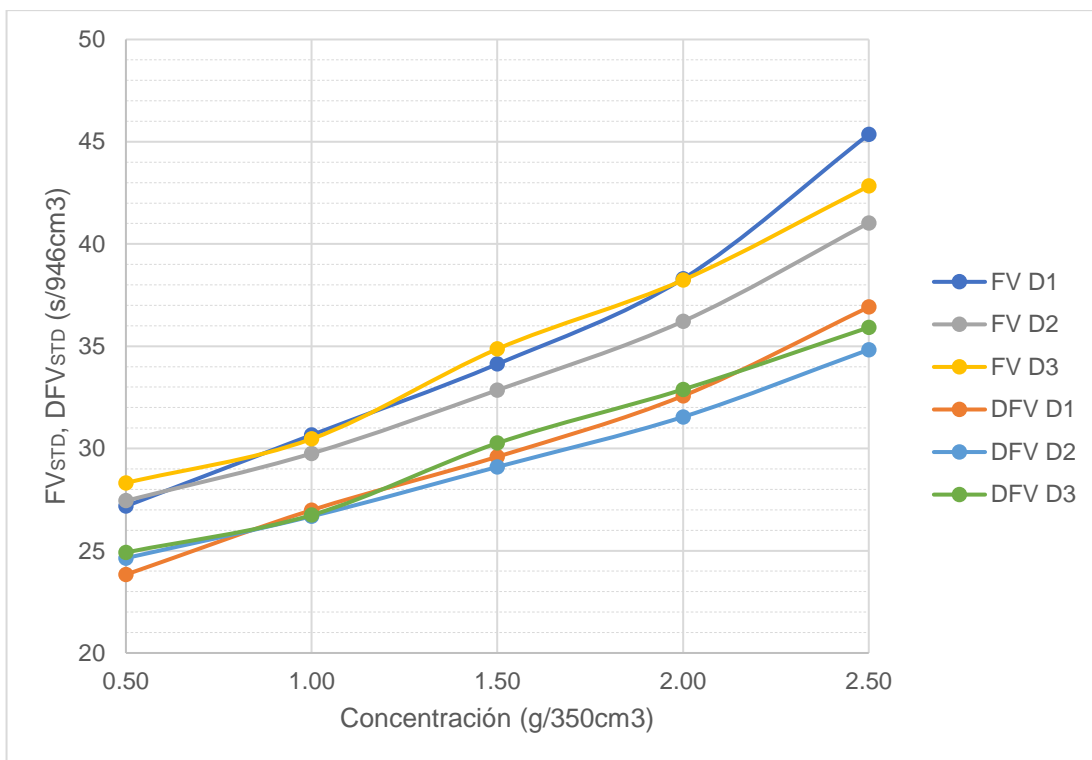


Figura 5. Promedios de viscosidad de embudo y viscosidad de embudo de flujo continuo a diferente concentración de material viscosificante y diferentes densidades D1=1.00 g/cm³, D2=1.10 g/cm³ y D3=1.20 g/cm³

La tendencia de la viscosidad de embudo o de la viscosidad de embudo de flujo continuo se incrementó a menor densidad probablemente está relacionada con la formación de espuma que influiría en el flujo del fluido a través del embudo Matsh.

Se realizó un análisis de varianza en los grupos de datos para cada concentración de material viscosificante a diferentes densidades de los promedios de la viscosidad de embudo y la viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar ver tabla 8 y tabla 9.

Tabla 8. Viscosidad de embudo a temperatura estándar para un fluido polimérico

| Concentración (g/350cm ³) | FV _{STD} (s/946 cm ³) | | |
|---------------------------------------|--|---------------------------|---------------------------|
| | 1.00 (g/cm ³) | 1.10 (g/cm ³) | 1.20 (g/cm ³) |
| 0.5 | 27.18 ± 0.22 ^a | 27.44 ± 0.29 ^a | 28.31 ± 0.28 ^b |
| 1.0 | 30.66 ± 0.42 ^a | 29.76 ± 0.30 ^b | 30.47 ± 0.08 ^a |
| 1.5 | 34.13 ± 0.07 ^a | 32.86 ± 0.19 ^b | 34.87 ± 0.08 ^c |
| 2.0 | 38.29 ± 0.38 ^a | 36.22 ± 0.32 ^b | 38.23 ± 0.16 ^a |
| 2.5 | 45.36 ± 0.24 ^a | 41.03 ± 0.24 ^b | 42.83 ± 0.24 ^c |

Diferentes letras en la misma fila significan que hay diferencia significativa estadísticamente

Tabla 9. Viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar para un fluido polimérico

| Concentración (g/350cm ³) | DFV _{STD} (s/946 cm ³) | | |
|--|--|---------------------------|---------------------------|
| | 1.00 (g/cm ³) | 1.10 (g/cm ³) | 1.20 (g/cm ³) |
| 0.5 | 23.83 ± 0.17 ^a | 24.64 ± 0.33 ^b | 24.92 ± 0.23 ^b |
| 1.0 | 26.98 ± 0.15 ^a | 26.69 ± 0.44 ^a | 26.75 ± 0.19 ^a |
| 1.5 | 29.60 ± 0.06 ^a | 29.09 ± 0.27 ^b | 30.26 ± 0.05 ^c |
| 2.0 | 32.57 ± 0.62 ^a | 31.54 ± 0.15 ^b | 32.89 ± 0.07 ^a |
| 2.5 | 36.92 ± 0.30 ^a | 34.83 ± 0.02 ^b | 35.92 ± 0.14 ^c |

Diferentes letras en la misma fila significan que hay diferencia significativa estadísticamente

Varios promedios de viscosidad de embudo a temperatura estándar y viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar para la misma concentración de material viscosificante con diferente densidad no tienen diferencia significativa lo que probablemente la densidad no afecta la relación entre las dos propiedades.

Se ordenó en orden descendente todos los promedios de viscosidad de embudo y viscosidad de embudo de flujo continuo en la tabla 10.

Tabla 10. Resumen de viscosidad de embudo, viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar para cualquier densidad y cualquier concentración

| Densidad (g/cm ³) | Concentración (g/350 cm ³) | DFV _{STD} (s/946 cm ³) | FV _{STD} (s/946 cm ³) |
|----------------------------------|---|--|---|
| 1.00 | 0.00 | 21.22 | 24.36 |
| 1.00 | 0.50 | 23.83 | 27.18 |
| 1.10 | 0.50 | 24.64 | 27.44 |
| 1.20 | 0.50 | 24.92 | 28.31 |
| 1.10 | 1.00 | 26.69 | 29.76 |
| 1.20 | 1.00 | 26.75 | 30.47 |
| 1.00 | 1.00 | 26.98 | 30.66 |
| 1.10 | 1.50 | 29.09 | 32.86 |
| 1.00 | 1.50 | 29.60 | 34.13 |
| 1.20 | 1.50 | 30.26 | 34.87 |
| 1.10 | 2.00 | 31.54 | 36.22 |
| 1.00 | 2.00 | 32.57 | 38.30 |
| 1.20 | 2.00 | 32.89 | 38.23 |
| 1.10 | 2.50 | 34.83 | 41.03 |
| 1.20 | 2.50 | 35.92 | 42.83 |
| 1.00 | 2.50 | 36.92 | 45.36 |

Todos los valores son un promedio de una muestra n=10

La correlación entre los promedios de la viscosidad de embudo a temperatura estándar (FV_{STD}) y los promedios de la viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar (DFV_{STD}) sin considerar la densidad ni la concentración de material viscosificante y utilizando todos los datos obtenidos presentados en la tabla 8, se presentan en la figura 6 con la ecuación 14.

$$FV_{STD} = 10.675 * e^{(0.0389 * DFV_{STD})} \quad [14]$$

Donde:

FV_{STD} = Viscosidad de embudo a temperatura estándar (s/946 cm³)

DFV_{STD} = Viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar (s/946 cm³)

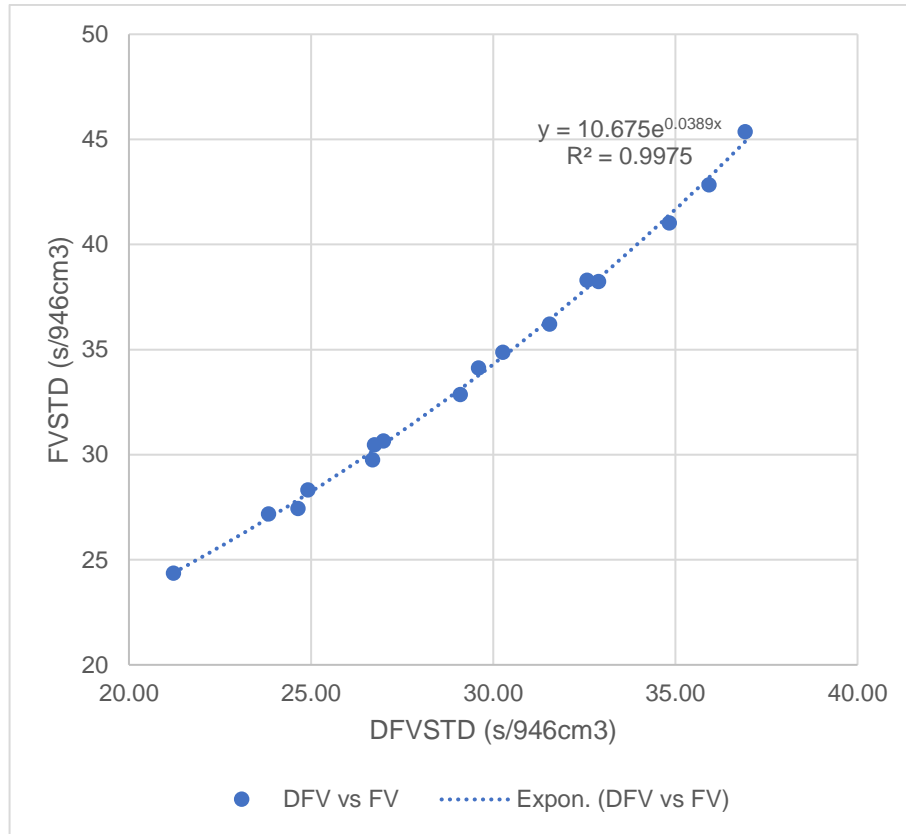


Figura 6. Correlación entre los promedios de la viscosidad de embudo y viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar sin considerar la densidad

Los valores promedio de la viscosidad de embudo y viscosidad de embudo de flujo continuo corregidos a temperatura estándar a cualquier densidad tiene una relación exponencial y corresponde a la ecuación 14 con un coeficiente de regresión $R^2 = 0.9975$.

En la figura 7 se presenta la correlación lineal ecuación 15 y la correlación exponencial ecuación 16 entre todos los datos de la viscosidad de embudo a temperatura estándar (FV_{STD}) y la viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar (DFV_{STD}) sin considerar la densidad ni la concentración de material viscosificante utilizando todos los datos obtenidos presentados en la tabla 38 del anexo 3.

$$FV_{STD} = 1.3147 * DFV_{STD} - 4.6312 \quad [15]$$

$$FV_{STD} = 10.705 * e^{(0.0388 * DFV_{STD})} \quad [16]$$

Donde:

FV_{STD} = Viscosidad de embudo a temperatura estándar (s/946 cm³)

DFV_{STD} = Viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar (s/946 cm³)

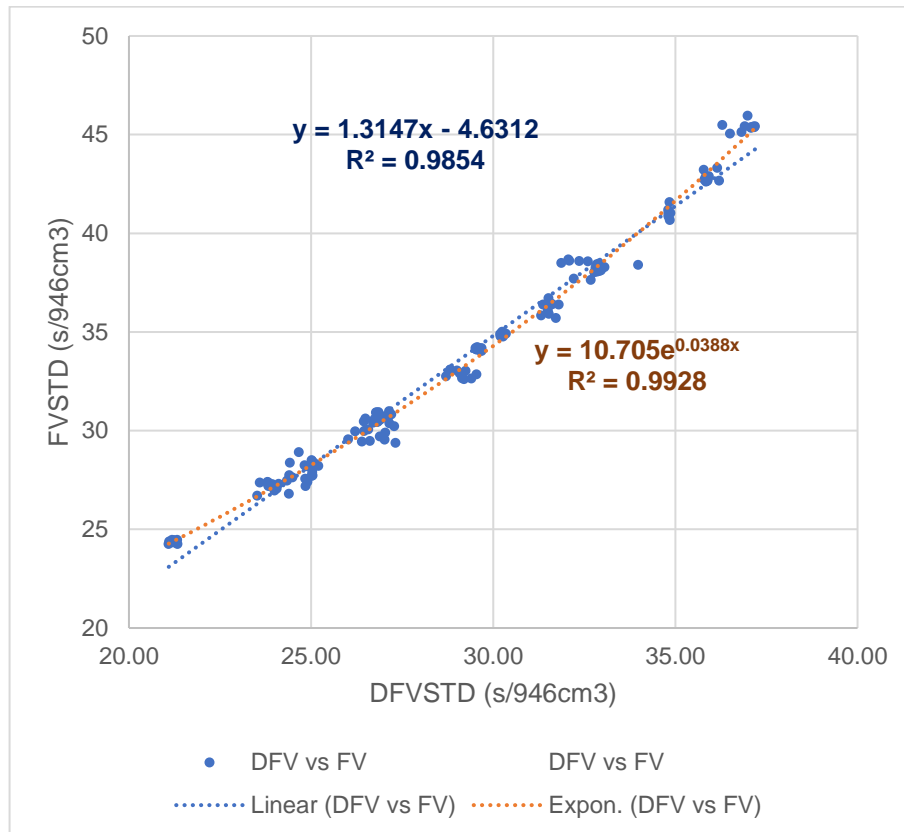


Figura 7. Dispersión, correlación lineal y correlación exponencial entre los valores de viscosidad de embudo y viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar

La relación entre la viscosidad de embudo y la viscosidad de embudo de flujo continuo es más cercana a un comportamiento exponencial que a un comportamiento lineal.

En la figura 8 se presenta la correlación exponencial ecuación 16 entre todos los datos de la viscosidad de embudo a temperatura estándar (FV_{STD}) y la viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar (DFV_{STD}) utilizando todos los datos obtenidos presentados en la tabla 38 del anexo 3, ya que tiene el mayor coeficiente de correlación y la dispersión de puntos se adapta mejor a una correlación exponencial.

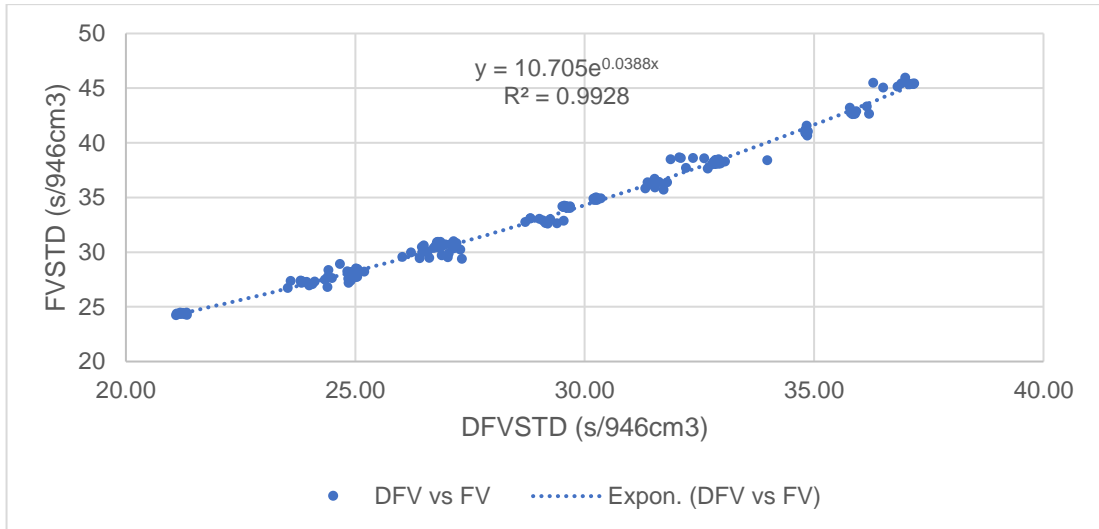


Figura 8. Dispersión y correlación exponencial entre los valores de viscosidad de embudo y viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar sin considerar la densidad

En la figura 9 se presenta la ecuación 16 y la ecuación 14 de correlación entre todos los datos de la viscosidad de embudo a temperatura estándar (FV_{STD}) y la viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar (DFV_{STD}) y la correlación de los promedios.

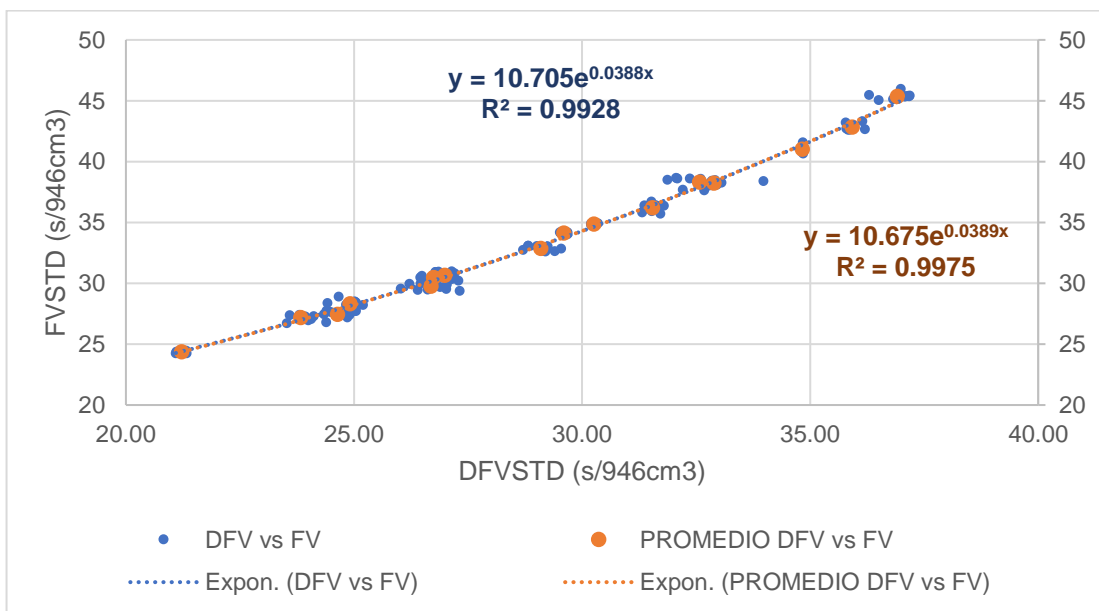


Figura 9. En azul la dispersión y correlación entre los valores de viscosidad de embudo y viscosidad de embudo de flujo continuo y en naranja la dispersión y correlación entre los promedios de viscosidad de embudo y viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar sin considerar la densidad

Al utilizar los promedios de 10 medidas para cada condición mejora el coeficiente de correlación obteniendo mejores predicciones al usar la ecuación 14.

Se encontró una relación matemática y estadística entre el promedio de la viscosidad de embudo a temperatura estándar y el promedio de la viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar con una correlación exponencial con un coeficiente de correlación $R^2 = 0.9975$.

3.3.2. INTERVALOS DE CONFIANZA PARA LA VISCOSIDAD DE EMBUDO Y VISCOSIDAD DE EMBUDO DE FLUJO CONTINUO

Utilizando los datos originales de las tablas del anexo 2 se calcula los intervalos de confianza para la viscosidad de embudo tabla 12 y viscosidad de embudo de flujo continuo a una temperatura promedio tabla 13. Para todos los cálculos se consideró los datos estadísticos presentados en la tabla 11.

Tabla 11. Datos estadísticos necesarios para el cálculo de los intervalos de confianza

| Parámetro | Notación | Valor |
|---|----------------|-------|
| Tamaño de la muestra | N | 10 |
| Nivel de significancia | A | 0.05 |
| Probabilidad acumulada para un valor de $t=0.975$ en una distribución t-student | $P(t_{0.975})$ | 2.262 |
| Factor de cobertura | K | 2 |
| Grados de libertad | GL | 9 |

Tabla 12. Intervalos de confianza para una distribución t-student $n=10$, $\alpha=0.05$ de los promedios de viscosidad de embudo a una temperatura promedio

| Densidad (g/cm ³) | Conc. (g/350cm ³) | FV (s/946cm ³) | IC _{FV} (s/946cm ³) | IC _{FV} (%) | S _{FV} | T (°C) | IC _T (°C) |
|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------|--|----------------------|-----------------|--------|----------------------|
| 1.00 | 0.00 | 26.81 | ± 0.07 | ± 0.25% | 0.08833 | 19.43 | ± 0.54 |
| 1.00 | 0.50 | 28.75 | ± 0.15 | ± 0.53% | 0.20289 | 31.26 | ± 0.46 |
| 1.00 | 1.00 | 32.38 | ± 0.34 | ± 1.05% | 0.44900 | 31.77 | ± 0.16 |
| 1.00 | 1.50 | 36.10 | ± 0.05 | ± 0.14% | 0.06891 | 31.28 | ± 0.08 |
| 1.00 | 2.00 | 40.35 | ± 0.30 | ± 0.75% | 0.40358 | 32.52 | ± 0.14 |
| 1.00 | 2.50 | 47.94 | ± 0.18 | ± 0.39% | 0.24507 | 31.77 | ± 0.15 |
| 1.10 | 0.50 | 29.57 | ± 0.24 | ± 0.81% | 0.31625 | 25.76 | ± 0.08 |
| 1.10 | 1.00 | 31.92 | ± 0.23 | ± 0.73% | 0.31032 | 27.04 | ± 0.11 |
| 1.10 | 1.50 | 34.76 | ± 0.14 | ± 0.41% | 0.19099 | 31.25 | ± 0.10 |
| 1.10 | 2.00 | 37.91 | ± 0.26 | ± 0.68% | 0.34379 | 34.54 | ± 0.11 |
| 1.10 | 2.50 | 42.72 | ± 0.18 | ± 0.43% | 0.24479 | 36.16 | ± 0.14 |
| 1.20 | 0.50 | 29.76 | ± 0.22 | ± 0.73% | 0.28834 | 33.24 | ± 0.11 |
| 1.20 | 1.00 | 32.06 | ± 0.07 | ± 0.20% | 0.08637 | 32.91 | ± 0.07 |
| 1.20 | 1.50 | 36.75 | ± 0.06 | ± 0.17% | 0.08374 | 32.42 | ± 0.08 |
| 1.20 | 2.00 | 40.12 | ± 0.13 | ± 0.32% | 0.17113 | 33.72 | ± 0.07 |
| 1.20 | 2.50 | 44.66 | ± 0.12 | ± 0.28% | 0.16441 | 35.68 | ± 0.48 |

Nota Esta tabla es el resumen de todos los datos para determinar la viscosidad de embudo promedio con su error a una temperatura promedio. FV = Viscosidad de embudo promedio, T = Temperatura promedio, IC = Intervalo de confianza o Error, S = Desviación estándar

Los valores de viscosidad de embudo de la tabla 12 se midieron con un intervalo de confianza máximo de $\pm 1.05\%$ para un nivel de significancia de 0.05 la distribución t-student.

Tabla 13. Intervalos de confianza para una distribución t-student $n=10$, $\alpha=0.05$ de los promedios de viscosidad de embudo de flujo continuo a una temperatura promedio

| Densidad (g/cm ³) | Conc. (g/350cm ³) | DFV (s/946cm ³) | IC _{DFV} (s/946cm ³) | IC _{DFV} (%) | S _{DFV} | T (°C) | IC _T (°C) |
|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--|--------------------------|------------------|-----------|-------------------------|
| 1.00 | 0.00 | 23.34 | ± 0.08 | $\pm 0.32\%$ | 0.09953 | 19.60 | ± 0.42 |
| 1.00 | 0.50 | 25.18 | ± 0.14 | $\pm 0.55\%$ | 0.18286 | 31.71 | ± 0.17 |
| 1.00 | 1.00 | 28.50 | ± 0.12 | $\pm 0.40\%$ | 0.15302 | 31.75 | ± 0.07 |
| 1.00 | 1.50 | 31.31 | ± 0.04 | $\pm 0.13\%$ | 0.05345 | 31.28 | ± 0.09 |
| 1.00 | 2.00 | 34.30 | ± 0.50 | $\pm 1.46\%$ | 0.66380 | 32.72 | ± 0.20 |
| 1.00 | 2.50 | 38.99 | ± 0.24 | $\pm 0.62\%$ | 0.31862 | 31.77 | ± 0.10 |
| 1.10 | 0.50 | 26.55 | ± 0.26 | $\pm 0.99\%$ | 0.34825 | 25.76 | ± 0.16 |
| 1.10 | 1.00 | 28.63 | ± 0.35 | $\pm 1.23\%$ | 0.46675 | 27.04 | ± 0.11 |
| 1.10 | 1.50 | 30.79 | ± 0.22 | $\pm 0.70\%$ | 0.28630 | 31.25 | ± 0.10 |
| 1.10 | 2.00 | 33.16 | ± 0.12 | $\pm 0.35\%$ | 0.15393 | 34.54 | ± 0.11 |
| 1.10 | 2.50 | 36.27 | ± 0.08 | $\pm 0.22\%$ | 0.10469 | 36.16 | ± 0.12 |
| 1.20 | 0.50 | 26.19 | ± 0.19 | $\pm 0.72\%$ | 0.24843 | 33.24 | ± 0.13 |
| 1.20 | 1.00 | 28.15 | ± 0.14 | $\pm 0.51\%$ | 0.19177 | 32.91 | ± 0.10 |
| 1.20 | 1.50 | 31.89 | ± 0.03 | $\pm 0.10\%$ | 0.04408 | 32.42 | ± 0.10 |
| 1.20 | 2.00 | 34.51 | ± 0.04 | $\pm 0.11\%$ | 0.05054 | 33.72 | ± 0.18 |
| 1.20 | 2.50 | 37.46 | ± 0.08 | $\pm 0.22\%$ | 0.11145 | 35.68 | ± 0.24 |

Nota Esta tabla es el resumen de todos los datos para determinar la viscosidad de embudo de flujo continuo promedio con su error a una temperatura promedio
 DFV = Viscosidad de embudo de flujo continuo, T = Temperatura, IC = Intervalo de confianza o Error, S = Desviación estándar

Los valores de viscosidad de embudo de flujo continuo de la tabla 11 se midieron con un intervalo de confianza máximo de $\pm 1.46\%$ para un nivel de confianza del 95% de la distribución t-student.

3.3.3. INCERTIDUMBRE PARA LA VISCOSIDAD DE EMBUDO Y VISCOSIDAD DE EMBUDO DE FLUJO CONTINUO

Se identificó las variables de contribución con el método de espina de pescado figura 10.

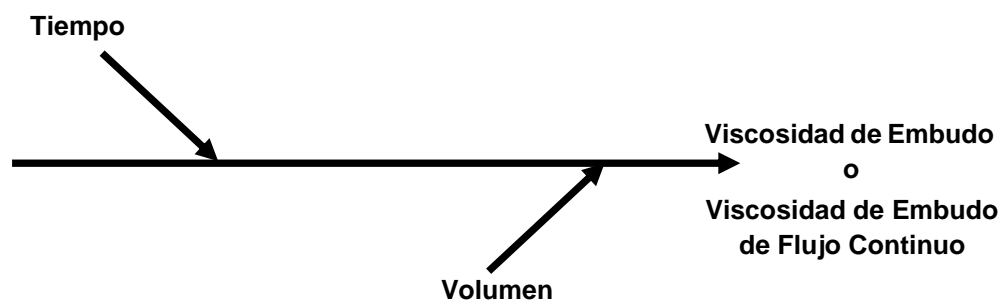


Figura 10. Identificación de las variables de contribución a la incertidumbre de la medida de la viscosidad de embudo y a la viscosidad de embudo de flujo continuo

Las incertidumbres se calcularon con la información del certificado de calibración de los equipos utilizados para medir la viscosidad de embudo y la viscosidad de embudo de flujo continuo ver tabla 14.

Tabla 14. Información del certificado de calibración de los equipos utilizados

| Equipo | Apreciación | Tolerancia | U _{calibración} |
|------------|--------------------|-------------------|--------------------------|
| Cronómetro | 0.01 s | 0.9 s | 0.130 |
| Probeta | 10 cm ³ | 5 cm ³ | 0.783 |

Ucalibración = Es la desviación estándar de la calibración

Los coeficientes de sensibilidad del tiempo y el volumen de la viscosidad de embudo se calcularon en la tabla 15, al obtener las derivadas parciales de la ecuación 10 con respecto al tiempo ecuación 17 y con respecto al volumen ecuación 18, lo mismo se calculó para la viscosidad en embudo de flujo continuo en la tabla 17.

$$C_t = \frac{\partial(FV)}{\partial t} = \frac{946}{\overline{vol}} \quad [17]$$

Donde:

C_t = Coeficiente de sensibilidad del tiempo
 FV = Viscosidad de embudo (s/946 cm³)
 \overline{vol} = Volumen promedio (cm³)

$$C_{vol} = \frac{\partial(FV)}{\partial vol} = -946 \frac{\bar{t}}{vol^2} \quad [18]$$

Donde:

C_{vol} = Coeficiente de sensibilidad del volumen
 FV = Viscosidad de embudo (s/946 cm³)
 \overline{vol} = Volumen promedio (cm³)
 \bar{t} = Tiempo promedio (s)

El tiempo promedio y el volumen promedio ver en las tablas del anexo 2

La incertidumbre expandida de la viscosidad de embudo se calculó en la tabla 16 y para la viscosidad de embudo de flujo continuo en la tabla 18.

Tabla 15. Incertidumbre y coeficiente de sensibilidad del tiempo y del volumen de la viscosidad de embudo

| Densidad (g/cm ³) | Conc. (g/350cm ³) | ut (s) | u _{vol} (946cm ³) | Ct | C _{vol} | uA (s/946cm ³) |
|-------------------------------|-------------------------------|--------|--|--------|------------------|----------------------------|
| 1.00 | 0.00 | 0.2678 | 0.0034 | 1.0064 | 1.3333 | 0.0279 |
| 1.00 | 0.50 | 0.2678 | 0.0034 | 1.0064 | 1.1590 | 0.0642 |
| 1.00 | 1.00 | 0.2678 | 0.0034 | 0.9854 | 0.8761 | 0.1420 |
| 1.00 | 1.50 | 0.2678 | 0.0034 | 0.9653 | 0.6763 | 0.0218 |
| 1.00 | 2.00 | 0.2678 | 0.0034 | 1.0570 | 0.6492 | 0.1276 |
| 1.00 | 2.50 | 0.2678 | 0.0034 | 1.0064 | 0.4175 | 0.0775 |
| 1.10 | 0.50 | 0.2678 | 0.0034 | 0.9653 | 1.0083 | 0.1000 |
| 1.10 | 1.00 | 0.2678 | 0.0034 | 0.9653 | 0.8650 | 0.0981 |
| 1.10 | 1.50 | 0.2678 | 0.0034 | 0.9556 | 0.7149 | 0.0604 |
| 1.10 | 2.00 | 0.2678 | 0.0034 | 0.9753 | 0.6262 | 0.1087 |
| 1.10 | 2.50 | 0.2678 | 0.0034 | 0.9653 | 0.4831 | 0.0774 |
| 1.20 | 0.50 | 0.2678 | 0.0034 | 0.9653 | 0.9951 | 0.0912 |
| 1.20 | 1.00 | 0.2678 | 0.0034 | 0.9556 | 0.8404 | 0.0273 |
| 1.20 | 1.50 | 0.2678 | 0.0034 | 0.9653 | 0.6529 | 0.0265 |
| 1.20 | 2.00 | 0.2678 | 0.0034 | 0.9556 | 0.5365 | 0.0541 |
| 1.20 | 2.50 | 0.2678 | 0.0034 | 0.9854 | 0.4605 | 0.0520 |

ut = Incertidumbre del tiempo, u_{vol} = incertidumbre del volumen, Ct = Coeficiente de sensibilidad del tiempo, C_{vol} = Coeficiente de sensibilidad del volumen, uA = Incertidumbre tipo A

Tabla 16. Incertidumbre de la viscosidad de embudo

| Densidad (g/cm ³) | Conc. (g/350cm ³) | FV (s/946cm ³) | u mm (s/946cm ³) | u m (s/946cm ³) | U exp (s/946cm ³) | %U exp (%) |
|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------|------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------|
| 1.00 | 0.00 | 26.81 | 0.2696 | 0.2710 | ± 0.5420 | ± 2.02% |
| 1.00 | 0.50 | 28.75 | 0.2696 | 0.2771 | ± 0.5542 | ± 1.93% |
| 1.00 | 1.00 | 32.38 | 0.2639 | 0.2997 | ± 0.5994 | ± 1.85% |
| 1.00 | 1.50 | 36.10 | 0.2585 | 0.2595 | ± 0.5189 | ± 1.44% |
| 1.00 | 2.00 | 40.35 | 0.2831 | 0.3105 | ± 0.6211 | ± 1.54% |
| 1.00 | 2.50 | 47.94 | 0.2695 | 0.2805 | ± 0.5609 | ± 1.17% |
| 1.10 | 0.50 | 29.57 | 0.2586 | 0.2772 | ± 0.5545 | ± 1.88% |
| 1.10 | 1.00 | 31.92 | 0.2586 | 0.2766 | ± 0.5531 | ± 1.73% |
| 1.10 | 1.50 | 34.76 | 0.2559 | 0.2630 | ± 0.5259 | ± 1.51% |
| 1.10 | 2.00 | 37.91 | 0.2612 | 0.2829 | ± 0.5659 | ± 1.49% |
| 1.10 | 2.50 | 42.72 | 0.2585 | 0.2699 | ± 0.5398 | ± 1.26% |
| 1.20 | 0.50 | 29.76 | 0.2586 | 0.2742 | ± 0.5483 | ± 1.84% |
| 1.20 | 1.00 | 32.06 | 0.2559 | 0.2574 | ± 0.5148 | ± 1.61% |
| 1.20 | 1.50 | 36.75 | 0.2585 | 0.2599 | ± 0.5198 | ± 1.41% |
| 1.20 | 2.00 | 40.12 | 0.2559 | 0.2616 | ± 0.5232 | ± 1.30% |
| 1.20 | 2.50 | 44.66 | 0.2639 | 0.2690 | ± 0.5380 | ± 1.20% |

u mm = Incertidumbre del modelo matemático, u m = Incertidumbre del método y U_{EXP} = Incertidumbre expandida para K=2

Los valores de viscosidad de embudo obtenida con el método estándar y utilizando los equipos disponibles tiene una incertidumbre extendida máxima de ± 2.02 % para una muestra n = 10 y k = 2.

Tabla 17. Incertidumbre y coeficiente de sensibilidad del tiempo y del volumen de la viscosidad de embudo de flujo continuo

| Densidad (g/cm ³) | Conc. (g/350cm ³) | ut (s) | u _{vol} (946cm ³) | C _t | C _{vol} | u _A (s/946cm ³) |
|-------------------------------|-------------------------------|--------|--|----------------|------------------|--|
| 1.00 | 0.00 | 0.2678 | 0.0034 | 1.0064 | 1.7589 | 0.0315 |
| 1.00 | 0.50 | 0.2678 | 0.0034 | 1.0172 | 1.5444 | 0.0578 |
| 1.00 | 1.00 | 0.2678 | 0.0034 | 1.0172 | 1.2049 | 0.0484 |
| 1.00 | 1.50 | 0.2678 | 0.0034 | 0.9508 | 0.8724 | 0.0169 |
| 1.00 | 2.00 | 0.2678 | 0.0034 | 1.0172 | 0.8322 | 0.2099 |
| 1.00 | 2.50 | 0.2678 | 0.0034 | 1.0570 | 0.6954 | 0.1008 |
| 1.10 | 0.50 | 0.2678 | 0.0034 | 0.9653 | 1.2509 | 0.1101 |
| 1.10 | 1.00 | 0.2678 | 0.0034 | 1.0011 | 1.1569 | 0.1476 |
| 1.10 | 1.50 | 0.2678 | 0.0034 | 0.9753 | 0.9495 | 0.0905 |
| 1.10 | 2.00 | 0.2678 | 0.0034 | 0.9604 | 0.7934 | 0.0487 |
| 1.10 | 2.50 | 0.2678 | 0.0034 | 0.9854 | 0.6985 | 0.0331 |
| 1.20 | 0.50 | 0.2678 | 0.0034 | 0.9653 | 1.2855 | 0.0786 |
| 1.20 | 1.00 | 0.2678 | 0.0034 | 0.9753 | 1.1362 | 0.0606 |
| 1.20 | 1.50 | 0.2678 | 0.0034 | 0.9753 | 0.8847 | 0.0139 |
| 1.20 | 2.00 | 0.2678 | 0.0034 | 0.9556 | 0.7252 | 0.0160 |
| 1.20 | 2.50 | 0.2678 | 0.0034 | 0.9556 | 0.6157 | 0.0352 |

ut = Incertidumbre del tiempo, u_{vol} = incertidumbre del volumen, C_t = Coeficiente de sensibilidad del tiempo, C_{vol} = Coeficiente de sensibilidad del volumen, u_A = Incertidumbre tipo A

Tabla 18. Incertidumbre de la viscosidad de embudo de flujo continuo

| Densidad (g/cm ³) | Conc. (g/350cm ³) | DFV (s/946cm ³) | u _{mm} (s/946cm ³) | u _m (s/946cm ³) | U _{exp} (s/946cm ³) | %U _{exp} (%) |
|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|---|--|--|-----------------------|
| 1.00 | 0.00 | 23.34 | 0.2696 | 0.2714 | ± 0.5429 | ± 2.33% |
| 1.00 | 0.50 | 25.18 | 0.2725 | 0.2786 | ± 0.5571 | ± 2.21% |
| 1.00 | 1.00 | 28.50 | 0.2725 | 0.2767 | ± 0.5535 | ± 1.94% |
| 1.00 | 1.50 | 31.31 | 0.2547 | 0.2552 | ± 0.5104 | ± 1.63% |
| 1.00 | 2.00 | 34.30 | 0.2725 | 0.3439 | ± 0.6879 | ± 2.01% |
| 1.00 | 2.50 | 38.99 | 0.2831 | 0.3005 | ± 0.6010 | ± 1.54% |
| 1.10 | 0.50 | 26.55 | 0.2586 | 0.2810 | ± 0.5621 | ± 2.12% |
| 1.10 | 1.00 | 28.63 | 0.2681 | 0.3061 | ± 0.6122 | ± 2.14% |
| 1.10 | 1.50 | 30.79 | 0.2612 | 0.2765 | ± 0.5529 | ± 1.80% |
| 1.10 | 2.00 | 33.16 | 0.2572 | 0.2618 | ± 0.5236 | ± 1.58% |
| 1.10 | 2.50 | 36.27 | 0.2639 | 0.2660 | ± 0.5320 | ± 1.47% |
| 1.20 | 0.50 | 26.19 | 0.2586 | 0.2702 | ± 0.5405 | ± 2.06% |
| 1.20 | 1.00 | 28.15 | 0.2612 | 0.2682 | ± 0.5364 | ± 1.91% |
| 1.20 | 1.50 | 31.89 | 0.2612 | 0.2616 | ± 0.5232 | ± 1.64% |
| 1.20 | 2.00 | 34.51 | 0.2559 | 0.2564 | ± 0.5129 | ± 1.49% |
| 1.20 | 2.50 | 37.46 | 0.2559 | 0.2584 | ± 0.5167 | ± 1.38% |

u_{mm} = Incertidumbre del modelo matemático, u_m = Incertidumbre del método y U_{EXP} = Incertidumbre expandida para K=2

Los valores de viscosidad de embudo obtenida con el método estándar y utilizando los equipos disponibles tiene una incertidumbre extendida máxima de ± 2.33 % para una muestra n = 10 y k = 2.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

Se construyó un equipo con las siguientes características: tiene la capacidad de almacenamiento de 20000 cm³, trabaja con una temperatura entre 15 y 40 °C, mide la viscosidad de embudo entre 26.81 y 47.94 s/946cm³ y tiene sensores de temperatura, tensión y caudal.

La viscosidad de embudo de flujo continuo se determinó entre los siguientes valores de 23.34 a 38.99 s/946cm³, y la viscosidad de embudo entre 26.81 a 47.94 s/946cm³, la construcción del equipo permitió mantener la altura del nivel constante del fluido por lo que los tiempos de medida de la viscosidad de embudo de flujo continuo son menores a los tiempos de la viscosidad de embudo.

Se encontró una correlación exponencial entre la viscosidad de embudo a temperatura estándar $V_{F_{STD}}$ y la viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar DFV_{STD} , el modelo matemático tiene un factor de correlación de $R^2 = 0.9975$.

Los promedios de la viscosidad de embudo (FV) y viscosidad de embudo de flujo continuo (DFV) se midieron con un intervalo de confianza máximo de ± 1.05 y 1.46 % respectivamente para un nivel de significancia 0.05 de la distribución t-student y por los instrumentos de medida utilizados, el modelo matemático y el método para obtener estos valores, la incertidumbre expandida máxima fue de ± 2.02 y 2.33% respectivamente, mismos que son menores al nivel de significancia.

4.2. RECOMENDACIONES

Obtener propiedades reológicas como la viscosidad plástica y el punto cedente o las lecturas del reómetro a partir de la viscosidad de embudo de flujo continuo y la densidad del fluido.

Modificar el equipo para medir una viscosidad aparente en otros fluidos de diferentes industrias como leche, yogurt, miel, jugos, aceites, lechadas de cemento, etc.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- Abdelgawad, K., Elkatatny, S., Mousa, T., Mahmoud, M., & Patil, S. (2018). *Real Time Determination of Rheological Properties of Spud Drilling Fluids Using a Hybrid Artificial Intelligence Technique*. Paper presented at the SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition, Dammam, Saudi Arabia. <https://doi.org/10.2118/192257-MS>
- Al-Azani, K., Elkatatny, S., Abdulraheem, A., Mahmoud, M., & Al-Shehri, D. (2018). *Real Time Prediction of the Rheological Properties of Oil-Based Drilling Fluids Using Artificial Neural Networks*. Paper presented at the SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition, Dammam, Saudi Arabia. <https://doi.org/10.2118/192199-MS>
- Al-Hameedi, A. T., Alkinani, H. H., Dunn-Norman, S., Alkhamis, M. M., Alshammari, A. F., Al-Alwani, M. A., & Mutar, R. A. (2019). *Controlling Drilling Fluid Properties Using Bio-Degradable Environmental Friendly Additives: Comparison Between Conventional Chemical (PAC-LV) and Eco-Friendly Drilling Fluid Additives*. Paper presented at the 53rd U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, New York City, New York. <https://doi.org/>
- Almahdawi, F. H. M., Al-Yaseri, A. Z., & Jasim, N. (2014). Apparent Viscosity Direct from Marsh Funnel Test. *Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering*, 15, 51-57.
- Amani, M., & Al-jubouri, M. J. (2012). *An Experimental Investigation of the The Effects of Ultra High Pressures and Temperatures on the Rheological Properties of Water-Based Drilling Fluids*. Paper presented at the International Conference on Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production, Perth, Australia. <https://doi.org/10.2118/157219-MS>
- American Petroleum Institute. (2001). Manual de fluidos de perforación. *Energy API*.
- American Petroleum Institute. (2019). API RT 13B-1 Recommended Practice for Field Testing Water-based Drilling Fluids *5th Edition*.
- ASTM. (2015). ASTM D3195 - Standard Practice for Rotameter Calibration. *AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS*.
- AVIA-Semiconductor. (2018). HX711 24 bits Analog to Digital Converter (ADC) for Weigh Scales Manual.
- Bland, R. G., Reeve, J. W., & McNair, G. A. (2001). *Rotary Steerable Drilling Fluid*. Paper presented at the SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Jakarta, Indonesia. <https://doi.org/10.2118/68670-MS>
- Castillo Aguilar, B., & González Hernández, R. (1996). Protocolo de validación de métodos analíticos para la cuantificación de fármacos. *Revista Cubana de Farmacia*.
- De la Torre Ramos, E., & Ramos Rodríguez, H. (2017). *Manual de Perforación de Pozos Petrolíferos*.
- Elkatatny, S., & Mahmoud, M. (2017). *Real Time prediction of the Rheological Parameters of NaCl Water-Based Drilling Fluid Using Artificial Neural Networks*. Paper presented at the SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition, Dammam, Saudi Arabia. <https://doi.org/10.2118/187976-MS>

- Elkakatny, S., Mousa, T., & Mahmoud, M. (2018). *A New Approach to Determine the Rheology Parameters for Water-Based Drilling Fluid Using Artificial Neural Network*. Paper presented at the SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition, Dammam, Saudi Arabia. <https://doi.org/10.2118/192190-MS>
- Eurolab, & Morilla, P. P. (2016). *La Adecuación al Uso de los Métodos Analíticos - Una Guía de Laboratorio para Validación de Métodos y Temas Relacionados*.
- Guria, C., Kumar, R., & Mishra, P. (2013). Rheological analysis of drilling fluid using Marsh Funnel. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, *105*, 62–69. doi: 10.1016/j.petrol.2013.03.027
- Hestad, V., & Gulbrandsen, A. (2018). *Drilling Fluids Automix*. Paper presented at the SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition, Abu Dhabi, UAE. <https://doi.org/10.2118/189344-MS>
- Marsh, H. N. (1931). Properties and Treatment of Rotary Mud. *Transactions of the AIME*, *92*(01), 234-251. doi: 10.2118/931234-G
- Martinez Vidaur, J. C. (2018). *Experimental Study of Automated Characterization of Non-Newtonian Fluids*. (Master of Science in Petroleum Engineering), Universitetet i Stavanger.
- Maxey, J. (2007). Thixotropy and Yield Stress Behavior in Drilling Fluids. *American Association of Drilling Engineers*, *7*.
- Miller, A., Minton, R. C., Colquhoun, R. L., & Ketchion, M. (2011). *The Continuous Measurement and Recording of Drilling Fluid Density & Viscosity*. Paper presented at the SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, Amsterdam, The Netherlands. <https://doi.org/10.2118/140324-MS>
- OFI Testing Equipment. (2009). Marsh Funnel Viscometer Instruction Manual
- Pitt, M. J. (2000). The Marsh Funnel and Drilling Fluid Viscosity: A New Equation for Field Use. *SPE Drill. & Completion*, *15*.
- Roy, R. L., & Roussel, N. (2005). The Marsh Cone as a viscometer: theoretical analysis and practical limits. *Materials and Structures*, *38*, 25-30.
- RuGang, Y., GuanCheng, J., Wei, L., YuZhe, W., HongXia, Z., & Jin, F. (2014). Study and Application of Permitted Yield Point Control Boundary of Drilling Fluid *The Open Petroleum Engineering Journal*, *7*, 45-49.
- Ryabtsev, P. L., Khomutov, A. Y., & Korolev, A. V. (2018). *The First Experience of Formate Based Drilling Fluids Application in Russia*. Paper presented at the SPE Russian Petroleum Technology Conference, Moscow, Russia. <https://doi.org/10.2118/191503-18RPTC-MS>
- Saasen, A., & Løklingholm, G. (2002). *The Effect of Drilling Fluid Rheological Properties on Hole Cleaning*. Paper presented at the IADC/SPE Drilling Conference, Dallas, Texas. <https://doi.org/10.2118/74558-MS>
- Sadrizadeh, S., Ghaffar, A. N., Halilovic, A., & Hokansson, U. (2017). Numerical, Experimental and Analytical Studies on Fluid Flow through a Marsh Funnel. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, *10*, 1501-1507. doi: 10.29252/jafm.73.245.27902
- Sanford, B., & Charles, B. (2004). Pharmaceutical Statistics Practical and Clinical Applications. *Drugs and the Pharmaceutical Sciences*, *135*.
- Schoesser, B., & Thewes, M. (2015). *Marsh Funnel testing for rheology analysis of bentonite slurries for Slurry Shields*.

- Sedaghat, A., Abdulsalam Ali Omar, M., Damrah, S., & Gaith, M. (2016). *Mathematical modelling of the Marsh Funnel for measuring rheological properties of drilling nanofluids for energy efficient environment*.
- Sedaghat, A., Abdulsalam, M., Omar, A., Damrah, S., & Gaith, M. (2016). *Mathematical Modelling of the Flow Rate in a Marsh Funnel* (Vol. 1).
- Spelta, A., Ciuca, A., Minelli, M., & Parrozza, F. (2017). *Real Time Mud Monitoring System Improves Drilling Efficiencies*. Paper presented at the Offshore Mediterranean Conference and Exhibition, Ravenna, Italy. <https://doi.org/>
- Spiegel, M. R., Schiller, J., & Srinivasan, R. A. (2006). *Teoría y Problemas de Probabilidad y Estadística* (McGRAW-HILL/INTERAMERICANA Ed. Segunda Edición ed.).
- Texas-Instruments. (2017). LM35 Precision Centigrade Temperature Sensor
- Wolfgang, S., & Ruben, L. (2000). *Guía para Estimar la Incertidumbre de la Medición*, Centro Nacional de Metrología México.
- YIFA-Plastics. (2016). YF-S201 Hall Effect Water Flow Meter / Sensor Manual.

ANEXOS

ANEXOS

ANEXO 1

CALIBRACIÓN DE LOS SENSORES

SENSOR DE TEMPERATURA

El sensor de temperatura se diseñó para trabajar en el intervalo de -10 °C hasta 120 °C y tiene una apreciación de 0.01 °C, no se puede calibrar, pero esta calibrado de fábrica lo que se realizó es una verificación de la lectura a dos temperaturas diferentes las cuales estuvieron dentro de la incertidumbre misma que es ± 0.25 °C (Texas-Instruments, 2017).

- Comparar la medida de temperatura del sensor y de un termómetro de referencia a una temperatura de intervalo menor y otra en el intervalo mayor.
- Si los valores no tienen una diferencia mayor a 0.25 °C el sensor no necesita corrección (Texas-Instruments, 2017).

Tabla 19. Validación de la calibración del termómetro en un intervalo bajo y un intervalo alto de temperatura

| Temperatura intervalo bajo referencia (°C) | Temperatura intervalo bajo sensor (°C) | Temperatura intervalo alto referencia (°C) | Temperatura intervalo alto sensor (°C) |
|--|--|--|--|
| 19.6 | 20.04 | 90.4 | 90.04 |
| 19.6 | 19.06 | 90.4 | 90.35 |
| 19.6 | 19.55 | 90.4 | 90.89 |
| 19.6 | 20.04 | 90.4 | 90.74 |
| 19.6 | 20.53 | 90.4 | 90.13 |
| 19.6 | 19.55 | 90.4 | 91.08 |
| 19.6 | 20.04 | 90.4 | 90.75 |
| 19.6 | 18.57 | 90.4 | 90.89 |
| 19.6 | 19.06 | 90.4 | 91.23 |
| 19.6 | 19.55 | 90.4 | 90.04 |
| 19.6 | 19.60 | 90.4 | 90.61 |

La última fila corresponde al promedio y es el mostrado en resultados

La desviación en un intervalo bajo de temperatura fue de 0 °C y la desviación en el intervalo alto fue de 0.21 °C las dos desviaciones fueron menores a la incertidumbre de 0.25 °C por este motivo el sensor esta calibrado.

SENSOR DE TENSIÓN

El sensor de tensión se calibró ya que media un voltaje que cambia proporcional de la deformación del sensor y se obtuvo el factor de correlación

que se colocó en la programación del sensor para que los valores presentados estén en la unidad de masa, el sensor queda calibrado en las unidades de medida con las cuales se realiza este proceso.

(AVIA-Semiconductor, 2018) se utilizó para mantener el nivel constante sobre embudo.

- a. Se usó la balanza para pesar una masa a un valor cercano a la masa utilizada durante las pruebas.
- b. Con el sensor se midió la tensión en diez ocasiones y obtener un promedio.
- c. Se realizó los cálculos del factor de correlación e ingresarlo en la programación del sensor por medio del micro controlador Arduino Nano (AVIA-Semiconductor, 2018).
- d. Se comprobó la medida con una masa conocida.
 - Peso conocido: Con la ayuda de una balanza calibrada se pesó una masa en el intervalo de uso del sensor y se registró.
Peso conocido = 4146 g
 - Se inició el programa para que el sensor ubique su medida en cero.
 - Se colocó sobre el sensor el peso conocido y se toma la medida del sensor en voltaje diez veces y se realiza un promedio.
Promedio Sensor = 540455.50 uV
 - Se calculó del factor de correlación: Se divide el valor promedio del sensor para el peso de la masa conocida.
Factor de correlación del sensor de tensión = 130.35588519054510371
 - Se ingresó el factor de correlación en la programación del Arduino Nano.

Tabla 20. Valores utilizados en la calibración del sensor de tensión

| Medida | Sensor (uV) | Sensor (g) |
|----------|-------------|------------|
| 1 | 540545 | 4149 |
| 2 | 540678 | 4147 |
| 3 | 540121 | 4148 |
| 4 | 540347 | 4145 |
| 5 | 540829 | 4147 |
| 6 | 540133 | 4145 |
| 7 | 540336 | 4146 |
| 8 | 540563 | 4143 |
| 9 | 540583 | 4149 |
| 10 | 540420 | 4148 |
| Promedio | 540455.5 | 4146.7 |

La última fila corresponde al promedio y es el mostrado en resultados

SENSOR DE CAUDAL

El sensor de caudal se calibró ya que originalmente mide frecuencia de pulsos generados por las hélices del mecanismo que cambia proporcional al volumen que mide y se obtuvo el factor de correlación que se colocó en la programación del sensor para que los valores estén en la unidad de caudal, el sensor quedó calibrado en las unidades de medida con las cuales se realizó este proceso. (YIFA-Plastics, 2016), se utilizó para medir la viscosidad de embudo de forma indirecta.

- a. Se circuló agua a través del sensor de caudal.
 - b. Se midió el caudal con una probeta de vidrio y un cronometro por diez ocasiones y obtener un promedio.
 - c. Se tomó las medidas de pulsos por minuto del sensor de caudal en diez ocasiones y obtener un promedio.
 - d. Se calculó el factor de correlación.
 - e. Se ingresó el factor de correlación en la programación del sensor por medio del microcontrolador Arduino Nano (YIFA-Plastics, 2016).
 - f. Se comprobó la medida con una medida de caudal con la probeta y cronómetro.
- Caudal: Se mide el caudal con una probeta de $1000 \text{ cm}^3 \pm 5 \text{ cm}^3$ y un cronometro de apreciación 0.01 s
Caudal promedio = 2.4257 l/min.
 - Pulso: Se registran diez frecuencias y se realiza un promedio
 - Pulsos: 269.8 pulsos/min
 - Se calcula el factor de correlación
 - Factor de correlación = 0.009008152137
 - Ingresar el factor de correlación en la programación del Arduino Nano.

Tabla 21. Valores utilizados en la calibración del sensor de caudal

| Medida | Volumen (cm ³) | Tiempo (s) | Caudal (l/min) |
|----------|----------------------------|------------|----------------|
| 1 | 925 | 22.88 | 2.4257 |
| 2 | 940 | 23.23 | 2.4279 |
| 3 | 935 | 23.02 | 2.4370 |
| 4 | 920 | 22.77 | 2.4242 |
| 5 | 930 | 22.99 | 2.4271 |
| 6 | 935 | 23.10 | 2.4286 |
| 7 | 930 | 22.92 | 2.4346 |
| 8 | 950 | 23.40 | 2.4359 |
| 9 | 950 | 23.46 | 2.4297 |
| 10 | 960 | 23.55 | 2.4459 |
| Promedio | 937.5 | 23.13 | 2.4517 |

La última fila corresponde al promedio y es el mostrado en resultados

ANEXO 2

CÁLCULO DE LA VISCOSIDAD DE EMBUDO Y VISCOSIDAD DE EMBUDO DE FLUJO CONTINUO

La viscosidad de embudo se calculó según la norma API RT 13B-1 Recommended Practice for Field Testing Water-based Drilling Fluids (American Petroleum Institute, 2019) y la viscosidad de embudo de flujo continuo se calculó con la ecuación 2.

La viscosidad de embudo es el tiempo necesario para llenar una jarra de un cuarto de galón o 946 cm³ con fluido de perforación o lo que es lo mismo es el inverso del caudal ver ecuación 1, se mide el caudal con una probeta de 1000 cm³ y un cronometro digital y aplicando la ecuación 2 se obtiene la viscosidad de embudo.

$$FV_T = \frac{1}{Q_T} \quad [0]$$

Donde:

FV_T = Viscosidad de embudo a cualquier temperatura en segundos por cada 946 cm³

Q_T = Caudal en cuarto de galón (946 cm³) por segundo

Tabla 22. Viscosidad de embudo, viscosidad de embudo de flujo continuo para un fluido polimérico de densidad 1.00 g/cm³ y una concentración de goma xanثica de 0.00 g/350cm³

| Viscosidad de embudo (FV) | | | | Viscosidad de embudo de flujo continuo (DFV) | | | |
|----------------------------|------------|------------------|----------------------------|--|------------|------------------|-----------------------------|
| Volumen (cm ³) | Tiempo (s) | Temperatura (°C) | FV (s/946cm ³) | Volumen (cm ³) | Tiempo (s) | Temperatura (°C) | DFV (s/946cm ³) |
| 930 | 26.48 | 19.04 | 26.94 | 930 | 22.94 | 20.04 | 23.33 |
| 940 | 26.57 | 20.06 | 26.74 | 940 | 23.18 | 19.06 | 23.33 |
| 940 | 26.62 | 19.04 | 26.79 | 930 | 23.02 | 19.55 | 23.42 |
| 940 | 26.64 | 20.53 | 26.81 | 940 | 23.12 | 20.04 | 23.27 |
| 930 | 26.45 | 19.55 | 26.91 | 930 | 22.99 | 20.53 | 23.39 |
| 940 | 26.61 | 20.04 | 26.78 | 940 | 23.08 | 19.55 | 23.23 |
| 930 | 26.44 | 18.57 | 26.89 | 930 | 22.92 | 20.04 | 23.31 |
| 950 | 26.93 | 18.06 | 26.82 | 950 | 23.65 | 18.57 | 23.55 |
| 940 | 26.6 | 19.55 | 26.77 | 950 | 23.46 | 19.06 | 23.36 |
| 960 | 27.03 | 19.89 | 26.64 | 960 | 23.55 | 19.55 | 23.21 |

Tabla 23. Viscosidad de embudo, viscosidad de embudo de flujo continuo para un fluido polimérico de densidad 1.00 g/cm³ y una concentración de goma xanítica de 0.50 g/350cm³

| Viscosidad de embudo (FV) | | | | Viscosidad de embudo de flujo continuo (DFV) | | | |
|----------------------------|------------|------------------|----------------------------|--|------------|------------------|-----------------------------|
| Volumen (cm ³) | Tiempo (s) | Temperatura (°C) | FV (s/946cm ³) | Volumen (cm ³) | Tiempo (s) | Temperatura (°C) | DFV (s/946cm ³) |
| 940 | 28.57 | 31.26 | 28.75 | 930 | 24.75 | 31.71 | 25.18 |
| 950 | 28.93 | 31.59 | 28.81 | 940 | 24.98 | 32.05 | 25.14 |
| 920 | 27.53 | 30.59 | 28.31 | 935 | 24.55 | 31.88 | 24.84 |
| 940 | 28.34 | 31.26 | 28.52 | 920 | 24.68 | 31.37 | 25.38 |
| 910 | 27.81 | 30.26 | 28.91 | 930 | 24.83 | 31.71 | 25.26 |
| 970 | 29.62 | 32.26 | 28.89 | 920 | 24.48 | 31.37 | 25.18 |
| 935 | 28.53 | 31.09 | 28.87 | 940 | 25.10 | 32.05 | 25.26 |
| 970 | 29.58 | 32.26 | 28.85 | 930 | 24.50 | 31.71 | 24.92 |
| 935 | 28.62 | 31.09 | 28.96 | 930 | 24.75 | 31.71 | 25.18 |
| 930 | 28.17 | 30.93 | 28.65 | 925 | 24.87 | 31.54 | 25.43 |

Tabla 24. Viscosidad de embudo, viscosidad de embudo de flujo continuo para un fluido polimérico de densidad 1.00 g/cm³ y una concentración de goma xanítica de 1.00 g/350cm³

| Viscosidad de embudo (FV) | | | | Viscosidad de embudo de flujo continuo (DFV) | | | |
|----------------------------|------------|------------------|----------------------------|--|------------|------------------|-----------------------------|
| Volumen (cm ³) | Tiempo (s) | Temperatura (°C) | FV (s/946cm ³) | Volumen (cm ³) | Tiempo (s) | Temperatura (°C) | DFV (s/946cm ³) |
| 960 | 31.65 | 31.79 | 31.19 | 940 | 28.35 | 31.85 | 28.53 |
| 950 | 32.45 | 31.69 | 32.31 | 950 | 28.75 | 31.79 | 28.63 |
| 955 | 32.97 | 31.87 | 32.66 | 955 | 28.63 | 31.82 | 28.36 |
| 970 | 33.53 | 31.23 | 32.70 | 920 | 27.53 | 31.55 | 28.31 |
| 970 | 33.45 | 32.03 | 32.62 | 900 | 26.94 | 31.64 | 28.32 |
| 960 | 32.89 | 31.82 | 32.41 | 925 | 27.94 | 31.87 | 28.57 |
| 980 | 33.87 | 31.99 | 32.69 | 920 | 27.89 | 31.68 | 28.68 |
| 950 | 32.68 | 31.71 | 32.54 | 930 | 28.25 | 31.78 | 28.74 |
| 955 | 32.54 | 31.89 | 32.23 | 940 | 28.22 | 31.82 | 28.40 |
| 950 | 32.57 | 31.68 | 32.43 | 920 | 27.70 | 31.70 | 28.48 |

Tabla 25. Viscosidad de embudo, viscosidad de embudo de flujo continuo para un fluido polimérico de densidad 1.00 g/cm³ y una concentración de goma xanítica de 1.50 g/350cm³

| Viscosidad de embudo (FV) | | | | Viscosidad de embudo de flujo continuo (DFV) | | | |
|----------------------------|------------|------------------|----------------------------|--|------------|------------------|-----------------------------|
| Volumen (cm ³) | Tiempo (s) | Temperatura (°C) | FV (s/946cm ³) | Volumen (cm ³) | Tiempo (s) | Temperatura (°C) | DFV (s/946cm ³) |
| 980 | 37.43 | 31.45 | 36.13 | 995 | 33.01 | 31.42 | 31.38 |
| 990 | 37.65 | 31.35 | 35.98 | 990 | 32.85 | 31.38 | 31.39 |
| 940 | 35.94 | 31.14 | 36.17 | 1000 | 33.02 | 31.15 | 31.24 |
| 960 | 36.74 | 31.25 | 36.20 | 995 | 32.89 | 31.26 | 31.27 |
| 990 | 37.75 | 31.33 | 36.07 | 995 | 32.87 | 31.22 | 31.25 |
| 985 | 37.51 | 31.15 | 36.02 | 1000 | 33.14 | 31.39 | 31.35 |
| 995 | 37.95 | 31.31 | 36.08 | 990 | 32.73 | 31.07 | 31.28 |
| 990 | 37.83 | 31.37 | 36.15 | 1000 | 33.08 | 31.42 | 31.29 |
| 990 | 37.82 | 31.35 | 36.14 | 995 | 32.95 | 31.19 | 31.33 |
| 980 | 37.38 | 31.10 | 36.08 | 990 | 32.76 | 31.30 | 31.30 |

Tabla 26. Viscosidad de embudo, viscosidad de embudo de flujo continuo para un fluido polimérico de densidad 1.00 g/cm³ y una concentración de goma xantica de 2.00 g/350cm³

| Viscosidad de embudo (FV) | | | | Viscosidad de embudo de flujo continuo (DFV) | | | |
|----------------------------|------------|------------------|----------------------------|--|------------|------------------|-----------------------------|
| Volumen (cm ³) | Tiempo (s) | Temperatura (°C) | FV (s/946cm ³) | Volumen (cm ³) | Tiempo (s) | Temperatura (°C) | DFV (s/946cm ³) |
| 900 | 38.69 | 32.29 | 40.67 | 920 | 33.45 | 32.12 | 34.40 |
| 870 | 36.89 | 32.41 | 40.11 | 950 | 34.72 | 32.44 | 34.57 |
| 910 | 38.88 | 32.68 | 40.42 | 930 | 35.17 | 32.73 | 35.78 |
| 880 | 36.91 | 32.72 | 39.68 | 970 | 34.76 | 32.85 | 33.90 |
| 900 | 38.69 | 32.45 | 40.67 | 990 | 35.63 | 32.99 | 34.05 |
| 910 | 38.82 | 32.23 | 40.36 | 900 | 33.14 | 32.51 | 34.83 |
| 880 | 36.88 | 32.48 | 39.65 | 920 | 33.45 | 32.85 | 34.40 |
| 900 | 38.71 | 32.87 | 40.69 | 910 | 32.45 | 32.93 | 33.73 |
| 890 | 38.26 | 32.58 | 40.67 | 900 | 32.14 | 32.79 | 33.78 |
| 910 | 39.01 | 32.49 | 40.55 | 910 | 32.25 | 32.99 | 33.53 |

Tabla 27. Viscosidad de embudo, viscosidad de embudo de flujo continuo para un fluido polimérico de densidad 1.00 g/cm³ y una concentración de goma xantica de 2.50 g/350cm³

| Viscosidad de embudo (FV) | | | | Viscosidad de embudo de flujo continuo (DFV) | | | |
|----------------------------|------------|------------------|----------------------------|--|------------|------------------|-----------------------------|
| Volumen (cm ³) | Tiempo (s) | Temperatura (°C) | FV (s/946cm ³) | Volumen (cm ³) | Tiempo (s) | Temperatura (°C) | DFV (s/946cm ³) |
| 920 | 46.67 | 31.55 | 47.99 | 890 | 36.92 | 32.01 | 39.24 |
| 960 | 48.72 | 31.89 | 48.01 | 920 | 37.27 | 31.83 | 38.32 |
| 900 | 45.58 | 32.01 | 47.91 | 880 | 36.51 | 31.59 | 39.25 |
| 920 | 46.62 | 31.65 | 47.94 | 910 | 37.68 | 31.63 | 39.17 |
| 980 | 49.35 | 31.32 | 47.64 | 890 | 36.27 | 31.78 | 38.55 |
| 970 | 49.07 | 31.94 | 47.86 | 890 | 36.86 | 31.65 | 39.18 |
| 910 | 46.09 | 31.78 | 47.91 | 880 | 36.51 | 31.83 | 39.25 |
| 950 | 48.62 | 31.86 | 48.52 | 870 | 35.91 | 31.91 | 39.05 |
| 940 | 47.18 | 31.94 | 47.63 | 910 | 37.42 | 31.68 | 38.9 |
| 950 | 48.11 | 31.76 | 47.97 | 910 | 37.49 | 31.79 | 38.97 |

Tabla 28. Viscosidad de embudo, viscosidad de embudo de flujo continuo para un fluido polimérico de densidad 1.10 g/cm³ y una concentración de goma xantica de 0.50 g/350cm³

| Viscosidad de embudo (FV) | | | | Viscosidad de embudo de flujo continuo (DFV) | | | |
|----------------------------|------------|------------------|----------------------------|--|------------|------------------|-----------------------------|
| Volumen (cm ³) | Tiempo (s) | Temperatura (°C) | FV (s/946cm ³) | Volumen (cm ³) | Tiempo (s) | Temperatura (°C) | DFV (s/946cm ³) |
| 990 | 30.91 | 25.58 | 29.54 | 980 | 27.78 | 25.94 | 26.82 |
| 960 | 30.32 | 25.69 | 29.88 | 990 | 27.50 | 25.87 | 26.28 |
| 970 | 30.63 | 25.71 | 29.87 | 980 | 27.94 | 25.91 | 26.97 |
| 980 | 30.82 | 25.83 | 29.75 | 960 | 26.78 | 25.73 | 26.39 |
| 990 | 30.21 | 25.79 | 28.87 | 990 | 27.51 | 25.69 | 26.29 |
| 990 | 30.79 | 25.64 | 29.42 | 990 | 27.22 | 25.45 | 26.01 |
| 990 | 30.65 | 25.74 | 29.29 | 980 | 27.78 | 25.31 | 26.82 |
| 960 | 30.28 | 25.83 | 29.84 | 970 | 27.63 | 25.82 | 26.95 |
| 990 | 30.94 | 25.94 | 29.57 | 990 | 27.43 | 25.93 | 26.21 |
| 980 | 30.75 | 25.82 | 29.68 | 970 | 27.43 | 25.95 | 26.75 |

Tabla 29. Viscosidad de embudo, viscosidad de embudo de flujo continuo para un fluido polimérico de densidad 1.10 g/cm³ y una concentración de goma xanثica de 1.00 g/350cm³

| Viscosidad de embudo (FV) | | | | Viscosidad de embudo de flujo continuo (DFV) | | | |
|----------------------------|------------|------------------|----------------------------|--|------------|------------------|-----------------------------|
| Volumen (cm ³) | Tiempo (s) | Temperatura (°C) | FV (s/946cm ³) | Volumen (cm ³) | Tiempo (s) | Temperatura (°C) | DFV (s/946cm ³) |
| 970 | 32.40 | 26.85 | 31.60 | 980 | 29.36 | 26.85 | 28.34 |
| 960 | 32.73 | 26.98 | 32.25 | 970 | 29.24 | 26.98 | 28.52 |
| 990 | 33.07 | 27.21 | 31.60 | 900 | 27.15 | 27.21 | 28.54 |
| 990 | 33.89 | 27.35 | 32.38 | 930 | 28.75 | 27.35 | 29.24 |
| 970 | 32.95 | 27.14 | 32.13 | 950 | 28.50 | 27.14 | 28.38 |
| 980 | 33.28 | 27.07 | 32.13 | 910 | 27.05 | 27.07 | 28.12 |
| 990 | 32.97 | 26.98 | 31.50 | 960 | 29.75 | 26.98 | 29.32 |
| 980 | 32.85 | 26.89 | 31.71 | 950 | 28.05 | 26.89 | 27.93 |
| 990 | 33.57 | 26.87 | 32.08 | 960 | 29.45 | 26.87 | 29.02 |
| 980 | 32.99 | 27.05 | 31.85 | 940 | 28.66 | 27.05 | 28.84 |

Tabla 30. Viscosidad de embudo, viscosidad de embudo de flujo continuo para un fluido polimérico de densidad 1.10 g/cm³ y una concentración de goma xanثica de 1.50 g/350cm³

| Viscosidad de embudo (FV) | | | | Viscosidad de embudo de flujo continuo (DFV) | | | |
|----------------------------|------------|------------------|----------------------------|--|------------|------------------|-----------------------------|
| Volumen (cm ³) | Tiempo (s) | Temperatura (°C) | FV (s/946cm ³) | Volumen (cm ³) | Tiempo (s) | Temperatura (°C) | DFV (s/946cm ³) |
| 980 | 36.21 | 31.49 | 34.95 | 980 | 31.56 | 31.49 | 30.47 |
| 980 | 36.18 | 31.32 | 34.92 | 970 | 31.72 | 31.32 | 30.94 |
| 990 | 36.27 | 31.05 | 34.66 | 980 | 31.48 | 31.05 | 30.39 |
| 980 | 36.24 | 31.37 | 34.98 | 970 | 31.25 | 31.37 | 30.48 |
| 1000 | 36.52 | 31.21 | 34.55 | 980 | 31.95 | 31.21 | 30.84 |
| 990 | 36.57 | 31.32 | 34.94 | 960 | 31.14 | 31.32 | 30.69 |
| 1000 | 36.48 | 31.09 | 34.51 | 970 | 31.69 | 31.09 | 30.91 |
| 990 | 36.38 | 31.14 | 34.76 | 960 | 31.73 | 31.14 | 31.27 |
| 990 | 36.12 | 31.27 | 34.51 | 970 | 31.89 | 31.27 | 31.10 |
| 1000 | 36.79 | 31.21 | 34.80 | 960 | 31.23 | 31.21 | 30.78 |

Tabla 31. Viscosidad de embudo, viscosidad de embudo de flujo continuo para un fluido polimérico de densidad 1.10 g/cm³ y una concentración de goma xanثica de 2.00 g/350cm³

| Viscosidad de embudo (FV) | | | | Viscosidad de embudo de flujo continuo (DFV) | | | |
|----------------------------|------------|------------------|----------------------------|--|------------|------------------|-----------------------------|
| Volumen (cm ³) | Tiempo (s) | Temperatura (°C) | FV (s/946cm ³) | Volumen (cm ³) | Tiempo (s) | Temperatura (°C) | DFV (s/946cm ³) |
| 980 | 39.47 | 34.52 | 38.10 | 990 | 34.71 | 34.52 | 33.25 |
| 960 | 38.67 | 34.25 | 38.11 | 1000.00 | 35.06 | 34.25 | 33.43 |
| 990 | 39.07 | 34.78 | 37.33 | 980.00 | 34.35 | 34.78 | 33.35 |
| 950 | 38.27 | 34.63 | 38.11 | 980.00 | 34.35 | 34.63 | 33.21 |
| 980 | 39.79 | 34.51 | 38.41 | 970.00 | 34.00 | 34.51 | 33.14 |
| 970 | 38.45 | 34.49 | 37.50 | 980.00 | 34.35 | 34.49 | 32.93 |
| 980 | 39.47 | 34.38 | 38.10 | 990.00 | 34.71 | 34.38 | 32.98 |
| 960 | 38.64 | 34.55 | 38.08 | 980.00 | 34.35 | 34.55 | 33.08 |
| 970 | 38.52 | 34.69 | 37.57 | 990.00 | 34.71 | 34.69 | 33.15 |
| 960 | 38.34 | 34.62 | 37.78 | 990.00 | 34.71 | 34.62 | 33.12 |

Tabla 32. Viscosidad de embudo, viscosidad de embudo de flujo continuo para un fluido polimérico de densidad 1.10 g/cm³ y una concentración de goma xanثica de 2.50 g/350cm³

| Viscosidad de embudo (FV) | | | | Viscosidad de embudo de flujo continuo (DFV) | | | |
|----------------------------|------------|------------------|----------------------------|--|------------|------------------|-----------------------------|
| Volumen (cm ³) | Tiempo (s) | Temperatura (°C) | FV (s/946cm ³) | Volumen (cm ³) | Tiempo (s) | Temperatura (°C) | DFV (s/946cm ³) |
| 990 | 44.25 | 36.48 | 42.28 | 980 | 37.61 | 36.35 | 36.31 |
| 980 | 44.80 | 36.39 | 43.25 | 970 | 37.28 | 36.24 | 36.36 |
| 970 | 43.78 | 36.25 | 42.70 | 970 | 37.35 | 36.06 | 36.43 |
| 970 | 43.83 | 36.36 | 42.75 | 960 | 36.75 | 36.14 | 36.21 |
| 980 | 44.42 | 36.14 | 42.88 | 970 | 37.32 | 35.97 | 36.40 |
| 980 | 44.12 | 36.09 | 42.59 | 950 | 36.38 | 36.02 | 36.23 |
| 980 | 44.08 | 35.98 | 42.55 | 940 | 36.03 | 36.03 | 36.26 |
| 990 | 44.70 | 35.92 | 42.71 | 950 | 36.32 | 36.09 | 36.17 |
| 980 | 44.27 | 35.97 | 42.73 | 950 | 36.29 | 36.25 | 36.14 |
| 980 | 44.25 | 36.06 | 42.71 | 960 | 36.69 | 36.47 | 36.15 |

Tabla 33. Viscosidad de embudo, viscosidad de embudo de flujo continuo para un fluido polimérico de densidad 1.20 g/cm³ y una concentración de goma xanثica de 0.50 g/350cm³

| Viscosidad de embudo (FV) | | | | Viscosidad de embudo de flujo continuo (DFV) | | | |
|----------------------------|------------|------------------|----------------------------|--|------------|------------------|-----------------------------|
| Volumen (cm ³) | Tiempo (s) | Temperatura (°C) | FV (s/946cm ³) | Volumen (cm ³) | Tiempo (s) | Temperatura (°C) | DFV (s/946cm ³) |
| 970 | 30.20 | 33.45 | 29.45 | 970 | 26.96 | 33.45 | 26.29 |
| 960 | 30.81 | 33.38 | 30.36 | 990 | 27.14 | 33.12 | 25.93 |
| 980 | 30.72 | 32.98 | 29.65 | 980 | 27.08 | 33.37 | 26.14 |
| 990 | 30.68 | 33.14 | 29.32 | 980 | 27.26 | 33.29 | 26.31 |
| 980 | 30.89 | 33.18 | 29.82 | 990 | 26.83 | 33.57 | 25.64 |
| 990 | 31.06 | 33.23 | 29.68 | 980 | 27.04 | 33.14 | 26.10 |
| 980 | 30.94 | 33.38 | 29.87 | 980 | 27.29 | 33.05 | 26.34 |
| 990 | 31.03 | 33.14 | 29.65 | 970 | 27.18 | 33.01 | 26.51 |
| 980 | 30.97 | 33.12 | 29.90 | 980 | 27.25 | 33.23 | 26.30 |
| 980 | 31.02 | 33.35 | 29.94 | 980 | 27.24 | 33.21 | 26.29 |

Tabla 34. Viscosidad de embudo, viscosidad de embudo de flujo continuo para un fluido polimérico de densidad 1.20 g/cm³ y una concentración de goma xanثica de 1.00 g/350cm³

| Viscosidad de embudo (FV) | | | | Viscosidad de embudo de flujo continuo (DFV) | | | |
|----------------------------|------------|------------------|----------------------------|--|------------|------------------|-----------------------------|
| Volumen (cm ³) | Tiempo (s) | Temperatura (°C) | FV (s/946cm ³) | Volumen (cm ³) | Tiempo (s) | Temperatura (°C) | DFV (s/946cm ³) |
| 980 | 33.35 | 32.85 | 32.19 | 980 | 29.01 | 32.98 | 28.14 |
| 1000 | 33.98 | 32.79 | 32.15 | 970 | 28.88 | 33.07 | 28.17 |
| 990 | 33.45 | 32.97 | 31.96 | 980 | 29.12 | 32.85 | 28.11 |
| 1000 | 34.02 | 33.01 | 32.18 | 960 | 28.31 | 32.67 | 27.90 |
| 990 | 33.51 | 32.96 | 32.02 | 970 | 28.93 | 32.98 | 28.21 |
| 980 | 33.19 | 33.03 | 32.04 | 960 | 28.27 | 32.67 | 27.86 |
| 990 | 33.51 | 33.02 | 32.02 | 970 | 28.89 | 32.87 | 28.18 |
| 980 | 33.19 | 32.89 | 32.04 | 970 | 28.95 | 32.93 | 28.23 |
| 1000 | 33.87 | 32.75 | 32.04 | 980 | 29.21 | 33.05 | 28.20 |
| 990 | 33.43 | 32.83 | 31.94 | 960 | 28.98 | 33.03 | 28.56 |

Tabla 35. Viscosidad de embudo, viscosidad de embudo de flujo continuo para un fluido polimérico de densidad 1.20 g/cm³ y una concentración de goma xanítica de 1.50 g/350cm³

| Viscosidad de embudo (FV) | | | | Viscosidad de embudo de flujo continuo (DFV) | | | |
|----------------------------|------------|------------------|----------------------------|--|------------|------------------|-----------------------------|
| Volumen (cm ³) | Tiempo (s) | Temperatura (°C) | FV (s/946cm ³) | Volumen (cm ³) | Tiempo (s) | Temperatura (°C) | DFV (s/946cm ³) |
| 970 | 37.75 | 32.39 | 36.82 | 960 | 32.34 | 32.41 | 31.87 |
| 970 | 37.73 | 32.35 | 36.80 | 980 | 33.12 | 32.58 | 31.97 |
| 980 | 38.12 | 32.21 | 36.80 | 990 | 33.42 | 32.48 | 31.93 |
| 970 | 37.81 | 32.48 | 36.87 | 970 | 32.66 | 32.65 | 31.85 |
| 980 | 38.08 | 32.37 | 36.76 | 980 | 33.08 | 32.43 | 31.93 |
| 990 | 38.46 | 32.59 | 36.75 | 960 | 32.31 | 32.27 | 31.84 |
| 980 | 38.07 | 32.49 | 36.75 | 950 | 32.03 | 32.23 | 31.89 |
| 990 | 38.35 | 32.43 | 36.65 | 960 | 32.31 | 32.35 | 31.84 |
| 990 | 38.31 | 32.54 | 36.61 | 970 | 32.70 | 32.52 | 31.89 |
| 980 | 37.98 | 32.38 | 36.66 | 980 | 33.04 | 32.31 | 31.89 |

Tabla 36. Viscosidad de embudo, viscosidad de embudo de flujo continuo para un fluido polimérico de densidad 1.20 g/cm³ y una concentración de goma xanítica de 2.00 g/350cm³

| Viscosidad de embudo (FV) | | | | Viscosidad de embudo de flujo continuo (DFV) | | | |
|----------------------------|------------|------------------|----------------------------|--|------------|------------------|-----------------------------|
| Volumen (cm ³) | Tiempo (s) | Temperatura (°C) | FV (s/946cm ³) | Volumen (cm ³) | Tiempo (s) | Temperatura (°C) | DFV (s/946cm ³) |
| 1000 | 42.68 | 33.75 | 40.38 | 990 | 36.15 | 33.75 | 34.54 |
| 990 | 41.83 | 33.89 | 39.97 | 990 | 36.19 | 33.79 | 34.58 |
| 990 | 41.79 | 33.75 | 39.93 | 980 | 35.76 | 33.38 | 34.51 |
| 980 | 41.63 | 33.72 | 40.19 | 1000 | 36.51 | 34.09 | 34.54 |
| 1000 | 42.59 | 33.68 | 40.29 | 990 | 36.11 | 33.71 | 34.51 |
| 990 | 41.78 | 33.52 | 39.92 | 980 | 35.68 | 33.31 | 34.44 |
| 990 | 41.82 | 33.72 | 39.96 | 1000 | 36.48 | 34.06 | 34.51 |
| 980 | 41.59 | 33.79 | 40.15 | 990 | 36.19 | 33.79 | 34.58 |
| 1000 | 42.63 | 33.63 | 40.33 | 990 | 36.08 | 33.69 | 34.48 |
| 980 | 41.57 | 33.74 | 40.12 | 990 | 36.04 | 33.65 | 34.44 |

Tabla 37. Viscosidad de embudo, viscosidad de embudo de flujo continuo para un fluido polimérico de densidad 1.20 g/cm³ y una concentración de goma xanítica de 2.50 g/350cm³

| Viscosidad de embudo (FV) | | | | Viscosidad de embudo de flujo continuo (DFV) | | | |
|----------------------------|------------|------------------|----------------------------|--|------------|------------------|-----------------------------|
| Volumen (cm ³) | Tiempo (s) | Temperatura (°C) | FV (s/946cm ³) | Volumen (cm ³) | Tiempo (s) | Temperatura (°C) | DFV (s/946cm ³) |
| 970 | 45.77 | 36.03 | 44.64 | 980 | 38.76 | 35.28 | 37.42 |
| 970 | 45.79 | 36.05 | 44.66 | 990 | 39.20 | 35.68 | 37.46 |
| 980 | 46.53 | 36.63 | 44.92 | 980 | 38.71 | 35.23 | 37.37 |
| 960 | 45.29 | 35.66 | 44.63 | 990 | 39.18 | 35.66 | 37.44 |
| 980 | 46.62 | 36.70 | 45.00 | 1000 | 39.78 | 36.21 | 37.63 |
| 940 | 44.29 | 34.87 | 44.57 | 990 | 39.15 | 35.63 | 37.41 |
| 960 | 45.21 | 35.59 | 44.55 | 990 | 39.08 | 35.57 | 37.34 |
| 950 | 44.73 | 35.22 | 44.54 | 1000 | 39.83 | 36.25 | 37.68 |
| 950 | 44.73 | 35.22 | 44.54 | 990 | 39.17 | 35.65 | 37.43 |
| 940 | 44.27 | 34.85 | 44.55 | 990 | 39.12 | 35.61 | 37.38 |

ANEXO 3.

CÁLCULO DE LA VISCOSIDAD DE EMBUDO Y VISCOSIDAD DE EMBUDO DE FLUJO CONTINUO A TEMPERATURA ESTÁNDAR

Según la norma API RT 13B-1 los resultados de viscosidad de embudo se corrigieron a 48.89 °C de temperatura utilizando el estándar ASTM D3195 - Standard Practice for Rotameter Calibration con la ecuación 3 (ASTM, 2015).

$$FV_{STD} = FV_T \frac{(T + 273.15)}{(T_{STD} + 273.15)} \quad [3]$$

Donde:

FV_{STD} = Viscosidad de embudo a temperatura estándar en segundos

FV_T = Viscosidad de embudo a cualquier temperatura en segundos

T = Cualquier temperatura en grados Celsius

T_{STD} = Temperatura estándar en grados Celsius

Tabla 38. Viscosidad de embudo y viscosidad de embudo de flujo continuo a temperatura estándar en orden descendente

| # | FV _{STD} (s/946cm ³) | DFV _{STD} (s/946cm ³) | # | FV _{STD} (s/946cm ³) | DFV _{STD} (s/946cm ³) | # | FV _{STD} (s/946cm ³) | DFV _{STD} (s/946cm ³) |
|----|--|---|-----|--|---|-----|--|---|
| 1 | 24.24 | 21.09 | 55 | 30.44 | 26.81 | 109 | 35.70 | 31.72 |
| 2 | 24.38 | 21.11 | 56 | 30.44 | 26.82 | 110 | 36.37 | 31.80 |
| 3 | 24.35 | 21.17 | 57 | 30.45 | 26.83 | 111 | 38.49 | 31.87 |
| 4 | 24.45 | 21.18 | 58 | 30.93 | 26.86 | 112 | 38.66 | 32.06 |
| 5 | 24.33 | 21.20 | 59 | 29.69 | 26.89 | 113 | 38.61 | 32.09 |
| 6 | 24.36 | 21.23 | 60 | 30.53 | 26.89 | 114 | 37.69 | 32.21 |
| 7 | 24.44 | 21.24 | 61 | 30.70 | 26.96 | 115 | 38.59 | 32.37 |
| 8 | 24.31 | 21.28 | 62 | 29.53 | 27.02 | 116 | 38.57 | 32.60 |
| 9 | 24.45 | 21.33 | 63 | 29.88 | 27.04 | 117 | 37.63 | 32.68 |
| 10 | 24.25 | 21.33 | 64 | 30.69 | 27.06 | 118 | 38.02 | 32.78 |
| 11 | 26.70 | 23.53 | 65 | 30.59 | 27.11 | 119 | 38.06 | 32.81 |
| 12 | 27.36 | 23.59 | 66 | 30.98 | 27.15 | 120 | 38.24 | 32.81 |
| 13 | 27.40 | 23.81 | 67 | 30.35 | 27.15 | 121 | 38.42 | 32.85 |
| 14 | 27.26 | 23.82 | 68 | 30.81 | 27.21 | 122 | 38.06 | 32.85 |
| 15 | 27.18 | 23.83 | 69 | 30.22 | 27.29 | 123 | 38.39 | 32.88 |
| 16 | 27.36 | 23.83 | 70 | 29.36 | 27.32 | 124 | 38.48 | 32.92 |
| 17 | 27.24 | 23.91 | 71 | 32.74 | 28.70 | 125 | 38.08 | 32.92 |
| 18 | 27.27 | 23.94 | 72 | 33.08 | 28.82 | 126 | 38.29 | 32.95 |
| 19 | 26.96 | 24.00 | 73 | 33.07 | 28.82 | 127 | 38.11 | 32.96 |
| 20 | 27.06 | 24.06 | 74 | 33.04 | 29.01 | 128 | 38.26 | 32.96 |
| 21 | 27.30 | 24.12 | 75 | 32.89 | 29.09 | 129 | 38.27 | 33.06 |
| 22 | 27.46 | 24.34 | 76 | 32.65 | 29.15 | 130 | 38.38 | 33.98 |
| 23 | 26.80 | 24.39 | 77 | 32.60 | 29.20 | 131 | 41.18 | 34.81 |
| 24 | 27.73 | 24.40 | 78 | 33.02 | 29.25 | 132 | 40.90 | 34.81 |
| 25 | 28.36 | 24.42 | 79 | 32.63 | 29.40 | 133 | 40.84 | 34.82 |
| 26 | 27.62 | 24.49 | 80 | 34.18 | 29.52 | 134 | 41.02 | 34.82 |
| 27 | 28.90 | 24.66 | 81 | 34.11 | 29.54 | 135 | 40.99 | 34.82 |
| 28 | 28.24 | 24.83 | 82 | 32.85 | 29.54 | 136 | 41.08 | 34.83 |
| 29 | 27.56 | 24.85 | 83 | 34.11 | 29.54 | 137 | 41.57 | 34.84 |
| 30 | 27.18 | 24.85 | 84 | 34.22 | 29.56 | 138 | 41.02 | 34.84 |
| 31 | 28.19 | 24.88 | 85 | 34.09 | 29.59 | 139 | 40.65 | 34.85 |
| 32 | 27.40 | 24.91 | 86 | 34.18 | 29.60 | 140 | 41.01 | 34.86 |
| 33 | 28.50 | 25.01 | 87 | 34.17 | 29.61 | 141 | 43.21 | 35.78 |
| 34 | 27.70 | 25.02 | 88 | 34.04 | 29.65 | 142 | 42.71 | 35.80 |
| 35 | 28.43 | 25.03 | 89 | 34.17 | 29.68 | 143 | 42.86 | 35.83 |
| 36 | 28.04 | 25.03 | 90 | 34.02 | 29.68 | 144 | 42.61 | 35.84 |
| 37 | 27.88 | 25.04 | 91 | 34.89 | 30.20 | 145 | 42.63 | 35.87 |
| 38 | 27.72 | 25.05 | 92 | 34.77 | 30.20 | 146 | 42.65 | 35.89 |
| 39 | 28.43 | 25.05 | 93 | 34.93 | 30.24 | 147 | 42.80 | 35.90 |
| 40 | 28.20 | 25.20 | 94 | 34.88 | 30.24 | 148 | 42.88 | 35.92 |
| 41 | 29.54 | 26.02 | 95 | 35.00 | 30.25 | 149 | 43.30 | 36.15 |
| 42 | 29.95 | 26.21 | 96 | 34.78 | 30.25 | 150 | 42.65 | 36.20 |
| 43 | 29.44 | 26.40 | 97 | 34.75 | 30.27 | 151 | 45.48 | 36.29 |
| 44 | 30.46 | 26.45 | 98 | 34.87 | 30.30 | 152 | 45.04 | 36.50 |
| 45 | 29.96 | 26.46 | 99 | 34.89 | 30.31 | 153 | 45.12 | 36.82 |
| 46 | 30.60 | 26.49 | 100 | 34.91 | 30.35 | 154 | 45.42 | 36.90 |
| 47 | 30.06 | 26.58 | 101 | 35.82 | 31.32 | 155 | 45.95 | 36.99 |
| 48 | 29.47 | 26.62 | 102 | 36.38 | 31.37 | 156 | 45.37 | 37.07 |
| 49 | 30.38 | 26.71 | 103 | 36.38 | 31.46 | 157 | 45.34 | 37.08 |
| 50 | 30.59 | 26.75 | 104 | 36.11 | 31.50 | 158 | 45.40 | 37.14 |
| 51 | 30.44 | 26.77 | 105 | 36.69 | 31.52 | 159 | 45.37 | 37.17 |
| 52 | 30.54 | 26.78 | 106 | 35.91 | 31.53 | 160 | 45.41 | 37.19 |
| 53 | 30.91 | 26.78 | 107 | 36.42 | 31.59 | | | |
| 54 | 30.91 | 26.80 | 108 | 36.40 | 31.63 | | | |

Todos los datos a temperatura estándar están en la dispersión estadística de este trabajo