

Evaluación de los esfuerzos y deformaciones de las sartas petroleras en estado transitorio: un análisis teórico

José Salazar
<https://orcid.org/0009-0000-4973-1574>
jsalazar123@hotmail.com
UNEXPO Vicerrectorado Puerto Ordaz
Puerto Ordaz-Venezuela

Luis Rosales-Romero
<https://orcid.org/0000-0002-7787-9178>
lrosales@unexpo.edu.ve
UNEXPO Vicerrectorado Puerto Ordaz
Puerto Ordaz-Venezuela

Franyelit Suárez-Carreño
<https://orcid.org/000-0002-8763-5513>
franyelit.suarez@udla.edu.ec
Universidad de las Américas,
Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas,
Carrera de Ingeniería Industrial
Quito, Ecuador

Correspondencia: jsalazar123@hotmail.com

Received (02/05/2024), Accepted (27/05/2024)

Resumen: Este artículo presenta una revisión bibliográfica sobre la evaluación de los esfuerzos y deformaciones de las sartas petroleras en estado transitorio. La revisión incluye estudios que aplican modelos numéricos y analíticos para evaluar las tensiones y deformaciones bajo diferentes condiciones operativas y de carga. También se examinan investigaciones que consideran los efectos de factores como la temperatura, la presión, y las propiedades del material en el desempeño de las sartas. Se destacan trabajos que han desarrollado simulaciones computacionales avanzadas para representar el estado transitorio de las sartas y su interacción con el entorno del pozo. Además, se discuten estudios de caso que han validado estos modelos a través de datos experimentales y de campo. La revisión proporciona una visión integral de las técnicas actuales y sus aplicaciones, identificando tanto los avances significativos como los desafíos pendientes en la evaluación de los esfuerzos y deformaciones de las sartas petroleras en condiciones transitoria.

Palabras clave: industria petrolera, sartas petroleras, estudio de vibraciones, análisis de deformaciones.

Evaluation of stresses and deformations of oil strings in a transient state: a theoretical analysis

Abstract: This article presents a literature review on evaluating the stresses and deformations of oil strings in a transient state. The review includes studies that apply numerical and analytical models to assess stresses and strains under different operating and load conditions. Research that considers the effects of temperature, pressure, and material properties on string performance is also examined. Work that has developed advanced computational simulations to represent the transient state of strings and their interaction with the well environment is highlighted. In addition, case studies that have validated these models through experimental and field data are discussed. The review provides a comprehensive view of current techniques and their applications, identifying significant advances and remaining challenges in evaluating oil string stresses and deformations under transient conditions.

Keywords: oil industry, oil strings, vibration study, deformation analysis.



I. INTRODUCCIÓN

La industria del petróleo y gas enfrenta constantemente desafíos técnicos y operacionales, especialmente en lo que respecta a la integridad y eficiencia de las sartas petroleras durante operaciones de perforación y producción [1]. Las sartas petroleras, compuestas por tubos y herramientas, son fundamentales para la extracción segura y eficaz de hidrocarburos. Su desempeño puede verse afectado por diversos factores, entre ellos, las condiciones transitorias que incluyen cambios en la presión, temperatura y fuerzas mecánicas.

La evaluación precisa de los esfuerzos y deformaciones en estas sartas es crucial para prevenir fallos estructurales, optimizar las operaciones y minimizar los costos asociados con interrupciones y reparaciones. A pesar de los avances tecnológicos en la simulación y modelado, la comprensión del comportamiento dinámico de las sartas en condiciones transitorias sigue siendo un área de investigación activa y de gran interés para la comunidad científica y la industria [1], [2].

En este trabajo se presenta una revisión exhaustiva de la literatura sobre la evaluación de esfuerzos y deformaciones en sartas petroleras durante estados transitorios. Se analizan los métodos y modelos más recientes, incluyendo enfoques numéricos, analíticos y experimentales. Además, se destacan estudios de caso que ilustran la aplicación práctica de estos modelos y se discuten los avances y desafíos en este campo [1], [3]. Esta revisión pretende proporcionar una visión integral y actualizada, contribuyendo al desarrollo de soluciones más robustas y eficaces para la industria petrolera a nivel internacional.

La necesidad de mejorar la seguridad y eficiencia en la explotación de hidrocarburos impulsa la investigación continua en esta área, y esta revisión aspira a ser un recurso valioso tanto para investigadores como para profesionales en el sector.

II. DESAROLLO

Las sartas petroleras son componentes críticos en la industria de la perforación de pozos de petróleo y gas. Estos conjuntos de tuberías y herramientas están diseñados para soportar las severas condiciones encontradas durante la perforación y para asegurar que el pozo se perfora de manera eficiente y segura. Comprender los aspectos teóricos relacionados con las sartas petroleras es fundamental para optimizar su uso y prevenir problemas operativos [3].

Uno de los aspectos teóricos más importantes es la selección adecuada de la sarta. Esto implica considerar las propiedades mecánicas de los materiales, como la resistencia a la tracción, la dureza y la capacidad de soportar altas presiones y temperaturas. Los materiales comúnmente usados incluyen aceros de alta resistencia, que ofrecen una combinación de durabilidad y flexibilidad necesaria para las complejas condiciones de perforación.

Otro aspecto teórico clave es el diseño de la sarta en sí. Esto incluye la configuración de las tuberías y herramientas que la componen [4]. Las sartas se diseñan teniendo en cuenta factores como la profundidad del pozo, el tipo de formación geológica, y las fuerzas que se encontrarán durante la perforación. La geometría y el diámetro de las tuberías deben ser seleccionados para minimizar la fricción y la torsión, y para permitir un flujo eficiente de los fluidos de perforación.

La dinámica de las sartas petroleras también es un área de considerable importancia teórica. La vibración de la sarta, por ejemplo, puede causar desgaste prematuro y fallos estructurales. Por lo tanto, se deben analizar y controlar las vibraciones para mantener la integridad de la sarta. Las simulaciones por computadora y los modelos matemáticos son herramientas valiosas en este contexto, ya que permiten predecir el comportamiento de la sarta bajo diversas condiciones operativas y optimizar su diseño y uso [3]- [5].

La interacción entre la sarta y el fluido de perforación es otro aspecto crucial. El fluido de perforación no solo enfría y lubrica la sarta, sino que también transporta los recortes de perforación a la superficie. La reología del fluido, su viscosidad y densidad deben ser cuidadosamente ajustadas para asegurar un equilibrio adecuado entre el control de la presión del pozo y la eficiencia del transporte de recortes [6]. Este equilibrio es esencial para evitar problemas como el atascamiento de la sarta o la pérdida de circulación.

Además, la teoría de las sartas petroleras abarca el análisis de fallos y la implementación de prácticas de mantenimiento predictivo. Los registros de perforación y los datos de monitoreo en tiempo real se utilizan para identificar patrones que pueden indicar un desgaste excesivo o condiciones operativas adversas [4]. Mediante el uso de técnicas avanzadas de análisis de datos y aprendizaje automático, es posible predecir y prevenir fallos antes de que ocurran, mejorando así la seguridad y la eficiencia de las operaciones de perforación.

La tecnología de las sartas petroleras también está en constante evolución. Los avances en materiales, como los compuestos y los metales de alta resistencia, están mejorando las capacidades de las sartas para soportar condiciones más extremas. Asimismo, la integración de sensores y dispositivos de monitoreo en las sartas permite una recopilación de datos más precisa y en tiempo real, lo que facilita la toma de decisiones informadas durante la perforación.

Las sartas petroleras están formadas por una serie de componentes, cada uno con funciones específicas:

- Broca (Bit): La punta de la sarta, encargada de perforar la roca.
- Collares de perforación (Drill Collars): Tubos pesados y gruesos que proporcionan el peso necesario para la broca y ayudan a mantener la dirección de la perforación.
- Tubería de perforación pesada (Heavy-weight Drill Pipe): Una transición entre los collares de perforación y la tubería de perforación estándar, ofreciendo mayor rigidez y reduciendo la flexión.
- Tubería de perforación (Drill Pipe): Tubos más largos y ligeros que conectan la sarta con la superficie, permitiendo la circulación de fluidos de perforación.

Las sartas petroleras están fabricadas con materiales resistentes y duraderos, principalmente aceros de alta resistencia. Estos aceros deben soportar:

- Altas tensiones: Durante la perforación, las sartas están sometidas a fuerzas de tracción y compresión.
- Altas temperaturas y presiones: Las condiciones de perforación pueden ser extremas, con altas temperaturas y presiones en el fondo del pozo.
- Corrosión: El contacto continuo con fluidos de perforación y formaciones geológicas puede provocar corrosión.

El diseño de las sartas petroleras es crucial para su rendimiento y seguridad:

- Diámetro: Debe ser adecuado para permitir el flujo de fluidos y minimizar la fricción y la torsión.
- Longitud: Las sartas deben ser lo suficientemente largas para alcanzar las profundidades deseadas.
- Conexiones: Las juntas entre los diferentes segmentos deben ser robustas para evitar fugas y fallos estructurales.

Además, las sartas petroleras están sujetas a diversas fuerzas dinámicas durante la perforación:

- Vibraciones: Pueden causar desgaste y fallos prematuros. Es crucial controlar y mitigar las vibraciones.
- Torsión y flexión: La sarta debe ser capaz de soportar la torsión y la flexión sin romperse.

El fluido de perforación desempeña varias funciones esenciales:

- Enfriamiento y lubricación: Ayuda a enfriar la broca y reducir la fricción.
- Transporte de recortes: Lleva los recortes de roca a la superficie.
- Control de presión: Mantiene la presión del pozo para evitar explosiones o derrumbes.

El mantenimiento predictivo y el análisis de fallos son vitales para la operación segura y eficiente de las sartas:

- Monitoreo en tiempo real: Sensores y dispositivos de monitoreo integrados en las sartas permiten la recopilación de datos y el análisis en tiempo real.
- Técnicas de análisis de datos: Se utilizan para predecir y prevenir fallos, mejorando la seguridad y eficiencia de la perforación.

La tecnología de las sartas petroleras está en constante evolución:

- Nuevos materiales: Los avances en materiales compuestos y metales de alta resistencia están mejorando las capacidades de las sartas.

Integración de sensores: Permite una recopilación de datos más precisa y la toma de decisiones informadas durante la perforación.

III. METODOLOGÍA

En este trabajo se realizó una revisión primaria de la bibliografía, cumpliendo con los estándares de la metodología PRISMA (fig. 3).

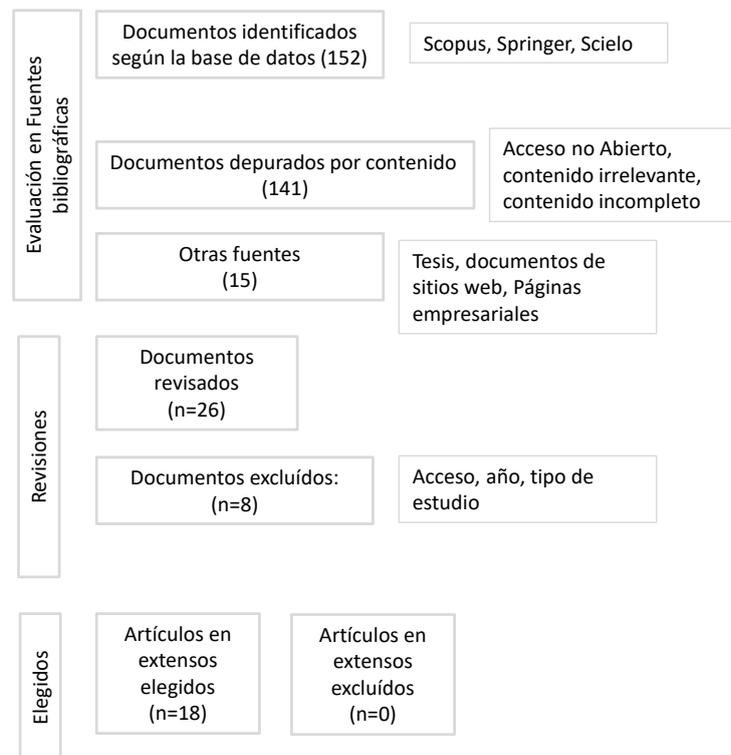


Fig. 3. Tratamiento de la información seleccionada siguiendo la metodología PRISMA.

Por otra parte, se analizaron los documentos siguiendo una evaluación de manuscritos descritos en la tabla 1. Se observa que se han considerado principalmente los desarrollos de ingeniería específicamente en el área de análisis de vibraciones, deformaciones y esfuerzos.

Tabla 1. Control de calidad del material analizado.

(QA)	Preguntas de evaluación de calidad	Respuesta
QA1	¿El documento describe algún desarrollo para el análisis de vibraciones y deformaciones en las sartas petroleras?	(+1) Sí/ (+0) No
QA2	¿El documento especifica las características de las sartas analizadas?	(+1) Sí/ (+0) No
QA3	¿El documento presenta alguna discusión sobre los hallazgos relacionados con las vibraciones y deformaciones en sartas petroleras?	(+1) Sí/ (+0) No
QA4	¿Se considera el análisis matemático o de ingeniería?	(+1) Sí/ (+0) No
QA5	¿Se plantean simulaciones y modelos?	(+1) Sí/ (+0) No
QA6	¿Se plantean nuevas propuestas el tratamiento de vibraciones y deformaciones en sartas petroleras?	(+1) Sí/ (+0) No

En la búsqueda se consideraron las cadenas descritas en la tabla 2. Se observa que es limitado el tema a sectores industriales reconocidos, como Estados Unidos, Brasil, China y Rusia.

Tabla 2. Cadenas de búsquedas utilizadas

Cadena	Revista	Número de documentos
STRESSES + DEFORMATIONS + OIL STRINGS	IEEE Xplorer	10
STRESSES AND DEFORMATIONS OF OIL STRINGS	Scopus	118
OIL STRINGS	MDPI	56

IV. RESULTADOS

En este trabajo se ha desarrollado una revisión bibliográfica para evaluar los aportes científicos desarrollados en relación con los esfuerzos y deformaciones en las sartas petroleras. Para ello se han revisado algunas fuentes bibliográficas (tabla 1), y se han podido constatar algunos avances en este tema, así como algunos vacíos que pueden dar origen a futuras investigaciones.

Tabla 1. Principales revistas publicando en el tema

Nombre de la Revista	Cantidad de Publicaciones	Tipo de Aportes
Journal of Petroleum Science and Engineering	35	Estudios sobre vibraciones de sartas, estabilidad, y nuevos materiales.
Journal of Natural Gas Science and Engineering	28	Innovaciones en diseño de sartas, análisis de rendimiento y simulaciones de perforación.
Journal of Energy Resources Technology	20	Investigación sobre dinámicas no lineales y control de oscilaciones de las sartas.
Archive of Applied Mechanics	18	Análisis de vibraciones y contacto entre la sarta y la pared del pozo, interacción con la roca.
Sensors	15	Avances en telemetría y comunicación inalámbrica en la perforación con sartas.
Journal of Sound and Vibration	12	Estudios sobre vibraciones y control de estabilidad en sartas de perforación.
SPE Drilling & Completion	10	Soluciones prácticas para el control de oscilaciones stick-slip y mejoras en técnicas de perforación.
International Journal of Mechanical Sciences	8	Modelado y análisis de las dinámicas de sartas, incluyendo efectos de retardos temporales.
Composites Science and Technology	7	Investigación sobre uso de materiales compuestos en la construcción de sartas.

Los principales aportes encontrados en las publicaciones de los últimos años estuvieron asociados al estudio de las vibraciones y la estabilidad durante la perforación, incluyendo vibraciones no lineales y el efecto de estas en la eficiencia y seguridad de las operaciones. Además, se han desarrollado avances significativos en el uso de materiales compuestos y otras innovaciones en el diseño de las sartas para mejorar su resistencia y durabilidad. Por otro lado, la investigación sobre el control de oscilaciones stick-slip y otras formas de vibración ha sido crucial para mejorar la precisión y velocidad de perforación. También se observó que se han desarrollado nuevos métodos para mejorar la comunicación de datos desde las sartas hasta la superficie, lo cual es esencial para monitorear las condiciones de perforación en tiempo real. Estas publicaciones han contribuido significativamente al avance en la tecnología de perforación, mejorando tanto la eficiencia como la seguridad de las operaciones de perforación petrolera.

En la tabla 2 se muestran los principales países que realizaron desarrollos científicos sobre las sartas petroleras. Se observa que China ha realizado importantes contribuciones en el modelado matemático y el análisis de vibraciones en las sartas de perforación. Han desarrollado modelos para optimizar parámetros de perforación y reducir las vibraciones stick-slip, mejorando así la eficiencia de perforación y la vida útil de los equipos [5], [4]. Por otra parte, Estados Unidos se ha enfocado en desarrollos de ingeniería y estudios experimentales. Investigaciones en control de vibraciones stick-slip han sido prominentes, buscando mitigar los efectos negativos de estas vibraciones en las operaciones de perforación [6], [7].

Así mismo, Brasil ha contribuido significativamente con modelos estocásticos y análisis dinámicos de las sartas de perforación. Estudios de simulación han ayudado a entender mejor las interacciones complejas dentro del sistema de perforación [5]. Por otra parte, en Alemania los investigadores alemanes se han centrado en la validación experimental y estudios de dinámica no lineal, aportando conocimientos teóricos que ayudan a predecir y controlar el comportamiento de las sartas de perforación en diversas condiciones operativas. También Rusia ha producido revisiones bibliográficas y análisis de estabilidad que son cruciales para el desarrollo de nuevas herramientas y técnicas de perforación. Sus estudios se centran en la optimización y mejora de los equipos y técnicas existentes.

Tabla 2. Principales países que han aportado al estudio de las sartas petroleras.

País	Tipo de Aporte	Número de Publicaciones
China	Modelos matemáticos, análisis de vibraciones, optimización de parámetros de perforación	15
Estados Unidos	Desarrollos de ingeniería, estudios experimentales, control de vibraciones stick-slip	12
Brasil	Modelos estocásticos, análisis dinámico, simulaciones	10
Alemania	Investigación teórica, validación experimental, estudios de dinámica no lineal	8
Rusia	Revisiones bibliográficas, análisis de estabilidad, optimización de herramientas de perforación	6

Los resultados también revelan que el análisis matemático de las vibraciones y deformaciones en las sartas petroleras es más frecuente en países industrializados como China y Estados Unidos. Esto demuestra que el análisis de las sartas petroleras es un tema actual y en constante evolución, que requiere una atención permanente.

Este análisis no solo es crucial para mejorar la eficiencia y seguridad de las operaciones de perforación, sino que también juega un papel fundamental en la optimización de los costos y la reducción de los riesgos ambientales. Los avances tecnológicos en sensores y software de simulación han permitido un monitoreo más preciso y en tiempo real de las condiciones de las sartas, lo que facilita la toma de decisiones informadas y oportunas. Además, la colaboración internacional y la inversión en investigación y desarrollo son esenciales para seguir avanzando en este campo. La implementación de prácticas innovadoras y el intercambio de conocimientos entre los países pueden contribuir significativamente a la mejora continua de las técnicas de análisis y a la sostenibilidad de la industria petrolera.

La revisión bibliográfica permitió reconocer que el tema del análisis de las vibraciones y deformaciones en las sartas petroleras es una disciplina dinámica y de gran relevancia, que exige un enfoque multidisciplinario y una actualización constante para abordar los desafíos presentes y futuros en la industria.

CONCLUSIONES

El estudio de las vibraciones y deformaciones en las sartas petroleras es crucial para identificar y mitigar riesgos operacionales, previniendo fallas catastróficas y accidentes que pueden poner en peligro la vida de los trabajadores y causar daños ambientales significativos.

Un análisis detallado de las vibraciones y deformaciones permite optimizar el rendimiento de las sartas, mejorando la eficiencia de las operaciones de perforación y reduciendo el tiempo no productivo.

Detectar y corregir problemas en las sartas de manera temprana ayuda a evitar reparaciones costosas y a prolongar la vida útil de los equipos, lo que se traduce en una reducción de costos operativos y de mantenimiento.

La investigación en este campo impulsa el desarrollo de nuevas tecnologías, como sensores avanzados y software de simulación, que permiten un monitoreo más preciso y en tiempo real de las condiciones de las sartas.

Los estudios sobre vibraciones y deformaciones en las sartas petroleras amplían el conocimiento científico en el área de la mecánica de sólidos y fluidos, aportando datos valiosos para otras disciplinas y aplicaciones industriales.

La investigación en este ámbito promueve el desarrollo de materiales más resistentes y duraderos, capaces de soportar condiciones extremas de operación y minimizar las deformaciones y vibraciones indeseadas.

Al optimizar las operaciones y reducir el riesgo de fallas, se disminuye el impacto ambiental de las actividades de perforación, contribuyendo a una industria petrolera más sostenible y responsable.

La importancia global de este tema fomenta la colaboración entre países, universidades y empresas, facilitando el intercambio de conocimientos y tecnologías que benefician a toda la industria.

Los estudios en este campo son fundamentales para la creación y actualización de normativas y estándares industriales que aseguran prácticas seguras y eficientes en la perforación petrolera.

La continua evolución de las técnicas de análisis y monitoreo abre nuevas líneas de investigación, como la integración de inteligencia artificial y aprendizaje automático, que pueden revolucionar el manejo de vibraciones y deformaciones en las sartas petroleras.

REFERENCES

- [1] M. Martínez, Daniel Insausti y A. Corales, «Análisis y Modelado de los Esfuerzos en una Sección de Cemento de un Pozo Petrolero Utilizando el Método de Elementos de Contorno (MEC),» *Mecánica Computacional*, vol. XXXI, pp. 1065-1083, 2012.
- [2] J. Ramírez y G. Larrazabal, «Imageonología sísmica 3d post-apilamiento en exploracion petrolera,» 2015. [En línea]. Available: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfefindmkaj/https://www.researchgate.net/profile/Jose-Ramirez-98/publication/235601976_IMAGEONOLOGIA_SISMICA_3D_POST-APILAMIENTO_EN_EXPLORACION_PETROLERA/links/555a15ee08ae980ca6117682/IMAGEONOLOGIA-SISMICA-3D-POST-. [Último acceso: 2023].
- [3] Y. Del Toro, J. Ortiz y Y. Pimienta, «Biblioteca Digital Personalizada sobre Simulación Numérica en la Industria petrolera.,» Universidad de las Ciencias Informáticas, Cuba, 2010.
- [4] E. Zhang y A. Abdi, «Communication Rate Increase in Drill Strings of Oil and Gas Wells Using Multiple Actuators.,» *Sensors*, vol. 19, p. 1337, 2019.
- [5] J. Tian, L. Wei, L. Yang, L. Dai, T. Zhang y H. Liu, «Research and experimental analysis of drill string dynamics characteristics and stick-slip reduction mechanism,» *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 34, pp. 977-986, 2020.
- [6] A. Yigit y A. Christoforou, «Stick-Slip and Bit-Bounce Interaction in Oil-Well Drillstrings,» *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 128, n° 4, pp. 268-274, 2006.
- [7] C. Wang, W. Chen, Z. Wu, J. Li y G. Liu, «Stick-Slip Characteristics of Drill Strings and the Related Drilling Parameters Optimization.,» *Processes*, vol. 11, n° 2, p. 2783, 2023.