

Diseño operativo con enfoque en seguridad de procesos y eficiencia ambiental para un piloto de  
inyección cíclica de vapor optimizado mediante nanopartículas

Nayive Romero

Trabajo De Grado Presentado Como Requisito Para Optar Al Título De  
Ingeniera de Petróleos

Director

Hugo Alejandro García Duarte

Magíster En Ingeniería de Hidrocarburos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de ingenierías fisicoquímicas

Escuela de ingeniería de petróleos

Bucaramanga

2025

### Dedicatoria

*A mi valiente madre. Esta tesis es el resultado de tu amor, apoyo incondicional y sacrificio en este viaje educativo. Tus palabras de aliento, tu perseverancia y tu ejemplo constante han sido mi inspiración.*

*Esta tesis es un tributo a ti, te ofrezco este logro en ofrenda a tu paciencia, a tu fe, porque siempre fuiste mi bastón cuando lo necesitaba, mi fuente inagotable de fortaleza y amor en mi búsqueda de conocimiento.*

*Eres y siempre serás mi fuente inagotable de fortaleza y sabiduría.*

*A través de tus enseñanzas y cariño, has dejado una huella imborrable en mi vida, y mi éxito académico es un reflejo de tu inquebrantable dedicación. Te amo con todo mi corazón y esta tesis es mi modesta forma de agradecerte por todo lo que has hecho por mí, madre hermosa.*

*Para mis increíbles hermanas, gracias por su amor, por el apoyo, por creer que esto sería posible. Este trabajo de grado es el resultado de años de risas, secretos, llantos, y alegrías también. ¡Este logro es de ustedes también! Siempre estaré agradecida de haber tenido la fortuna de tener tan maravillosa familia, juntas por siempre.*

*A mis hermosos sobrinos, quienes a lo largo de estos años han aportado su grano de amor, una voz de aliento, y un cariño incondicional.*

### Agradecimientos

*Dedico este logro principalmente a Dios, mi pilar de vida, quien ha sido y será mi luz en el camino, y mi guía en cada paso.*

*A mi director de tesis, Ing. Hugo García, por su apoyo incondicional en este proceso, por haber estado ahí alentándome y creyendo siempre en que lo podíamos lograr, un gran amigo, colega y profesional.*

*A mis amigos, y a todas las personas que conocí en la universidad y fuera de ella, les dedico este logro; gracias por haber estado a través del tiempo, cada uno poniendo su grano de arena.*

*A mi abuelita hermosa, quien ya no está con nosotros en este plano terrenal, pero siempre estará presente en nuestros corazones, desde el cielo estará celebrando y aplaudiendo este gran logro, te amo Lolita.*

*A mis familiares, quienes de alguna manera siempre estuvieron apoyándome, y con sus consejos y oraciones, me ayudaron a mantenerme firme en cada obstáculo.*

**Tabla de Contenido**

Introducción ..... 10

1.1 Contexto y antecedentes del proceso ..... 11

1.2 Justificación..... 12

1.3 Objetivos ..... 13

1.4 Alcance..... 14

2. Marco teórico y estado del arte ..... 16

2.1 Selección de pozos candidatos ..... 20

2.2 Uso de aditivos en inyección de vapor..... 21

3. Marco metodológico..... 24

3.1 Diseño metodológico..... 24

3.2 Procedimiento metodológico..... 28

3.3 Estructura del HAZOP y What If ..... 29

4. Manual de operaciones para el piloto de inyección cíclica de vapor optimizado con..... 32

4.1 Objetivo y alcance del manual ..... 32

4.2 Diseño operativo del piloto ..... 33

4.3 Procedimientos operativos ..... 35

4.4 Evaluación de riesgos operativos: HAZOP y What If aplicados al piloto..... 37

4.5 Análisis integrado de resultados experimentales y modelación numérica ..... 39

4.6 Manual de diseño integrado para un piloto de inyección cíclica de vapor optimizado  
mediante nanopartículas..... 52

Conclusiones ..... 63

Recomendaciones ..... 65

Referencias bibliográficas..... 67

**Lista de Figuras**

Figura 1. Diagrama de inyección cíclica de vapor..... 17

Figura 2. Eficiencia de la inyección de vapor..... 18

Figura 3. Pruebas de botella planteadas para compatibilidad fluido – fluido..... 36

Figura 4. Análisis de emulsiones inversas O/W ..... 40

Figura 5. BSW y Emulsión residual fase aceite test 2 y 3 ..... 40

Figura 6. Micrografía de la matriz del crudo ..... 41

Figura 7. Distribución del tamaño de gota de la matriz de crudo ..... 41

Figura 8. Máxima concentración de nanopartículas en el cosolvente a la que no ocurre precipitación con agitación ..... 43

Figura 9. Separación fases Nanopartícula – Cosolvente ACPC19541A en el tiempo (sin agitación)..... 43

Figura 10. Compatibilidad nanofluido a inyectar (Nafta + cosolvente + nanopartículas) @ 350 ppm. .... 44

Figura 11. Modelo de simulación de la plataforma seleccionada para la implementación de la tecnología..... 46

Figura 12. Distribución de la permeabilidad de la plataforma 3 del campo Abarco ..... 46

Figura 13. Tasa de producción de aceite para los escenarios evaluados: IAV y nanofluidos ..... 49

Figura 14. Producción acumulada de aceite para los escenarios evaluados: IAV y Nanofluidos ..... 51

Figura 15. Producción incremental de los escenarios de tecnología híbrida evaluados respecto a la inyección de vapor convencional..... 52

**Lista de Tablas**

Tabla 1. Screening de aplicación para procesos de inyección de vapor ..... 19

Tabla 2. Sistemas evaluados pruebas de compatibilidad ..... 39

Tabla 3. Propiedades del Grid de simulación ..... 45

Tabla 4. Propiedades petrofísicas del modelo de simulación ..... 46

Tabla 5. Propiedades inyección - producción del escenario base (inyección alternada de vapor) 48

Tabla 6. Propiedades para la inyección de nanofluidos ..... 48

## Resumen

**Título:** Diseño operativo con enfoque en seguridad de procesos y eficiencia ambiental para un piloto de inyección cíclica de vapor optimizado mediante nanopartículas.\*

**Autor:** Nayive Romero\*\*

**Palabras Clave:** Nanopartículas funcionalizadas, Evaluación de riesgo operacional, Manual de operaciones, Nafta como fluido de acarreo, Procedimiento operativo estandarizado (POE).

**Descripción:** Esta tesis presenta el diseño de un manual de operaciones y eficiencia ambiental para un piloto de inyección cíclica de vapor (ICV) optimizado mediante nanopartículas funcionalizadas, como estrategia innovadora de recobro térmico para crudos pesados. El trabajo parte de la necesidad de mejorar la eficiencia del proceso ICV tradicional, mitigando pérdidas térmicas y optimizando la interacción fluido-roca mediante el uso de nanofluidos formulados con nafta, cosolvente y surfactante. La metodología integra criterios de selección técnica del pozo, compatibilidad de fluidos, simulación numérica y lineamientos de seguridad de procesos basados en análisis de riesgo HAZOP y What If, documentados para cada etapa crítica del piloto (preparación, inyección química, inyección térmica, remojo y producción). Los procedimientos fueron desarrollados a partir de información operativa suministrada por la empresa ejecutora y verificada mediante pruebas experimentales y modelado de yacimiento. Como resultado, se consolida un Procedimiento Operativo Estandarizado (POE) robusto que busca minimizar desviaciones operativas, asegurar la integridad del pozo y reducir impactos ambientales. El manual propuesto no solo sirve como guía técnica para la ejecución del piloto, sino que representa una herramienta replicable y adaptable a futuros desarrollos de EOR térmico con nanopartículas.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de ingeniería de petróleos. Director: Hugo Alejandro García Duarte. Magíster en ingeniería de hidrocarburos. Codirector:.

### Abstract

**Title:** Operational design with a focus on process safety and environmental efficiency for a nanoparticle-optimized cyclic steam injection pilot project.\*

**Author:** Nayive Romero\*\*

**Keywords:** Functionalized nanoparticles, Operational risk assessment, Operations manual, Naphtha as carrier fluid, Standard operating procedure (SOP).

**Description:** This thesis presents the design of an operations and environmental efficiency manual for a cyclic steam injection (CSI) pilot optimized using functionalized nanoparticles, as an innovative thermal recovery strategy for heavy crude oils. The work stems from the need to improve the efficiency of the traditional CISP process, mitigating thermal losses and optimizing fluid-rock interaction through the use of nanofluids formulated with naphtha, cosolvent, and surfactant. The methodology integrates technical well selection criteria, fluid compatibility, numerical simulation, and process safety guidelines based on HAZOP and What If risk analyses, documented for each critical stage of the pilot (preparation, chemical injection, thermal injection, soaking, and production). The procedures were developed based on operational information provided by the executing company and verified through experimental testing and reservoir modeling. As a result, a robust Standard Operating Procedure (SOP) has been consolidated that seeks to minimize operational deviations, ensure well integrity, and reduce environmental impacts. The proposed manual not only serves as a technical guide for the execution of the pilot, but also represents a replicable and adaptable tool for future developments in thermal EOR with nanoparticles.

---

\* Thesis

\*\* Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Petroleum Engineering. Director: Hugo Alejandro García Duarte. Master's degree in Hydrocarbon Engineering.

## Introducción

La presente investigación, titulada “Diseño operativo con enfoque en seguridad de procesos y eficiencia ambiental para un piloto de inyección cíclica de vapor optimizado mediante nanopartículas”, tiene como propósito desarrollar un esquema operacional integral para la implementación segura, eficiente y replicable de un piloto de ICV mejorado con aditivos nanotecnológicos. Para ello, se construye un marco de referencia técnico que aborda los principios de la inyección de vapor en yacimientos de crudo pesado, los criterios de selección del pozo candidato y la incorporación de nanosolventes como estrategia para mejorar la movilidad del crudo, la estabilidad térmica y el rendimiento del proceso.

El diseño metodológico se fundamenta en la recolección y análisis de información técnica del pozo suministrada por la empresa operadora, complementada con literatura especializada y antecedentes de proyectos similares. Adicionalmente, se integran resultados de pruebas de laboratorio orientadas a evaluar el desempeño de diversas formulaciones de nanopartículas dispersas en nafta, considerando aspectos como compatibilidad con el crudo, estabilidad coloidal, comportamiento térmico y eficiencia en condiciones controladas. A partir de estas pruebas se selecciona el aditivo óptimo, conformado por nanopartículas funcionalizadas, nafta, Tween 80 como surfactante no iónico y N<sub>2</sub> al 95 % de pureza como gas de impulso.

Con base en estos insumos, se analiza el procedimiento operativo de inyección suministrado por la empresa, el cual contempla la aplicación del sistema químico seguido de una etapa térmica de vapor, con el objetivo de generar una cámara térmica que favorezca la movilización del crudo y potencie los efectos catalíticos de las nanopartículas. Este diseño es

evaluado y optimizado mediante simulaciones numéricas térmicas, permitiendo anticipar su comportamiento en campo.

De manera transversal, el estudio incorpora un enfoque de seguridad de procesos mediante los análisis HAZOP y What If, identificando desviaciones críticas, modos de falla y consecuencias operativas, a partir de los cuales se establecen barreras de control y medidas preventivas. Esta integración entre desempeño técnico, mitigación de riesgos y eficiencia ambiental permite estructurar finalmente un Manual de Operaciones para el piloto de inyección cíclica de vapor optimizado con nanopartículas, que documenta el procedimiento, define responsabilidades, estandariza parámetros operacionales y garantiza una ejecución segura, eficiente y sustentable del proceso.

### 1.1 Contexto y antecedentes del proceso

La inyección cíclica de vapor (ICV), también conocida como *huff and puff*, es una técnica de recobro térmico ampliamente utilizada para mejorar la producción de crudos pesados y extrapesados, los cuales presentan elevados valores de viscosidad, bajo grado API y pobre movilidad en condiciones de yacimiento. El proceso consiste en tres etapas secuenciales: (i) inyección de vapor a alta temperatura, (ii) periodo de remojo térmico para transferencia de calor, y (iii) producción de crudo movilizado. Su aplicación es común en pozos individuales con baja productividad o en declinación, dada su relativa facilidad de implementación, menor requerimiento de infraestructura y costo operativo moderado frente a métodos como *steamflooding* o SAGD (*Steam-Assisted Gravity Drainage*) (Udoh, 2021; Kandiel et al., 2025).

Desde la perspectiva de la ingeniería de procesos, la ICV enfrenta desafíos importantes relacionados con la eficiencia térmica, la seguridad operativa y el impacto ambiental. Las pérdidas

de calor en líneas de superficie y fondo, la posibilidad de sobrepresiones durante la inyección, y la interacción química entre el vapor y los componentes del crudo plantean la necesidad de diseñar procedimientos robustos bajo criterios de seguridad de procesos (Kandiel et al., 2025). Estas limitaciones han motivado la búsqueda de tecnologías complementarias que mejoren la efectividad del proceso sin comprometer la integridad operativa.

En este contexto, el uso de nanopartículas funcionalizadas en el fluido inyectado ha ganado atención como estrategia emergente para mejorar el recobro térmico. Las nanopartículas pueden actuar como modificadores de mojabilidad, agentes reductores de tensión interfacial y catalizadores térmicos que incrementan la transferencia de calor y favorecen la fragmentación de fracciones pesadas del crudo. Además, su aplicación puede generar beneficios adicionales como el upgrading in situ del petróleo y una reducción en el consumo de vapor por barril producido (Suleimanov et al., 2021; Franco et al., 2025).

No obstante, la incorporación de nanomateriales introduce nuevas consideraciones operativas y de seguridad: estabilidad coloidal, reactividad superficial, comportamiento térmico no lineal y riesgos asociados a la manipulación y exposición ocupacional. Por ello, se requiere un enfoque sistemático que integre el diseño operativo con herramientas de análisis de riesgos como *HAZOP* y *What If*, lo cual permite anticipar desviaciones críticas, establecer barreras preventivas y garantizar condiciones controladas durante la ejecución del proceso.

## **1.2 Justificación**

La inyección cíclica de vapor (ICV) ha sido una de las técnicas térmicas más utilizadas para el recobro de crudos pesados en formaciones con baja movilidad. No obstante, su eficiencia térmica y la sostenibilidad del proceso se ven limitadas por factores como la disipación de calor,

la degradación del vapor en el medio poroso y el consumo energético asociado a su generación. En este contexto, la incorporación de nanopartículas funcionalizadas como aditivos al fluido de inyección ha demostrado ser una alternativa viable para potenciar la eficiencia del proceso térmico mediante la mejora del transporte de calor, la modificación de la mojabilidad y la reducción de la tensión interfacial (Udoh, 2021; Suleimanov et al., 2021). Estudios recientes han reportado que el uso de nanofluidos puede reducir el SOR (*steam – oil ratio*), aumentar la producción acumulada y extender la vida productiva del pozo. Sin embargo, su implementación conlleva nuevos riesgos asociados al manejo y comportamiento de nanomateriales en condiciones de fondo. Estos riesgos incluyen la posibilidad de aglomeración, incompatibilidad química, reactividad con el crudo o la formación, y exposición ocupacional a partículas en suspensión (Franco et al., 2025). Por tanto, la necesidad de aplicar herramientas de análisis de riesgo sistemático, como *HAZOP* y *What If*, es crítica para garantizar la integridad del proceso.

El presente trabajo responde a esta necesidad mediante la elaboración de un manual operativo para un piloto de ICV optimizado con nanopartículas, basado en datos técnicos reales y complementado con simulaciones numéricas. El manual busca consolidar lineamientos de operación segura, estandarizar procedimientos en campo y servir como una herramienta de referencia para futuras implementaciones. Este documento no solo aporta a la innovación tecnológica en recobro térmico, sino que también fortalece la cultura de seguridad y sostenibilidad dentro del diseño operativo. En suma, esta tesis se justifica por su potencial de contribuir a una optimización técnica con control de riesgo, permitiendo una ejecución más segura, eficiente y replicable del proceso térmico, bajo condiciones reales de operación.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General**

Diseñar un plan de operaciones con enfoque en seguridad de procesos y eficiencia ambiental para un piloto de inyección cíclica de vapor optimizado mediante nanopartículas.

### 1.3.2 *Objetivos específicos*

- ✓ Caracterizar técnica y operativamente el proceso de inyección cíclica de vapor optimizado con nanopartículas y nafta, incluyendo criterios de selección de pozos, compatibilidad fluido-roca y parámetros de diseño térmico aplicables al entorno del piloto.
- ✓ Evaluar los riesgos operacionales y ambientales asociados a la ejecución del piloto mediante técnicas de análisis estructurado de peligros (como HAZOP o *What If?*), enfocando la evaluación en la integridad de procesos, la seguridad del personal y la gestión de nanopartículas.
- ✓ Diseñar un plan de trabajo operativo que integre procedimientos estandarizados, protocolos de respuesta ante desviaciones, controles de ingeniería, medidas de mitigación ambiental y lineamientos para la ejecución segura y eficiente del piloto en campo.

## 1.4 **Alcance**

El tipo de alcance de esta tesis es tecnológico – aplicado, ya que se orienta a la elaboración de una herramienta operativa basada en la sistematización de un proceso proyectado para campo, con énfasis en criterios técnicos, ambientales y de seguridad de procesos. El estudio no busca generar teoría nueva, sino aplicar conocimientos existentes a un caso específico con el fin de optimizar la ejecución de un piloto térmico con innovación en el uso de nanomateriales. La tesis aborda la estructuración detallada de un manual operativo para un piloto de inyección cíclica de vapor (ICV) optimizado con nanopartículas, integrando resultados de pruebas de laboratorio,

simulación numérica, información técnica suministrada por la empresa operadora y análisis de riesgos *HAZOP* y *What If*. Este manual se proyecta como una guía técnica para estandarizar el proceso de ejecución, establecer protocolos de seguridad, y facilitar la replicabilidad en contextos similares bajo condiciones controladas.

Este trabajo no contempla la ejecución directa del piloto ni la validación experimental de campo durante la elaboración del presente documento. Asimismo, no se incluyen modelamientos numéricos detallados ni simulaciones térmicas de flujo multifásico a nivel de yacimiento. Las recomendaciones operativas están basadas en criterios técnicos previamente evaluados, por lo que su aplicación en campo dependerá del cumplimiento de las condiciones de diseño previstas y de la validación posterior durante la operación real. En consecuencia, el manual desarrollado constituye una guía técnica anticipada, orientada a facilitar la ejecución futura del piloto, reducir la incertidumbre operativa y establecer una base sólida para su evaluación, seguimiento y mejora continua.

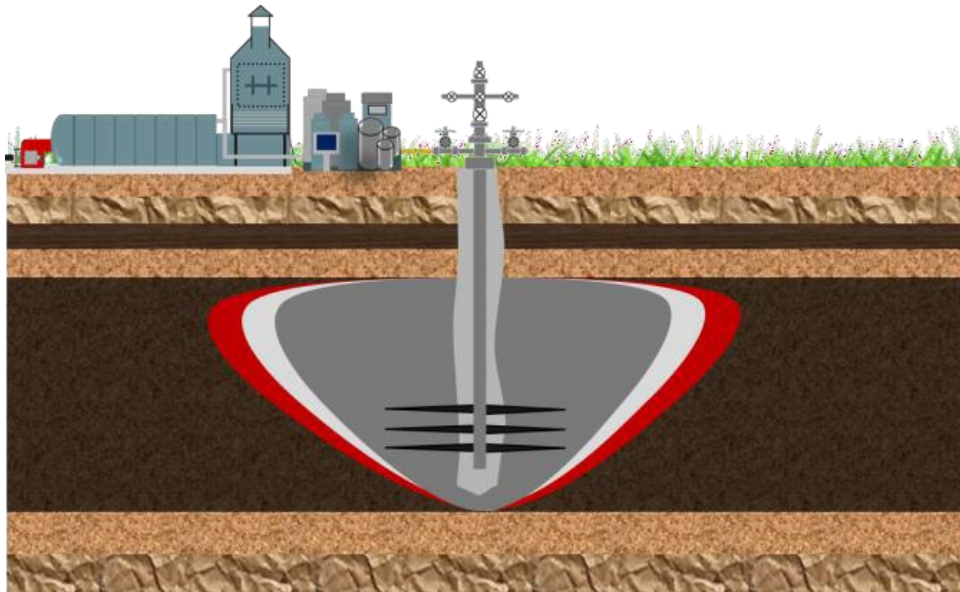
## 2. Marco teórico y estado del arte

El recobro térmico es una de las estrategias más eficaces para mejorar la producción de crudos pesados y extrapesados, cuya alta viscosidad impide una movilidad eficiente en condiciones de yacimiento. A través del aumento de la temperatura del sistema roca-fluido, se logra reducir significativamente la viscosidad del crudo, aumentar su factor de movilidad y liberar parte del crudo atrapado en los poros del medio (Green & Willhite, 1998; Lake et al., 2014). Entre los métodos más aplicados se encuentran la combustión in situ, la inyección continua de vapor (*steamflooding*) y la inyección cíclica de vapor (ICV), también conocida como *huff and puff*.

La inyección continua de vapor implica la inyección prolongada de vapor en un conjunto de pozos inyector – productor, permitiendo el desplazamiento térmico del crudo hacia los pozos productores. Este método requiere mayor infraestructura y control operativo, pero permite una mayor eficiencia de barrido en horizontes más extensos (Speight, 2014). El SAGD utiliza dos pozos horizontales paralelos: uno para la inyección continua de vapor en la parte superior del yacimiento y otro para la producción en la parte inferior. La eficiencia del SAGD es superior debido al efecto gravitacional del drenaje del crudo calentado, pero demanda altos costos de perforación, control de conificación térmica y una caracterización detallada del yacimiento (Alvarado & Manrique, 2010). Finalmente, La ICV también conocida como *huff and puff*, consiste en ciclos sucesivos de inyección de vapor, remojo y producción desde un mismo pozo; es simple de implementar y rentable en pozos con historial productivo, aunque presenta menor eficiencia en la utilización del vapor inyectado (Green & Willhite, 1998; Lake et al., 2014). Este último se caracteriza por tres fases: inyección, remojo y producción, lo que lo hace atractivo en pozos con historial productivo o en áreas con infraestructura limitada (Alvarado & Manrique, 2010) (Figura 1).

**Figura 1.**

*Diagrama de inyección cíclica de vapor. Tomado de Guerrero et al. 2021. Efecto del fenómeno de gas atrapado por histéresis sobre un proceso de inyección de vapor asistido con nitrógeno.*



El rendimiento de la ICV depende de múltiples factores técnicos, incluyendo el volumen y calidad del vapor, la relación calor – volumen inyectado, el tiempo de remojo, las propiedades petrofísicas del yacimiento y las características del crudo. Sin embargo, la eficiencia global del proceso suele estar limitada por altas pérdidas térmicas en la tubería y la formación, bajo barrido vertical, y consumo energético elevado para generar vapor, lo que afecta su sostenibilidad económica y ambiental (Meyer et al., 2007). La selección adecuada de pozos candidatos apoya en gran medida el éxito técnico y económico de un proceso de inyección cíclica de vapor (ICV) (Figura 2).

**Figura 2.**

Eficiencia de la inyección de vapor.



Los criterios de selección deben considerar tanto las condiciones del yacimiento como el estado mecánico y productivo del pozo. Desde el punto de vista técnico, se privilegian formaciones con alta viscosidad del crudo, buena permeabilidad horizontal (>100 mD), saturación de petróleo mayor al 50 %, espesor neto útil considerable y presión de fondo estática moderada, lo cual permite una mayor eficiencia térmica y desplazamiento del crudo (Alvarado & Manrique, 2010; Green & Willhite, 1998). En cuanto al pozo, se priorizan aquellos con historial productivo conocido, accesibilidad para intervención, y condiciones mecánicas compatibles con la operación térmica, incluyendo revestimiento en buen estado, capacidad para soportar ciclos térmicos y facilidades de superficie disponibles o adaptables (Meyer et al., 2007). En la Tabla 1 se puede observar los criterios más documentados en la literatura.

**Tabla 1.**

*Screening de aplicación para procesos de inyección de vapor.*

<b>Autor</b>	<b>Año</b>	<b>API</b>	<b>μ<sub>o</sub> (cP)</b>	<b>Ø (%)</b>	<b>Soi (%)</b>	<b>K (mD)</b>	<b>T (°F)</b>	<b>D (ft)</b>	<b>h (ft)</b>
<b>Geffen</b>	1973	>10				**	**	<4000	>20
<b>Farouq Ali</b>	1974	12-25	<1000	≥30	1200-1700 (bbl/ac-ft)	1000		<3000	≥30
<b>Lewin &amp; Assocs</b>	1976	>10	N.C.		>50	>1000		<5000	>20
<b>Iyoho</b>	1978	10-20	200	≥30	>50	>1000		2.500-5.000	30-400
<b>Chu</b>	1985	<36		>20	>40			>400	>10
<b>Barshear &amp; Kuuskraa</b>	1987	>10	N.C.		42	N.C.	N.C.	<5.000	>20
<b>Taber &amp; Martin</b>	1997	8-25	<100.000		>40	>200	N.C.	<5.000	>20
<b>Dickson</b>	2010	8-20	1.000-10.000		>40	>250		400-4.500	15-150
<b>Aladasani &amp; Bai</b>	2010	8-30		12-65	35-90	1-15.000	10-300	200-9.000	>20

**N.C:** Sin criterio definido; **\*\*Requiere de pruebas experimentales.**

**Nota.** Tomado de Hama, M. Q., Wei, M., Saleh, L. D., & Bai, B. (2014). Updated Screening Criteria for Steam Flooding Based Oil Fiel Projects Data, (1973). 1 – 19. <https://doi.org/10.2118/170031-ms>

## 2.1 Selección de pozos candidatos

La selección adecuada de pozos para la aplicación de inyección cíclica de vapor (ICV) es un factor determinante para el éxito técnico y económico del proceso. Esta técnica térmica, aunque flexible y de bajo requerimiento de infraestructura, no es aplicable de forma indiscriminada y requiere cumplir con un conjunto de condiciones específicas relacionadas con el yacimiento, las características del crudo, la integridad del pozo y la logística de superficie. Desde el punto de vista de geología y propiedades de yacimiento, los pozos candidatos deben ubicarse en zonas con permeabilidades efectivas superiores a 100 mD, espesores netos mayores a 10 pies y presiones de reservorio entre 300 y 1200 psi, lo cual permite la propagación efectiva de la cámara térmica sin inducir fracturamiento no deseado. Además, la viscosidad del crudo debe ser térmicamente tratable, idealmente inferior a 10,000 cP, o susceptible de reducción significativa con calor (Udoh, 2021; Kandiel et al., 2025).

En cuanto a las condiciones del pozo, es indispensable contar con una completación térmica adecuada, con cementación continua, tubería resistente a temperatura y válvulas de control en buen estado. Asimismo, se debe haber ejecutado recientemente una prueba de integridad mecánica para evitar riesgos por fugas, colapsos o fallas inducidas por presión térmica (API RP 14B, 2022). Los aspectos logísticos y de superficie también juegan un papel clave. La cercanía a sistemas de generación o transporte de vapor, así como el acceso seguro para el montaje de líneas y equipos, son requisitos básicos. De igual forma, debe verificarse la disponibilidad de flujo de retorno, capacidad de separación de fluidos y monitoreo operativo en superficie. Adicionalmente, en escenarios donde se busca aplicar ICV optimizado con nanopartículas, deben incluirse variables adicionales como la compatibilidad química entre el nanofluido y los fluidos de formación, así como la estabilidad coloidal del sistema inyectado bajo condiciones de fondo. Estos aspectos,

aunque normalmente abordados en laboratorio, inciden directamente en la selección final del pozo y en la factibilidad del proceso (Franco et al., 2025; Suleimanov et al., 2021). Finalmente, es importante considerar que la mayoría de los campos donde se plantea aplicar esta tecnología presentan baja producción primaria, por lo que la ICV puede representar una estrategia de reactivación rentable si se cumplen las condiciones técnicas mínimas.

## 2.2 Uso de aditivos en inyección de vapor.

En los últimos años, la necesidad de reducir el consumo energético y las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a la generación de vapor ha impulsado el desarrollo de estrategias híbridas, como el uso de nanopartículas, solventes orgánicos o gases coinyectados. Estas tecnologías buscan mejorar la eficiencia térmica, reducir el *Steam Oil Ratio* (SOR) y prolongar la vida productiva de pozos maduros. En ese sentido, la ICV representa una plataforma operativa flexible y económica para validar estas tecnologías emergentes, permitiendo su implementación bajo riesgos técnicos controlables.

La eficiencia del recobro térmico puede mejorarse mediante el uso de aditivos que potencien la transferencia de calor, reduzcan la viscosidad del crudo y modifiquen las condiciones del sistema fluido – roca. Entre estos, destacan los nanosolventes, una combinación de nafta ligera y nanopartículas, que actúan de manera sinérgica durante la inyección de vapor. La nafta, como disolvente orgánico de baja viscosidad, contribuye a diluir el crudo pesado, reduciendo la resistencia al flujo y mejorando la extracción de petróleo residual (Sharma et al., 2016). Las nanopartículas, por su parte, poseen una alta relación superficie – volumen, lo que les permite intervenir en fenómenos fisicoquímicos clave del yacimiento, como la tensión interfacial, la mojabilidad de la roca y la conductividad térmica del fluido inyectado (Li et al., 2013). Además, varios estudios han reportado que ciertas nanopartículas, como las de óxidos metálicos (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,

TiO<sub>2</sub>, NiO), pueden ejercer efectos catalíticos in situ, promoviendo reacciones térmicas parciales de oxidación o craqueo térmico que descomponen las fracciones pesadas del crudo en componentes más livianos durante la fase de remojo o producción del ciclo ICV (Rezaei et al., 2011). Estos efectos catalíticos no solo contribuyen a una reducción adicional de la viscosidad, sino que también pueden liberar gases y calor adicionales que mejoran la eficiencia global del proceso. Su interacción con la matriz rocosa puede promover el cambio de mojabilidad hacia condiciones más favorables para la producción de crudo (de mojado en aceite a mojado en agua), y generar una redistribución más uniforme del calor, mejorando la eficiencia térmica del proceso. Además, estudios recientes reportan que ciertos nanomateriales, como la sílice, el óxido de aluminio y el dióxido de titanio, presentan estabilidad en ambientes térmicos y compatibilidad con formulaciones con nafta, lo que los convierte en candidatos ideales para procesos térmicos mejorados (Mullins & Wang, 2019). No obstante, el uso de estos aditivos emergentes exige un diseño operativo cuidadoso, debido a posibles riesgos asociados a su manejo, transporte y comportamiento en condiciones de alta temperatura y presión.

La incorporación de estos nanofluidos, sin embargo, introduce nuevas consideraciones de riesgo, tanto a nivel de ingeniería como de seguridad operativa. A diferencia del vapor convencional, los nanomateriales pueden presentar comportamientos no lineales en condiciones de fondo: precipitación, aglomeración, interacción reactiva con minerales de la formación, o bloqueo de porosidad efectiva. Estos efectos podrían comprometer la integridad de la formación o generar pérdidas de inyectividad si no se controlan adecuadamente (Franco et al., 2025). Además, desde una perspectiva de seguridad de procesos, se deben considerar riesgos asociados a la manipulación, transporte, almacenamiento e inyección de sustancias con propiedades coloidales, carga superficial activa o alta reactividad. La exposición ocupacional, la formación de residuos

persistentes o la incompatibilidad con materiales metálicos son elementos que deben gestionarse mediante análisis sistemáticos de riesgo.

En este contexto, herramientas como HAZOP (Hazard and Operability Analysis) y *What If* se convierten en elementos fundamentales del diseño. Estas metodologías permiten anticipar desviaciones críticas, evaluar la robustez del sistema frente a condiciones operativas variables, y establecer salvaguardas técnicas y administrativas. La integración temprana del análisis de riesgos dentro del diseño del piloto resulta clave para garantizar una operación segura, eficiente y controlada. Estudios recientes han aplicado estos métodos en la evaluación de procesos térmicos con aditivos, incluyendo proyectos piloto en Asia Central y Medio Oriente, donde se validaron esquemas de inyección combinada (nanopartículas + solventes) bajo protocolos HSE reforzados (Franco et al., 2025).

### **3. Marco metodológico**

Este capítulo condensa la metodología desarrollada para la elaboración del manual de operaciones del piloto de inyección cíclica de vapor (ICV) optimizado con nanopartículas. Asimismo, se describe el enfoque técnico adoptado, basado en la integración de datos experimentales, criterios de diseño operativo, simulación numérica y análisis de riesgos bajo los lineamientos de seguridad de procesos. La metodología se organiza en dos secciones principales. La primera, correspondiente al diseño metodológico, explica el enfoque general del estudio, su naturaleza aplicada, las fuentes de información utilizadas y el propósito del diseño operativo. La segunda sección detalla el procedimiento metodológico, en el cual se desarrolla paso a paso la recopilación, análisis e integración de la información técnica que sustenta la construcción del manual, incluyendo la formulación del nanofluido, la definición del ciclo de inyección y la incorporación de los análisis como herramientas de identificación y mitigación de riesgos. Esta estructura metodológica garantiza que el procedimiento propuesto sea técnicamente sólido, seguro, replicable y adaptable a condiciones reales de campo, promoviendo así la eficiencia operativa y la gestión de riesgos en procesos térmicos con tecnología emergente.

#### **3.1 Diseño metodológico**

La metodología implementada en este trabajo se fundamenta en un enfoque tecnológico – aplicado, orientado a la construcción de un manual operativo técnico basado en la experiencia de un piloto de inyección cíclica de vapor (ICV) optimizado con nanopartículas, en el marco de la ingeniería de procesos y la seguridad operativa. Esta metodología pretende estructurar y sistematizar datos técnicos, operacionales y experimentales para su aplicación práctica bajo estándares de eficiencia y gestión del riesgo. El proceso parte de información suministrada por la

operación planificada, incluyendo la caracterización del pozo candidato, resultados de laboratorio sobre compatibilidad y estabilidad del nanofluido, y simulaciones numéricas realizadas previamente para definir las condiciones de inyección. Esta base técnica se complementa con la revisión documental de referencias especializadas sobre criterios de selección, formulación química y diseño operativo, permitiendo establecer lineamientos robustos y contextualizados.

La herramienta principal que se desarrollará es un manual de operaciones, el cual se estructura conforme a las fases operativas del ciclo de ICV, integrando protocolos de preparación de químicos, condiciones operacionales, medidas de seguridad y seguimiento operativo. Dicho manual incorpora también los hallazgos de análisis de riesgos realizados mediante las metodologías HAZOP y What If, cuya estructura fue aplicada con base en desviaciones potenciales durante las etapas críticas del proceso. La metodología se implementa en tres niveles

1. Recolección y sistematización de datos técnicos y operacionales (pozo, fluidos, química, simulación).
2. Análisis y validación técnica, que incluye la evaluación de la formulación, el diseño del ciclo de inyección y sus parámetros clave.
3. Integración operativa y de seguridad, orientada a construir una secuencia lógica, segura y replicable del proceso, bajo un enfoque de ingeniería de procesos con gestión del riesgo.

Este diseño metodológico asegura la trazabilidad y consistencia del plan operativo propuesto, garantizando que cada decisión técnica esté sustentada en datos validados, pruebas experimentales o simulaciones numéricas, con un enfoque permanente en la seguridad de procesos, eficiencia térmica y compatibilidad ambiental.

### 3.1.1 *Recolección de datos*

La recolección de datos constituye la base para la estructuración técnica del manual operativo propuesto. En este estudio, dicha recolección se realizó a partir de tres fuentes principales: i) información técnica suministrada por el equipo operador del piloto, ii) resultados de laboratorio asociados a la formulación del nanofluido, y iii) resultados de simulación numérica que permitieron validar condiciones óptimas del ciclo de inyección. Estos insumos fueron clasificados en tres áreas clave del proceso: selección del pozo candidato, formulación del nanofluido y diseño del ciclo de ICV.

A partir de simulaciones numéricas realizadas con software especializado, se definieron parámetros operacionales clave como volumen de inyección, tiempos de remojo, temperatura objetivo y caudal. Estas simulaciones incluyeron escenarios con y sin uso de nanofluido, permitiendo comparar la eficiencia térmica proyectada. El ciclo diseñado incluye la inyección del nanofluido (nanopartículas + nafta), seguido de inyección de vapor. Esta etapa metodológica permitió consolidar un conjunto de datos técnicos y operacionales suficientemente robustos para fundamentar el diseño del manual, asegurando que las recomendaciones allí contenidas correspondan a un caso real, validado técnica y experimentalmente.

*3.1.1.1 Selección del pozo candidato.* La identificación del pozo candidato se realizó a partir de información técnica suministrada por la empresa operadora del campo, incluyendo registros de producción, características petrofísicas del yacimiento, integridad mecánica del pozo y condiciones operativas existentes. Estos datos fueron complementados con criterios extraídos de literatura especializada sobre selección de pozos para ICV en crudos pesados (Speight, 2014; Prats, 2007). Se priorizaron pozos con baja productividad, buena cementación, presión remanente adecuada y ubicación accesible para el montaje de facilidades térmicas.

*3.1.1.2 Formulación del nanofluido.* La formulación del nanofluido funcionalizado se estructuró a partir de referencias científicas recientes que documentan experiencias en laboratorio y en campo con óxidos metálicos, sílice y nanopartículas híbridas aplicadas en procesos térmicos (Kandiel et al., 2025; Udoh, 2021). Se consideraron estudios sobre estabilidad coloidal, compatibilidad con el crudo y propiedades térmicas mejoradas. Adicionalmente, se tomaron en cuenta recomendaciones de protocolos de manipulación e inyección provistas por la empresa operadora y experiencias documentadas por Franco et al. (2025) en aplicaciones a escala piloto.

*3.1.1.3 Diseño del ciclo de ICV.* El diseño operativo del ciclo de inyección cíclica de vapor fue desarrollado a partir del análisis combinado de información técnica suministrada por la empresa operadora, revisión bibliográfica especializada y resultados de simulación numérica térmica aplicados al pozo candidato. Dichos modelos permitieron estimar la propagación térmica, el comportamiento de presión y las ventanas óptimas de operación, así como definir variables críticas como el volumen de vapor, la duración de la fase de inyección, el tiempo de remojo térmico y el régimen de producción posterior.

Este diseño contempló la incorporación de un nanofluido disperso en nafta como fluido activo de estimulación, lo que implicó ajustes en la secuencia de inyección, presión de línea, tasa de bombeo y volumen total del solvente portador. La elección de nafta como fluido de acarreo respondió a su compatibilidad con el crudo pesado y a su capacidad para favorecer la dispersión estable de las nanopartículas, además de aportar propiedades solventes que mejoran el desplazamiento del crudo viscoso. La co-inyección de nanofluidos con nafta fue diseñada para ejecutarse en etapas posteriores a la inyección de vapor, maximizando el contacto térmico y químico en el entorno de fondo. El diseño final integró además criterios de seguridad operativa bajo estándares HSE, limitaciones impuestas por la infraestructura de superficie, y resultados

derivados de los análisis de riesgo tipo HAZOP y What If, que permitieron establecer recomendaciones preventivas ante posibles desviaciones operativas durante la ejecución del piloto.

### **3.2 Procedimiento metodológico**

Este trabajo se orienta al desarrollo de un plan de operaciones documentado para un piloto de inyección cíclica de vapor (ICV) optimizado con nanopartículas, con base en información técnica suministrada por la empresa operadora. El procedimiento se fundamenta en la integración de: datos de selección de pozo candidato, criterios técnicos propios de la técnica de ICV, resultados de pruebas de laboratorio previamente ejecutadas y evaluadas, y análisis derivados de simulaciones numéricas térmicas. Todo ello con el objetivo de estructurar un manual operativo integral, guiado por los resultados de los análisis de riesgo tipo HAZOP y What If, que permita anticipar desviaciones críticas y establecer medidas preventivas para una ejecución segura y eficiente del proceso.

En primer lugar, se realizó la recopilación y análisis de la información técnica del pozo candidato, suministrada por la empresa operadora, complementada con literatura técnica y antecedentes de proyectos similares. Esta fase permitió identificar las condiciones estructurales, térmicas y operativas del pozo, así como las restricciones logísticas del entorno. Posteriormente, además de la revisión bibliográfica, se analizaron resultados experimentales de laboratorio desarrollados previamente para evaluar el comportamiento de distintas formulaciones. De este conjunto de pruebas se seleccionó la combinación más estable de nanopartículas dispersas en nafta, considerando su compatibilidad con el crudo, estabilidad térmica, dispersión coloidal y desempeño en condiciones controladas, lo que permitió definir el aditivo más apropiado para el proceso proyectado.

El diseño operativo no fue construido desde cero, sino que fue suministrado por la compañía operadora. Este consiste en la inyección de una mezcla compuesta por nanopartículas funcionalizadas + nafta + Tween 80 (como surfactante no iónico) + N<sub>2</sub> al 95% de pureza como gas de impulso. Esta formulación fue definida con base en criterios de dispersión, rendimiento térmico y compatibilidad química, y se incluye como parte esencial del procedimiento técnico a validar. Posteriormente a la inyección del sistema químico, se aplicó vapor como fase térmica secundaria, con el objetivo de generar una cámara térmica que favorezca la movilización del crudo, potencie los efectos catalíticos de las nanopartículas, y permita una mayor eficiencia en el barrido del petróleo viscoso. Finalmente, se estructuró el manual de operaciones con base en los insumos anteriores, incorporando los resultados de los análisis HAZOP y What If previamente realizados. Esto permitió integrar un enfoque preventivo en el procedimiento, identificando desviaciones potenciales y proponiendo barreras de control operativas, con el fin de garantizar una ejecución segura, eficiente y replicable del piloto.

### **3.3 Estructura del HAZOP y What If**

Como parte fundamental del diseño operativo propuesto, se llevó a cabo una evaluación sistemática de riesgos mediante las metodologías HAZOP (Hazard and Operability Analysis) y What If, ambas ampliamente utilizadas en la industria de procesos para identificar desviaciones operacionales y establecer medidas de control preventivo.

#### *3.3.1 Evaluación integrada HAZOP y What If*

Con el objetivo de garantizar un diseño operativo seguro y anticiparse a desviaciones críticas en el piloto de inyección cíclica de vapor con nanopartículas, se desarrolló una única estructura metodológica de análisis de riesgos que combina los principios de las metodologías HAZOP y What If. Esta integración permite sistematizar la identificación de desviaciones

potenciales y, al mismo tiempo, contemplar eventos no rutinarios o poco estructurados que pudieran impactar negativamente la operación. La evaluación se organizó por nodos operativos definidos a lo largo del proceso: preparación del nanofluido, inyección de mezcla química (nanopartículas + nafta + Tween 80 + N<sub>2</sub>), inyección de vapor, remojo térmico y producción. Para cada nodo se analizaron parámetros críticos como presión, temperatura, caudal, estabilidad del sistema, y comportamiento de los materiales, con base en información técnica suministrada y condiciones esperadas en campo.

Se aplicaron palabras guía estructuradas (más, menos, no, otro que, parte de, combinado con) para detectar desviaciones operativas, y se formularon cuestionamientos tipo What If directamente conectados a esos mismos parámetros, ampliando así el espectro de análisis más allá de las rutas tradicionales. Por ejemplo:

- ✓ Para la etapa de inyección, se analizó el caso de una presión mayor a la diseñada, a partir de la palabra guía “más”, complementada con la pregunta “¿Qué pasaría si el suministro de nitrógeno provoca una sobrepresurización del sistema?”
- ✓ En la preparación del nanofluido, se partió del término “otro que” al sustituir el cosolvente, y se evaluó el escenario “¿Qué sucede si el cosolvente altera la dispersión de las nanopartículas, afectando la estabilidad de la solución madre?”

Cada desviación identificada se describió en términos de causas raíz, consecuencias operativas y de seguridad, controles existentes y recomendaciones técnicas. La estructura permitió documentar situaciones críticas como: formación de emulsiones inestables, pérdida de confinamiento, exposición ocupacional a nanomateriales, y fallos mecánicos inducidos por mal manejo térmico o químico. El valor de esta metodología integrada radica en su capacidad de

construir un plan preventivo robusto y coherente, capaz de anticiparse tanto a desviaciones estructuradas como a eventos emergentes no contemplados explícitamente. Toda la documentación detallada, incluyendo las matrices de análisis, se presenta en el *Anexo A*, como parte del manual de operaciones de referencia para su ejecución en campo.

#### **4. Manual de operaciones para el piloto de inyección cíclica de vapor optimizado con nanopartículas**

Este capítulo presenta el manual operativo propuesto para la ejecución del piloto de inyección cíclica de vapor (ICV) optimizado con nanopartículas, con el fin de guiar su implementación bajo condiciones técnicas seguras, eficientes y replicables. El manual recoge los elementos esenciales del diseño operativo, incluyendo preparación de químicos, criterios técnicos, secuencia de etapas y parámetros clave de control. Además, se incorporan recomendaciones derivadas del análisis de riesgos mediante las metodologías HAZOP y What If, así como lineamientos ambientales y de seguridad de procesos. Esta estructura busca facilitar la toma de decisiones durante la operación y asegurar el cumplimiento de buenas prácticas en campo.

##### **4.1 Objetivo y alcance del manual**

El presente manual tiene como objetivo principal estandarizar el procedimiento operativo para la ejecución de un piloto de inyección cíclica de vapor (ICV) optimizado con nanopartículas, asegurando que todas sus etapas se desarrollen bajo condiciones técnicamente controladas, seguras y reproducibles. Su propósito es servir como guía para el personal operativo, de supervisión e ingeniería, facilitando la toma de decisiones durante la implementación del piloto y contribuyendo a la mitigación de riesgos asociados al uso combinado de nanofluidos, solventes y vapor. El manual sistematiza el diseño suministrado por la empresa operadora, incluyendo la preparación del sistema químico (nanopartículas + nafta + Tween 80 + N<sub>2</sub>), la secuencia de inyección térmica, las condiciones de remojo y producción, y las recomendaciones derivadas del análisis de riesgos HAZOP y What If. Este documento está concebido como una herramienta práctica de apoyo para garantizar la integridad del pozo, la eficiencia del barrido térmico y la seguridad de la operación.

El alcance del manual está limitado al piloto proyectado y no debe extrapolarse a otros campos, pozos o configuraciones sin realizar una validación técnica previa. Su aplicación está orientada a pozos productores de crudo pesado, con condiciones estructurales y operativas compatibles a lo identificado por el personal de ingeniería de la compañía. Asimismo, se dirige al personal responsable de la ejecución, monitoreo y control del piloto, incluyendo áreas de producción, seguridad industrial y gestión de fluidos térmicos.

#### **4.2 Diseño operativo del piloto**

El diseño operativo del piloto se basa en un esquema de inyección cíclica de vapor (ICV) optimizado mediante el uso de nanopartículas funcionalizadas, dispersas en un sistema de acarreo compuesto por nafta, Tween 80 y nitrógeno al 95% de pureza. Este diseño fue suministrado por la empresa operadora y constituye la base sobre la cual se estructuró el presente manual de operaciones, considerando tanto criterios técnicos como elementos de seguridad derivados de los análisis HAZOP y What If. La secuencia general del proceso contempla:

- ✓ Preparación del sistema químico: Esta etapa incluye la formulación de una solución madre a alta concentración de nanopartículas y cosolvente, cuya estabilidad fue verificada mediante pruebas de refracción y observación de precipitados. Posteriormente, dicha solución se mezcla con nafta hasta alcanzar la concentración final establecida para el piloto (350 ppm). El surfactante se incorpora para favorecer la dispersión de las nanopartículas, y el nitrógeno se emplea como gas de barrido para facilitar la inyección continua y seguro.
- ✓ Inyección del sistema químico: Antes del ingreso del nanofluido al pozo, se realiza una etapa de preinyección de nitrógeno, con el fin de desplazar fluidos presentes en la tubería y garantizar un entorno seco que favorezca el desplazamiento del químico.

Posteriormente, se procede a la inyección del nanofluido, compuesto por nafta, nanopartículas, Tween 80 y cosolvente, el cual es inyectado de forma simultánea con un flujo controlado de nitrógeno, actuando este último como fluido de acarreo y presión soporte. Al finalizar la etapa química, se inyecta nuevamente nitrógeno en una etapa de postinyección, con el objetivo de barrer completamente el químico hacia la formación, evitar su retención en la línea de inyección y dispersar adecuadamente el químico en el yacimiento. Esta secuencia garantiza la entrega eficiente del tratamiento, promueve la penetración del sistema en la zona productiva y minimiza pérdidas en superficie.

- ✓ Inyección de vapor: Una vez introducido el nanofluido, se procede a la inyección de vapor saturado como estímulo térmico principal. Esta etapa activa los efectos térmicos sobre el crudo y potencia los mecanismos de *upgrading* catalítico promovidos por las nanopartículas. Las condiciones operativas de vapor (presión, temperatura y volumen) fueron definidas con base en simulaciones numéricas y criterios de eficiencia energética.
- ✓ Remojo térmico: Tras la inyección de vapor, el pozo se cierra durante un tiempo determinado para permitir que el calor penetre en la formación y actúe en conjunto con los aditivos inyectados. Esta fase facilita la descomposición parcial de fracciones pesadas, mejora la movilidad del crudo y permite una redistribución térmica más efectiva en la zona tratada. La duración del remojo es crítica y fue definida en función de las propiedades del yacimiento y del fluido.
- ✓ Producción: Tras un periodo de remojo térmico, se inicia la fase de producción, donde se monitorean caudales, corte de agua, temperatura de fondo y calidad del fluido

producido. Esta fase permite evaluar la efectividad del tratamiento y establecer métricas de desempeño como la relación vapor-petróleo (SOR), eficiencia térmica, comportamiento de emulsiones y posibles efectos en la movilidad del crudo.

Así entonces, el proceso contempla una secuencia cuidadosamente diseñada para maximizar la eficiencia del tratamiento y garantizar una inyección controlada del sistema químico. Inicialmente, se inyectarán 6 horas de nitrógeno a una tasa de 1.200 m<sup>3</sup>/h, con el fin de acondicionar la línea y la zona próxima al pozo. A continuación, se introducirá el nanofluido, compuesto por nanopartículas, nafta, Tween 80 y cosolvente, durante un periodo aproximado de 4,5 horas, equivalente a 270 barriles, acompañado simultáneamente de nitrógeno como fluido de acarreo. Finalizada esta etapa, se aplicará una nueva inyección de nitrógeno por 6 horas adicionales a la misma tasa de flujo, con el objetivo de barrer el sistema químico hacia la formación y asegurar su adecuada distribución. Finalmente, se iniciará la inyección de vapor saturado durante 10 días consecutivos, completando así el ciclo térmico del piloto.

### **4.3 Procedimientos operativos**

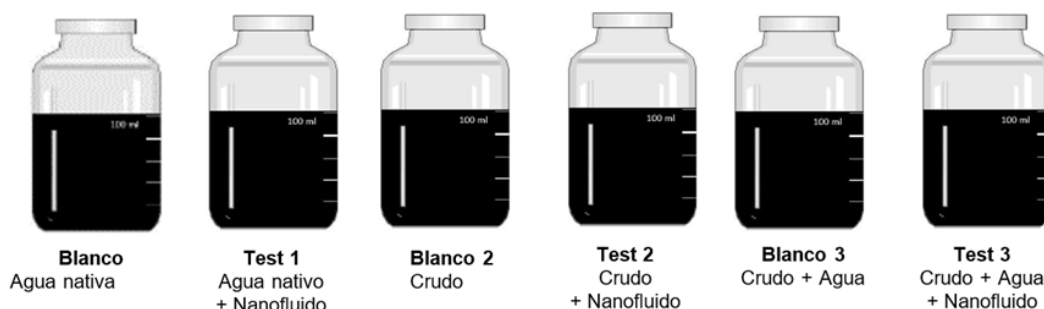
#### *4.3.1 Preparación del sistema químico*

La preparación del sistema químico constituye una fase crítica del procedimiento operativo, ya que asegura la estabilidad y compatibilidad del nanofluido que será inyectado al pozo. Esta etapa contempla pruebas experimentales orientadas a validar la interacción entre los componentes del sistema (nanopartículas, nafta, nitrógeno y Tween 80) y su comportamiento frente a los fluidos de formación. La metodología incluye tres bloques: pruebas de compatibilidad fluido-fluido, determinación de la concentración máxima de nanopartículas en el cosolvente, y verificación de compatibilidad con la nafta como fluido base.

4.3.1.1 *Pruebas de compatibilidad fluido-fluido.* Previo a la formulación definitiva del nanofluido, se realizaron pruebas de contacto entre este y los fluidos del pozo, con el fin de descartar incompatibilidades como formación de sólidos, emulsiones no deseadas o separación de fases. Estas pruebas fueron llevadas a cabo mediante el método de botellas, empleando mezclas de agua y crudo de formación en proporciones 80/20 (vol/vol) y sometidas a condiciones representativas del yacimiento (140 °F). Se prepararon seis combinaciones distintas, evaluando visualmente estabilidad, y complementando con análisis de índice de estabilidad coloidal y observación microscópica (Figura 3).

**Figura 3.**

*Pruebas de botella planteadas para compatibilidad fluido – fluido.*



4.3.1.2 *Determinación de la concentración máxima de nanopartículas en cosolvente.* Con el fin de optimizar la formulación y facilitar su manejo operativo, se preparó una solución madre a alta concentración (nanopartículas + cosolvente), que luego sería diluida con nafta. Para establecer el punto de saturación sin pérdida de estabilidad, se diseñó un ensayo escalonado:

- ✓ Dosificar 40 ml de cosolvente en un beaker de 3,8 cm de diámetro y agitar a 300 rpm durante 5 minutos.
- ✓ Agregar una cantidad conocida de nanopartículas bajo agitación constante.
- ✓ Medir el índice de refracción tras 10 minutos de agitación.
- ✓ Dejar reposar por 5 minutos y repetir la medición.

- ✓ Continuar el proceso hasta detectar precipitación visible, lo que indicaría la saturación del sistema.

*4.3.1.3 Compatibilidad de la solución madre con nafta.* Finalmente, se evaluó la mezcla de la solución madre con la nafta para formar el nanofluido en condiciones operativas. El procedimiento fue el siguiente:

- ✓ Tomar un volumen conocido de la solución madre, previamente estabilizada.
- ✓ Agregar nafta bajo agitación constante (300 rpm) hasta alcanzar una concentración de 350 ppm, establecida para la prueba de campo.
- ✓ Confirmar la formación de una sola fase, sin separación ni precipitación, como criterio de compatibilidad.

#### **4.4 Evaluación de riesgos operativos: HAZOP y What If aplicados al piloto**

La identificación y gestión de riesgos operacionales son elementos fundamentales en el diseño de procesos térmicos avanzados como la inyección cíclica de vapor (ICV) con nanopartículas. En este contexto, se desarrolló una evaluación combinada utilizando dos metodologías complementarias: el análisis HAZOP (Hazard and Operability) y el análisis What If, con el fin de anticipar desviaciones críticas, fallas fortuitas y condiciones operativas inusuales. El análisis HAZOP se estructuró siguiendo la metodología clásica por nodos operativos, enfocados en los principales segmentos del sistema: preparación del fluido químico, inyección del sistema químico (nanopartículas + nafta + cosolvente + N<sub>2</sub>), inyección de vapor, remojo térmico y producción post-ICV. Para cada nodo se definieron variables clave (presión, temperatura, flujo, concentración), y se aplicaron palabras guía generar escenarios hipotéticos. Estas desviaciones fueron evaluadas en términos de causas, consecuencias, salvaguardas existentes y recomendaciones específicas.

Paralelamente, el análisis What If se utilizó como herramienta exploratoria para cubrir escenarios que no emergen directamente de desviaciones paramétricas, sino de eventos no rutinarios o fallas fortuitas. Esta técnica fue particularmente valiosa para identificar riesgos asociados a la naturaleza emergente del sistema químico empleado, donde persisten incertidumbres respecto al comportamiento del nanofluido bajo condiciones de yacimiento.

Entre los riesgos identificados se destacan:

- ✓ Posible sobrepresión en la línea de inyección química por obstrucción de válvulas.
- ✓ Pérdida de estabilidad del nanofluido antes o durante la inyección.
- ✓ Fallas en la secuencia de cierre del pozo tras el remojo, generando acumulación de presión.
- ✓ Interacción térmica no controlada entre vapor y residuos químicos, reduciendo la eficiencia térmica.
- ✓ Omisión de la fase de purga entre inyecciones químicas y térmicas, incrementando riesgos de incompatibilidad.

Este análisis se desarrolló a partir de datos técnicos suministrados por la empresa operadora, complementados con simulación numérica y pruebas de laboratorio. Las recomendaciones resultantes fueron integradas en los procedimientos operativos y protocolos de seguridad, consolidando así un diseño preventivo robusto. El detalle completo del análisis de riesgos, incluyendo nodos, parámetros, desviaciones, causas, consecuencias y medidas asociadas, se encuentra documentado en el *Anexo A* del presente trabajo.

#### 4.5 Análisis integrado de resultados experimentales y modelación numérica

##### 4.5.1 Factibilidad experimental

4.5.1.1 *Resultados de las pruebas fluido – fluido.* Los sistemas evaluados se presentan en la Tabla 1. Vale la pena resaltar que estas pruebas de compatibilidad evalúan el escenario más crítico, dado que la proporción de crudo/nanofluido 80/20 en porcentaje volumétrico, es una condición que no se encontrará en campo, puesto que el porcentaje de nanofluido inyectado es bajo, en comparación con el crudo a contactar.

**Tabla 2.**

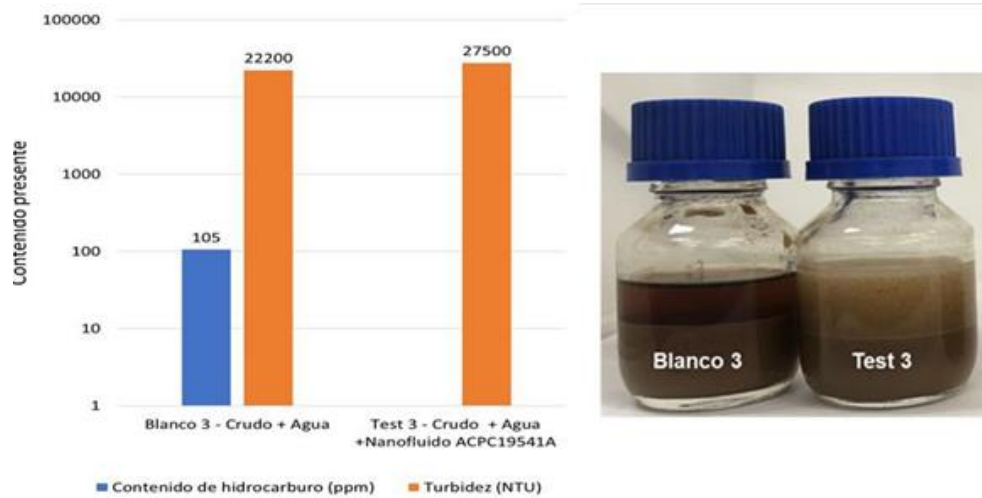
*Sistemas evaluados pruebas de compatibilidad.*

<b>Prueba</b>	<b>Componentes</b>
<b>Blanco 1</b>	Agua pozo estudio
<b>Test 1</b>	Agua pozo estudio + Nanofluido (Nafta-Cosolvente- Nanopartícula)
<b>Blanco 2</b>	Crudo pozo estudio
<b>Test 2</b>	Crudo pozo estudio + Nanofluido (Nafta-Cosolvente- Nanopartícula)
<b>Blanco 3</b>	Crudo + Agua pozo estudio
<b>Test 3</b>	Crudo + Agua pozo estudio + Nanofluido (Nafta-Cosolvente- Nanopartícula)

Inicialmente, se analizaron las fases acuosas. Se adicionó Varsol a las muestras “blanco 3”, y “test 3” (Ver Figura 4), relacionadas en la Tabla 2, con el fin de extraer la fase oleosa, cuantificar el O/W y medir la turbidez que es una medida indirecta de la estabilidad de las emulsiones inversas. Como se observa en la Figura 4, se aumenta levemente la turbidez, lo que sugiere un leve aumento en la estabilidad de las emulsiones inversas (para este campo específico ya son muy estables).

**Figura 4.**

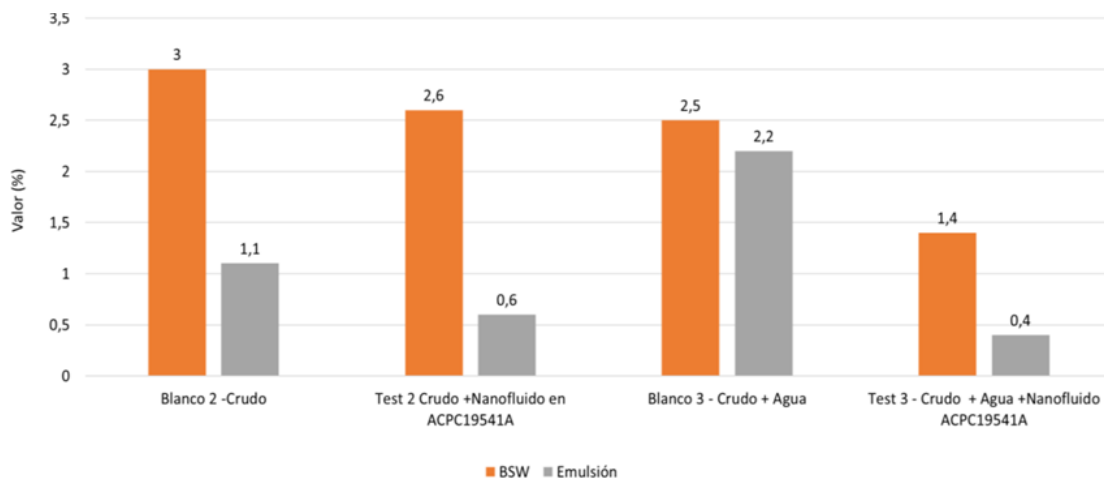
*Análisis de emulsiones inversas O/W.*



Posteriormente, se extrajo el crudo para ser analizado a través de micrografías. Para ello, se retiró toda el agua libre de las botellas “Blanco 3”, “Test 3”, “Blanco 2” Y “Test 2” y se cuantificó el %BSW además del contenido de emulsión residual (Ver Figura 5).

**Figura 5.**

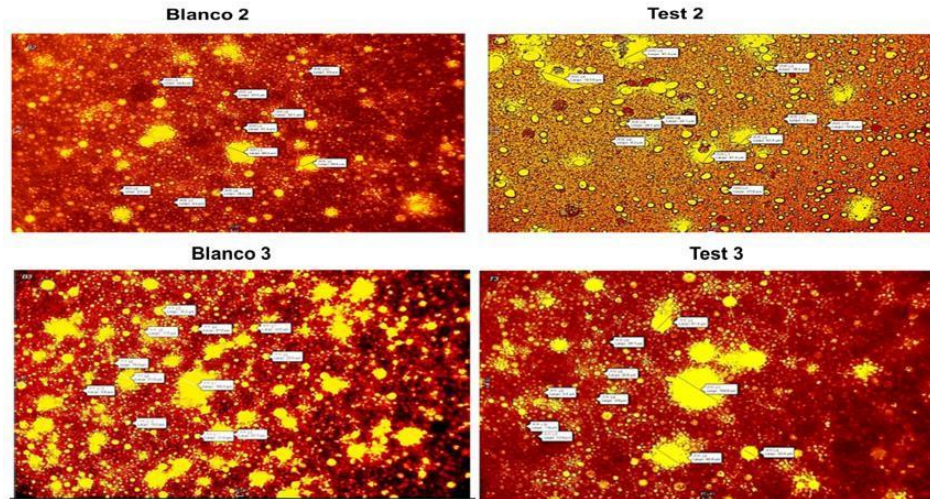
*BSW y Emulsión residual fase aceite test 2 y 3.*



Como se observa en la Figura 6, la presencia del nanofluido no genera estabilización o formación de emulsiones directas. Por el contrario, hace más fácil la deshidratación del crudo. Esto se corrobora con las micrografías y distribución de tamaño de gota, presentadas en las Figuras 7 y 8.

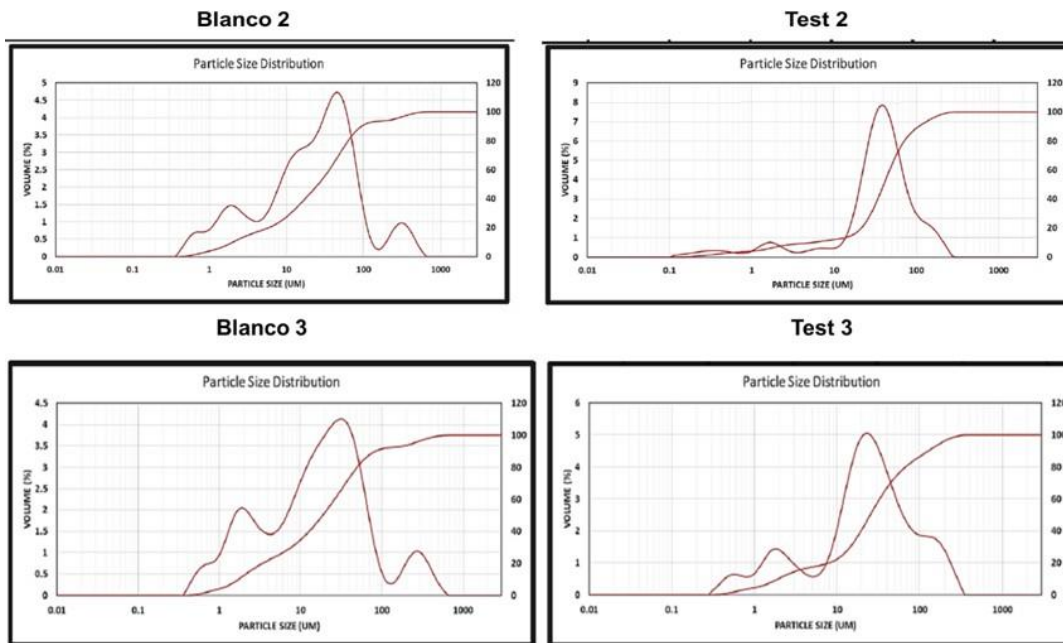
**Figura 6.**

*Micrografía de la matriz del crudo.*



**Figura 7.**

*Distribución del tamaño de gota de la matriz de crudo.*



En la Figura 8, se evidencia que el crudo, tal como se encuentra en yacimiento tiene emulsiones múltiples. El nanofluido no las estabiliza ni genera emulsiones nuevas.

Con respecto a la distribución del tamaño de gota de la matriz del crudo, que se evidencia en la Figura 9, la presencia del nanofluido favoreció la coalescencia de gotas más pequeñas, formando gotas más grandes con respecto a lo blancos, lo que indica que el nanofluido favorece el rompimiento de las emulsiones inversas.

*Resultados concentración máxima de nanopartículas en cosolvente con menor precipitación.* Siguiendo la metodología descrita en la sección anterior se halló la concentración de saturación de las nanopartículas en el cosolvente. Cualitativamente, se observó un cambio de coloración de rojo claro a oscuro al ir aumentando la concentración de nanopartícula. Así mismo, se observó un aumento en la viscosidad aparente del fluido. Las partículas permanecieron dispersas hasta una concentración de 29.000 ppm, una vez se detuvo la agitación, la dispersión se mantiene por diez minutos, después de ese tiempo, es necesario agitar nuevamente. En la Figura 8, se presenta la solución madre preparada a 29.000 ppm, máxima concentración de nanopartículas en el cosolvente a la que no ocurre precipitación mientras se mantenga la agitación. Por su parte, en la Figura 9 se muestra la separación de fases de la solución madre una vez fue llevada a la concentración máxima y se detuvo la agitación. El anterior análisis resultó crucial para el diseño y ejecución de la prueba tecnológica, puesto que dictó la cantidad de surfactante requerido (600 litros), además, confirmó que un isotanque de 1 m<sup>3</sup> era suficiente para la preparación de la solución madre y evidenció la necesidad de someter la solución madre a agitación durante la operación, con el fin de evitar precipitado de las nanopartículas, tal como se realizó durante la implementación en campo.

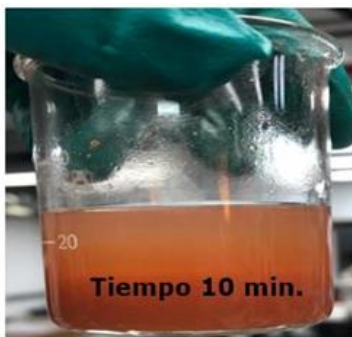
**Figura 8.**

*Máxima concentración de nanopartículas en el cosolvente a la que no ocurre precipitación con agitación.*



**Figura 9.**

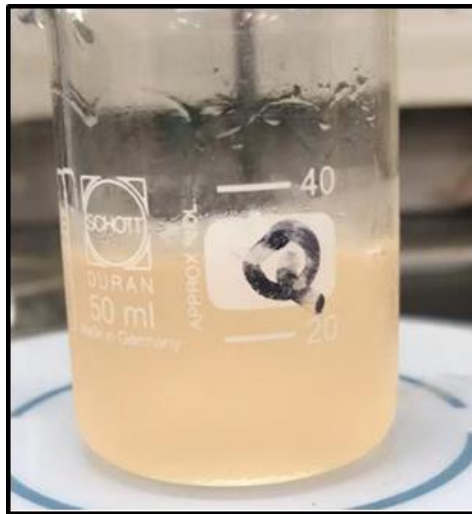
*Separación fases Nanopartícula – Cosolvente ACPC19541A en el tiempo (sin agitación).*



4.5.1.2 *Resultados de compatibilidad de la nafta.* En la figura 15, se observa la compatibilidad, desde un punto de vista cualitativo, de la Nafta con la mezcla Cosolvente Nanopartícula (solución madre), a la concentración objetivo de 350 ppm, es decir, se observa la sinergia de los componentes del nanofluido a inyectar. Se evidencia que bajo agitación (condición de la prueba tecnológica), se forma una única fase, evidenciándose una buena compatibilidad.

**Figura 10.**

*Compatibilidad nanofluido a inyectar (Nafta + cosolvente + nanopartículas) @ 350 ppm.*



4.5.2 *Simulación numérica*

Una vez definido el pozo candidato se corrieron diversos escenarios de simulación para establecer el esquema de inyección que arrojará la mayor producción incremental. Debe mencionarse que la estrategia y equipos de inyección fueron cambiando en el tiempo debido a los retos inherentes al manejo de nafta. Después de un ejercicio “What If”, se concertó una alternativa que viabilizara la prueba cumpliendo con los lineamientos HSE. Evidentemente, la elección del esquema de inyección debe ser una decisión respaldada en simulación numérica. En este estudio se reportó únicamente el escenario escogido para implementar en campo a partir de la información del equipo de ingeniería. El desarrollo de la simulación se hizo en un modelo suministrado por el equipo, candidato a implementación de la tecnología híbrida de inyección alternada de vapor con solventes mejorados con nanopartículas, usando el simulador de yacimientos CMG (BUILDER, STARS y RESULTS). El modelo base está construido en una malla cartesiana con las propiedades como se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3.**

*Propiedades del Grid de simulación.*

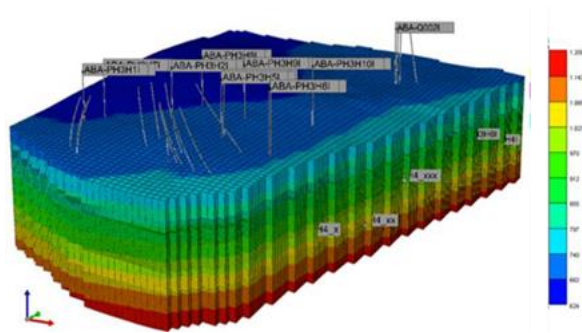
Propiedad	Valor
Divisiones i	55
Divisiones j	84
Divisiones k	117
Total de Celdas	540540

El modelo cuenta con 10 pozos productores y 10 inyectores en la misma posición de los productores con el fin de representar el proceso de inyección cíclica de vapor, los cuales se encuentran perforados en las arenas correspondientes a cada pozo, tal como se muestra en la Figura 11. Las propiedades petrofísicas del modelo se muestran en la Tabla 4 y la

distribución de permeabilidades en la Figura 12.

**Figura 11.**

*Modelo de simulación de la plataforma seleccionada para la implementación de la tecnología.*



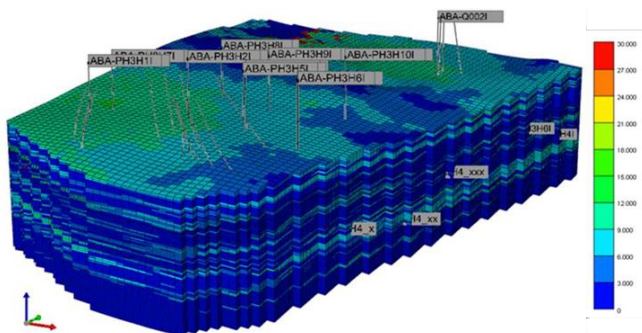
**Tabla 4.**

*Propiedades petrofísicas del modelo de simulación.*

Propiedad	Valor	Unidad
Porosidad	26	%
Profundidad	624 - 1200	ft
Presión inicial	668	Psi
Compresibilidad de la formación	$28,9 \times 10^{-6}$	1/Psi

**Figura 12.**

*Distribución de la permeabilidad de la plataforma 3 del campo Abarco.*



de producción y del último ciclo de inyección de vapor del pozo de estudio con el fin de establecer el escenario base de inyección alternada de vapor. Las propiedades del caso base se presentan en la Tabla 5.

**Tabla 5.**

Propiedades inyección - producción del escenario base (inyección alternada de vapor).

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Tasa de inyección de vapor	2700	Bbl/día
Temperatura de Inyección	528	°F
Calidad de vapor	0.6	Fracción
Presión de inyección	1500	Psi
Esquema de inyección	17 días bache de vapor + 3 días de remojo	

Posteriormente, se generó el esquema base para la inyección del nanofluido, que será inyectado en conjunto con nitrógeno. Las propiedades de inyección del nanofluido se muestran en la Tabla 5.

**Tabla 6.**

*Propiedades para la inyección de nanofluidos.*

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Volumen de nanofluido inyectado	270	Bbl
Temperatura de inyección de nanofluido	105	°F
No. de ciclo de inyección	20	
Tiempo de inyección nanofluido	4,5	horas
Presión de inyección	1500	Psi
Esquema de inyección nanosolvente	3h de inyección de N <sub>2</sub> + 4,5h co-inyeccion nano + N <sub>2</sub> + 3h de inyección de N <sub>2</sub>	

#### 4.5.3 Análisis de sensibilidad: tasa de inyección de vapor óptima

Una vez construido el escenario base de inyección de vapor y las condiciones de la inyección de nanofluido (que se mantendrán constantes), se sensibilizó la tasa de inyección de vapor teniendo como función objetivo la producción de aceite. Esto con el fin de evidenciar si era posible disminuir los días de inyección de vapor y en consecuencia el requerimiento de gas y obtener resultados idénticos de producción incremental. La inyección del nanofluido se hace en

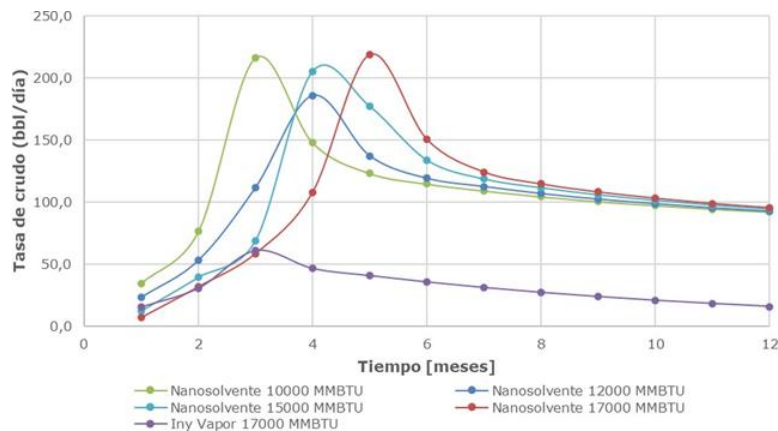
frío precediendo el ciclo de inyección de vapor. Los escenarios propuestos para la sensibilidad fueron:

- ✓ Inyección de vapor posterior al nanofluido, aumentando un 10% del agua equivalente inyectada con respecto al ciclo anterior, es decir 17.000 MMBTU. Esta es una “regla del dedo gordo” que se usa con frecuencia.
- ✓ Inyección de vapor de 15000 MMBTU posterior a la inyección de nanofluido.
- ✓ Inyección de vapor de 12000 MMBTU posterior a la inyección de nanofluido.
- ✓ Inyección de vapor de 10000 MMBTU posterior a la inyección de nanofluido.

Como se muestra en la Tabla 6, la implementación de la tecnología híbrida consiste en la inyección de nitrógeno, posterior coinyección del nanofluido base nafta – nitrógeno, y finalmente, un bache de nitrógeno como espaciador entre el nanosolvente y el vapor. En todos los escenarios, la tasa de inyección de nitrógeno fue de 1200 m<sup>3</sup>/h (aun cuando se inyecta únicamente nitrógeno) y la tasa de vapor por día fue de 2.700 bbl/d (1.000 MM BTU). En la Figura 13, se muestran los distintos escenarios de sensibilidad evaluados.

**Figura 13.**

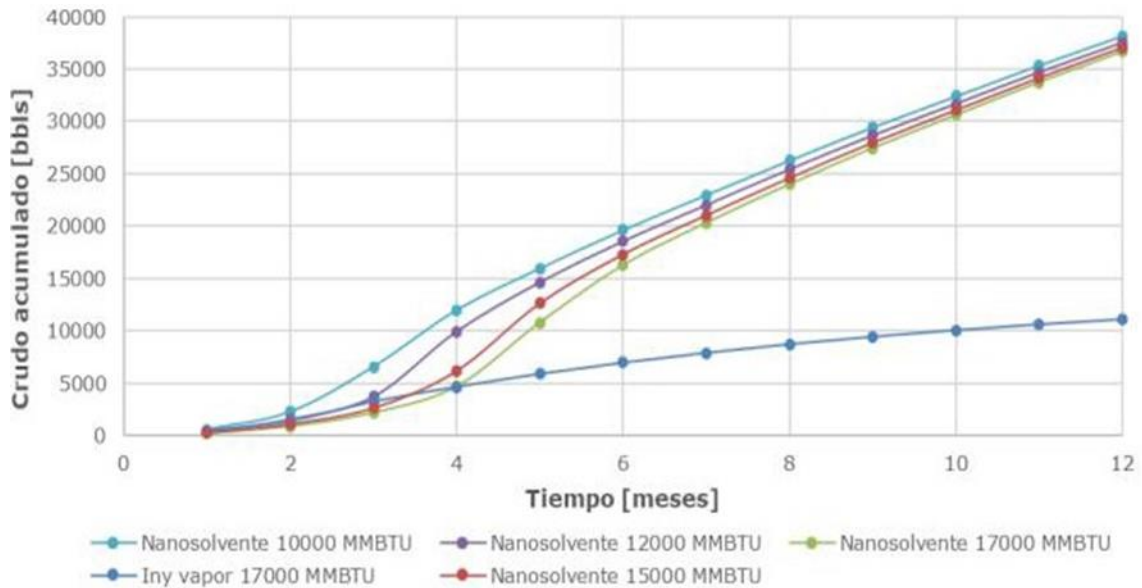
*Tasa de producción de aceite para los escenarios evaluados: IAV y nanofluidos.*



Como se puede ver en la Figura 13, el pico de producción se desplaza a la izquierda con la reducción de la tasa de vapor, lo que genera una producción temprana y sostenida que en este caso favorece la tecnología híbrida con relación a la línea base de vapor de 17.000 MMBTU. El área bajo las curvas de cada escenario mostrado en la Figura 13, representa la producción incremental acumulada. Para efectos de determinar con mayor detalle los cambios en producción de cada esquema de inyección se seleccionó una ventana de observación de 1 año (12 meses), que es el espacio temporal en el que se considera efectiva tanto la tecnología híbrida, como el ciclo convencional de vapor. De la Figura 14 se infiere que la mayor producción incremental acumulada se obtiene para el escenario donde se inyectan 10.000 MMBTU de calor en conjunto con el bache diseñado de nanofluidos presentado en la Tabla 5. Lo anterior es una palanca de valor muy importante para la tecnología, ya que implica: bajar el tiempo de inyección de vapor de 17 a 10 días, con lo que se reduce el tiempo no productivo del pozo por la intervención; disminuir el requerimiento de gas en un 42% y en consecuencia las emisiones de  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  en el mismo porcentaje, además de aumentar la eficiencia energética. Los resultados de esta simulación instaron al equipo a disminuir el tiempo de inyección de vapor a 10 días durante la prueba tecnológica, con lo que, los beneficios descritos ya se pueden contabilizar.

**Figura 14.**

*Producción acumulada de aceite para los escenarios evaluados: IAV y Nanofluidos.*

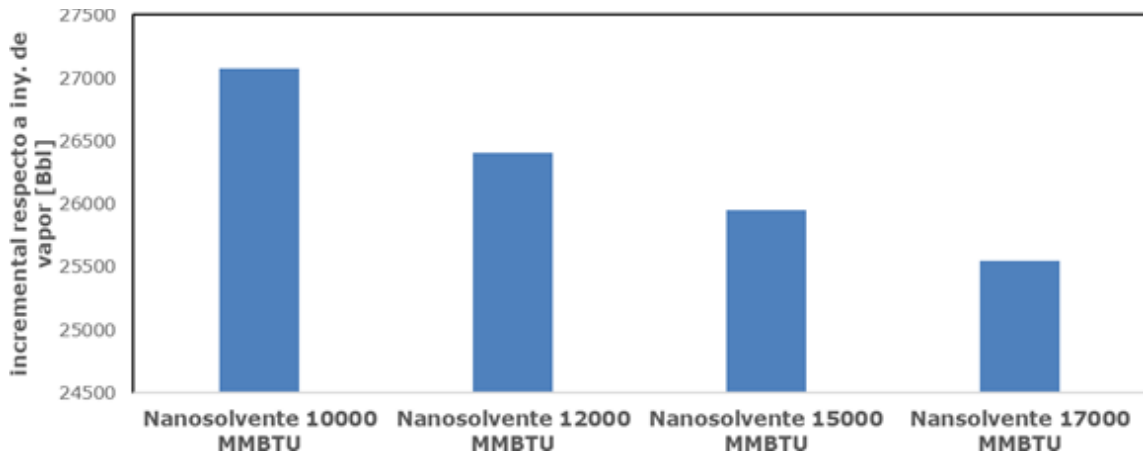


Para mostrar con mayor contundencia el resultado del escenario de inyección de nanofluido con 10.000 MMBTU de calor, se realizó un gráfico de barras de la producción incremental debida únicamente a la tecnología. Esto se obtiene restando el incremental de cada escenario con el incremental atribuido a la inyección del ciclo convencional de vapor de 17.000 MM BTU. Como

se puede inferir, la mayor producción incremental se da al inyectar los 270 bbl de nanofluido + 10.000 MMBTU de calor, fijándose como producción incremental objetivo y la palanca de vapor de esta tecnología para el pozo de estudio 27.000 bbl de aceite acumulado en un año de evaluación.

**Figura 15.**

*Producción incremental de los escenarios de tecnología híbrida evaluados respecto a la inyección de vapor convencional.*



#### 4.6 Manual de diseño integrado para un piloto de inyección cíclica de vapor optimizado mediante nanopartículas

##### 4.6.1 Introducción

La creciente necesidad de incrementar la recuperación de crudos pesados bajo condiciones operativas seguras y ambientalmente sostenibles ha impulsado el desarrollo de nuevas tecnologías en procesos térmicos. En ese contexto, la inyección cíclica de vapor (ICV) con aditivos nanofluídicos ha emergido como una alternativa viable para optimizar la eficiencia térmica y reducir los riesgos operacionales en campos maduros o de baja productividad. Este manual presenta una guía operativa detallada para la ejecución de un piloto de ICV optimizado mediante el uso de nanopartículas funcionalizadas, formuladas en una mezcla con nafta, Tween 80 y asistidas por nitrógeno (N<sub>2</sub>) como fluido de acarreo y barrido. La implementación de este piloto se fundamenta en estudios previos de laboratorio, simulaciones numéricas y un análisis riguroso de

seguridad mediante estrategias de evaluación de riesgo estructuradas, lo que garantiza un diseño robusto orientado a la mitigación de desviaciones críticas.

*4.6.1.1 Objetivo y alcance del manual.* El propósito principal de este documento es estandarizar el procedimiento de ejecución del piloto, integrando tanto las mejores prácticas operativas como los lineamientos de seguridad de procesos y control ambiental. Para ello, se soportará en un análisis tipo *What If*. La información aquí contenida ha sido estructurada para ser utilizada por ingenieros de producción, personal HSE, supervisores de campo y operadores, facilitando una ejecución confiable, eficiente y replicable del proceso, bajo una cultura operativa basada en la prevención, la eficiencia energética y la sostenibilidad ambiental.

*4.6.1.2 Base técnica.* La operación del piloto de inyección cíclica de vapor optimizado con nanopartículas se sustenta en fundamentos técnicos derivados de estudios experimentales, modelación numérica y criterios de ingeniería de procesos aplicados a recuperación térmica en crudos pesados. El proceso combina una fase inicial de inyección de un sistema químico compuesto por nanopartículas funcionalizadas dispersas en nafta, estabilizadas con Tween 80 y transportadas con nitrógeno ( $N_2$  de 95 % de pureza), seguida por una etapa térmica con inyección continua de vapor durante 10 días, bajo condiciones diseñadas previamente por simulación. Las nanopartículas seleccionadas poseen propiedades que contribuyen a mejorar la eficiencia del recobro térmico, incluyendo:

- ✓ Mejora en la conductividad térmica del fluido, facilitando un frente de calor más uniforme;
- ✓ Efectos catalíticos parciales, asociados a la ruptura de fracciones pesadas del crudo, contribuyendo al *upgrading in situ*.

El diseño operativo también considera criterios de selección del pozo candidato (baja productividad, viscosidad de crudo  $>1000$  cP, temperatura de fondo  $< 80$  °C), así como condiciones límite de presión, temperatura y caudales, definidos mediante simulación numérica. Estas

simulaciones permitieron prever la respuesta térmica del sistema, dimensionar los volúmenes de inyección y establecer los tiempos óptimos para cada fase: 6 horas de N<sub>2</sub> previo, 4,5 horas de inyección química, 6 horas de N<sub>2</sub> postinyección, seguidas por 10 días de vapor. En la Figura 16 se presenta un esquema general del procedimiento operativo, el cual sintetiza las etapas clave y su secuencia en campo.

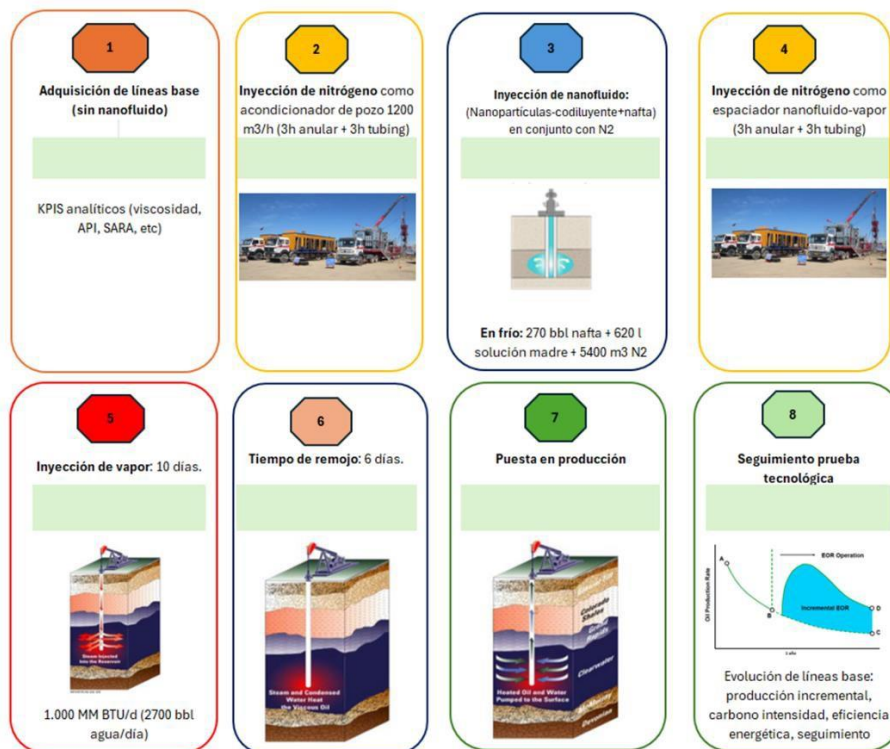


Figura 16. Esquema general de la prueba tecnológica.

#### 4.6.2 Consideraciones técnicas del proceso

El piloto de inyección cíclica de vapor optimizado con nanopartículas se desarrollará bajo condiciones operativas previamente definidas con base en simulación numérica, pruebas de laboratorio y criterios técnicos suministrados por la compañía operadora. Las variables clave del proceso, como temperatura, presión de inyección, caudales y tiempos de exposición, fueron ajustadas para garantizar un balance entre eficiencia térmica, estabilidad del nanofluido y seguridad operativa. Las condiciones seleccionadas incluyen: una etapa inicial de inyección de

nitrógeno durante 6 horas (a 1200 m<sup>3</sup>/h), seguida por la inyección del químico (nanopartículas + nafta + Tween 80 + N<sub>2</sub> al 95% de pureza) durante aproximadamente 4,5 horas (270 bbl). Posteriormente, se inyecta nuevamente nitrógeno por 6 horas para garantizar el barrido del sistema y evitar mezclas no deseadas, y finalmente se da paso a la inyección de vapor durante 10 días como fase térmica del ciclo. Este procedimiento tiene un alcance aplicado, centrado en la validación operativa de la tecnología bajo condiciones reales de yacimiento. No se contempla, en esta etapa, la ampliación del piloto a escala comercial, ni la comparación entre diferentes formulaciones químicas. Sin embargo, los resultados obtenidos serán fundamentales para establecer parámetros de referencia, identificar buenas prácticas y formular recomendaciones para futuras replicaciones.

#### *4.6.3 Procedimiento Operativo Estandarizado (POE)*

El siguiente procedimiento establece las recomendaciones operativas para la ejecución segura, eficiente y controlada del piloto de inyección cíclica de vapor optimizado con nanopartículas. Estas recomendaciones se sustentan en la información técnica disponible, resultados de simulación numérica y validaciones experimentales.

*4.6.3.1 Preparación de la prueba.* La etapa de preparación de la prueba asegura que todos los elementos técnicos y químicos estén listos antes de la ejecución del piloto. Incluye la validación del pozo, la compatibilidad del nanofluido y la integración de parámetros operacionales. Su correcta ejecución minimiza riesgos y garantiza una operación segura. Es fundamental para establecer condiciones iniciales confiables.

1. Verificar las concentraciones y estabilidad de la solución madre mediante análisis refractométrico y pruebas de reposo para asegurar homogeneidad antes de su mezcla con la nafta.

2. Realizar pruebas funcionales del sistema de agitación mecánica, validando que cumpla con las RPM requeridas para una adecuada dispersión de las nanopartículas.
3. Revisar condiciones de compatibilidad entre nafta y solución madre, con pruebas de mezcla en laboratorio antes de la operación.
4. Implementar un procedimiento de agitación secuencial y progresiva para la incorporación de nanopartículas al cosolvente, reduciendo el riesgo de aglomeración.
5. Contar con hojas de seguridad (MSDS) actualizadas de cada insumo, y disponerlas en el área de preparación del nanofluido.
6. Capacitar al personal en el procedimiento de mezclado y control de calidad del nanofluido, incluyendo criterios de aceptación y rechazo.
7. Asegurar que las condiciones operativas definidas en simulación (como concentración, temperatura y viscosidad del sistema) sean replicables en condiciones de laboratorio y campo.
8. Validar que las propiedades del nanofluido estén dentro del rango de compatibilidad establecido por la simulación, especialmente para condiciones de inyección y dispersión.
9. Establecer puntos de control de calidad del fluido que aseguren que las condiciones esperadas del simulador se mantengan durante la preparación y manipulación.
10. Verificar disponibilidad y funcionamiento de equipos críticos como bombas dosificadoras, tanques de mezcla, líneas de nitrógeno y sistemas de agitación.
11. Establecer un procedimiento estandarizado de arranque para los sistemas de dosificación, asegurando que el personal esté entrenado y se minimicen errores operativos.

12. Realizar simulacros con agua antes del mezclado real, para entrenar al personal y detectar posibles desviaciones del procedimiento.
13. Verificar la limpieza y ausencia de humedad en los recipientes de preparación, evitando reacciones indeseadas o contaminación cruzada.
14. Asegurar almacenamiento adecuado de químicos, cumpliendo normativas de seguridad industrial y manejo de inflamables.
15. Verificar la calibración de instrumentos de medición (balanzas, refractómetros, termómetros), con trazabilidad validada.
16. Establecer comunicación operativa efectiva entre las áreas técnica, de seguridad y supervisión, con bitácoras de verificación y rutas de acción inmediata.

*4.6.3.2 Inyección de químicos.* Durante la etapa de inyección química, se ejecuta el desplazamiento del nanofluido hacia el pozo bajo condiciones cuidadosamente controladas. Esta fase crítica requiere precisión operativa y medidas específicas para garantizar la integridad del sistema, la eficiencia del tratamiento y la seguridad del personal y las instalaciones.

1. Se recomienda establecer un protocolo detallado para la ejecución de la inyección química, el cual debe contemplar condiciones iniciales de arranque, secuencia exacta de apertura y cierre de válvulas, presiones operativas máximas admisibles, caudales objetivo, puntos específicos de muestreo y un plan de acción frente a desviaciones operativas o interrupciones del sistema.
2. La bomba dosificadora debe ser calibrada con trazabilidad metrológica antes de cada operación. Esto incluye prueba de caudal constante bajo carga, trazado de la curva de respuesta del equipo, y verificación del correcto funcionamiento de válvulas antirretorno para asegurar una dosificación precisa y segura.

3. Se recomienda instalar un sistema redundante de medición de volumen inyectado, compuesto por un caudalímetro con registro digital en tiempo real y un sistema de verificación manual por vasos de calibración. Ambos sistemas deben estar conectados a una unidad de adquisición de datos (DAQ) para garantizar trazabilidad operativa.
4. Antes de iniciar la inyección del nanofluido, se debe realizar una purga de las líneas con nitrógeno seco (mínimo 95% de pureza) durante al menos 30 minutos. Este paso es crítico para eliminar residuos líquidos, aire o contaminantes que puedan generar reacciones indeseadas, pérdida de estabilidad en el fluido o riesgo de sobrepresión.

*4.6.3.3 Inyección de vapor.* Durante la etapa de inyección de vapor, se transfiere energía térmica al yacimiento con el objetivo de reducir la viscosidad del crudo, favorecer su expansión y movilización, y activar el drenaje térmico. Esta fase demanda un control riguroso de temperatura, presión y caudales para asegurar un barrido térmico eficiente y evitar sobrepresiones o pérdidas térmicas excesivas. A continuación, se presentan las recomendaciones técnicas para su ejecución en campo

1. Definir un protocolo de arranque térmico que incluya el monitoreo progresivo de la presión fondo y cabeza, con incrementos controlados que eviten impactos térmicos abruptos en la formación o en los componentes del pozo.
2. Instalar sensores redundantes de temperatura y presión en superficie y fondo para asegurar una lectura confiable en tiempo real, con transmisión continua al sistema SCADA y alarmas configuradas ante desviaciones críticas.
3. Controlar el caudal de vapor a través de válvulas modulantes conectadas a controladores automáticos, con rangos calibrados para mantener un flujo constante de acuerdo con las condiciones esperadas de inyectividad y respuesta térmica.

4. Evaluar la calidad del vapor (título) antes y durante la inyección mediante instrumentos en línea, garantizando una entrega mínima del 80% de vapor seco en condiciones de boca de pozo.
5. Documentar en planillas operativas cada ciclo de presión, temperatura y volumen acumulado de vapor inyectado, para su posterior análisis en conjunto con la respuesta de producción.

*4.6.3.4 Etapa de remojo y transferencia de calor.* Durante la fase de remojo, el pozo permanece cerrado tras la inyección de vapor y nanofluido, permitiendo que el calor penetre en la matriz de la roca y actúe sobre el crudo pesado, reduciendo su viscosidad y promoviendo su movilización. Esta etapa es crítica para el éxito del proceso, ya que define en gran medida la eficiencia térmica alcanzada. Su adecuada supervisión y control minimizan riesgos operacionales y permiten ajustar parámetros para procesos futuros.

1. Programar registro continuo o con frecuencia mínima de cada 6 horas mediante sondas electrónicas, para evitar acumulaciones de presión no detectadas durante el cierre del pozo.
2. Establecer un umbral máximo de presión de fondo conforme a los criterios de diseño e integridad mecánica del pozo. Incorporar este valor al sistema de alarmas y automatización operativa.
3. Utilizar sensores térmicos de fondo o registradores de memoria para medir la evolución de la temperatura durante el cierre. Registrar y comparar con curvas térmicas esperadas.
4. Construir y utilizar una curva térmica teórica, derivada de simulación numérica, como referencia para interpretar la disipación del calor durante el tiempo de remojo.

5. Incluir un análisis de disipación térmica previsto, basado en propiedades térmicas del yacimiento, para evaluar la efectividad del tiempo de cierre.
6. Incluir en el plan de remojo un esquema de monitoreo térmico posterior a la inyección que permita hacer seguimiento a la persistencia del frente térmico.
7. Integrar sistemas automáticos de alerta para detectar aumentos súbitos de presión, activando protocolos de respuesta rápida en superficie.
8. Establecer mecanismos de comparación entre datos reales y proyectados para detectar retrocesos térmicos o pérdidas de calor inesperadas.
9. Implementar una bitácora técnica donde se consignen las variaciones térmicas de fondo, presión y tiempos de cierre durante al menos 48 horas.
10. Desarrollar un protocolo técnico que incluya acciones ante desviaciones térmicas (sobrecalentamiento, retroceso o pérdida rápida de calor), con decisiones de reapertura, extensión de remojo o enfriamiento controlado.

*4.6.3.4 Etapa de producción.* La fase de producción posterior a un tratamiento térmico con nanofluidos requiere de un control operativo riguroso para asegurar la estabilización del sistema, el levantamiento efectivo del crudo movilizado, y la identificación temprana de cualquier desviación respecto a lo proyectado. Una correcta línea base de comparación, junto con protocolos de monitoreo y evaluación, es esencial para validar los efectos del tratamiento y generar aprendizaje operativo.

1. Registrar al menos 30 días previos de datos de producción, incluyendo tasa diaria, API y porcentaje de agua, para establecer una referencia confiable.

2. Elaborar un esquema de seguimiento con KPIs definidos (caudal, calidad, corte de agua, presión de fondo), incluyendo monitoreo diario en la primera semana, semanal durante el primer mes, y mensual en el trimestre posterior.
3. Realizar limpieza mecánica o química de líneas de superficie antes del arranque de producción para evitar contaminación o interferencias químicas.
4. Iniciar producción solo cuando se confirme una estabilización térmica de fondo compatible con la curva térmica proyectada tras el remojo.
5. Tomar muestras representativas en los primeros días de producción para analizar estabilidad de emulsiones, presencia de nanopartículas y compatibilidad con el sistema de tratamiento.
6. Realizar análisis diario de densidad API, viscosidad y corte de agua durante al menos 10 días, utilizando laboratorios certificados.
7. Consolidar todos los datos de operación, monitoreo, laboratorio y curvas de producción en un informe de evaluación de desempeño.
8. Superponer la curva real de producción con la esperada según simulación, e interpretar desviaciones mediante análisis de sensibilidad.
9. Registrar en una bitácora operativa las anomalías térmicas, de producción o de comportamiento del pozo, con fecha, descripción y acción tomada.
10. Definir un plan ante eventos inesperados, como caída de presión, aparición de sólidos, retroceso térmico, o incompatibilidades químicas.
11. Asegurar que los datos recogidos se integren a la plataforma digital de análisis de producción, para trazabilidad institucional y optimización futura.

12. Confirmar limpieza y eliminación de residuos químicos o mezclas incompatibles antes del arranque de producción definitiva.

## Conclusiones

En este capítulo se sintetizan los hallazgos técnicos y operativos obtenidos a partir del diseño del manual de operaciones para el piloto de inyección cíclica de vapor con nanopartículas. Se abordaron los aspectos clave del procedimiento, las condiciones operativas definidas, y la aplicación de metodologías de análisis de riesgo como herramientas de control para garantizar la integridad del proceso.

Gracias a la integración de la información obtenida en las simulaciones numéricas, el trabajo de campo y las pruebas de laboratorio, fue posible desarrollar un manual de operaciones completo y fundamentado para el piloto de ICV optimizado con nanofluidos. La estructuración de este manual incorpora criterios de ingeniería de procesos, eficiencia operativa y análisis de riesgo, garantizando una ejecución controlada y segura. Además, la incorporación sistemática de las desviaciones identificadas mediante los estudios HAZOP y What If permitió robustecer los procedimientos, estableciendo barreras preventivas y correctivas específicas que aseguran la confiabilidad y replicabilidad del diseño operativo.

Las pruebas de laboratorio, el análisis de compatibilidad y la simulación numérica confirmaron la viabilidad técnica del uso de nanofluidos en ICV, demostrando estabilidad del sistema químico, mejor movilidad del crudo y mayor eficiencia del proceso térmico. La determinación de la concentración máxima en cosolvente y la compatibilidad con nafta garantizaron la estabilidad del sistema químico bajo condiciones operativas reales. Posteriormente, la simulación numérica permitió seleccionar el esquema de inyección más eficiente, optimizando el contacto térmico, la movilización del crudo y el desempeño productivo del pozo.

El análisis HAZOP identificó desviaciones críticas como sobrepresión, incompatibilidades químicas y fallas en secuencias operativas, mientras que el What If permitió anticipar eventos no rutinarios relacionados con el uso de nanofluidos. A su vez, la simulación demostró que reducir la tasa de inyección de vapor a 10.000 MMBTU, en conjunto con el nanofluido, aumenta la producción incremental, disminuye el tiempo no productivo del pozo, reduce el consumo de gas en 42 % y mitiga las emisiones de CO<sub>2</sub>. Esto evidencia que la tecnología híbrida es más segura, eficiente y ambientalmente favorable que el ciclo convencional de vapor.

La metodología empleada, soportada en datos experimentales, modelado de yacimiento y análisis de escenarios operativos, establece una base técnica robusta para validar procesos EOR térmicos con aditivos funcionales. La integración de criterios de seguridad de procesos, eficiencia térmica y control operacional fortalece un enfoque replicable para la planificación e implementación de pilotos industriales de tecnología avanzada.

### Recomendaciones

Definir ventanas operativas de concentración y estabilidad del nanofluido sustentadas en pruebas fluido–fluido, índice de refracción, comportamiento reológico y estabilidad coloidal. Estas condiciones deben ser verificadas tanto en laboratorio como en campo, incorporando control de agitación, temperatura y miscibilidad para evitar precipitación o aglomeración durante preparación, transporte e inyección.

Calibrar el modelo con datos de laboratorio y producción real para definir volúmenes, caudales, presión, duración del remojo y número de ciclos. Esta integración permite anticipar el comportamiento térmico del yacimiento, optimizar la eficiencia energética y ajustar el proceso en tiempo real para maximizar la producción incremental.

Replicar en operación las condiciones definidas en simulación (tasa de inyección, temperatura, calidad de vapor, concentración del nanofluido, tiempos de  $N_2$ ) y ajustar parámetros solo con respaldo de datos medidos en sitio. Esto permite mantener la efectividad del diseño térmico, mejorar la penetración del nanofluido y asegurar la comparabilidad entre resultados proyectados y reales.

Establecer un sistema de seguimiento con KPIs técnicos y térmicos (caudal, corte de agua, API, presión de fondo, curva de disipación térmica) junto con sensores y registros digitales en tiempo real. La comparación entre comportamiento real y escenarios simulados permite diagnosticar desviaciones, evaluar el desempeño del tratamiento y retroalimentar el modelo para procesos futuros.

Asociar cada desviación identificada (sobrepresión, incompatibilidad química, falla de secuencia o pérdida térmica) a barreras específicas en campo, como purga previa con  $N_2$ , sensores

redundantes, alarmas, protocolos de cierre seguro y planes de contingencia. Esta integración fortalece la seguridad del proceso, reduce fallas operativas y mejora la replicabilidad de la tecnología.

### Referencias bibliográficas

- Alfaro, S., & Sánchez, M. (2021). Estudios de factibilidad para procesos EOR con nanopartículas metálicas. *Revista Colombiana de Energía*, 33(2), 45–57.
- Alvarado, V., & Manrique, E. (2019). Enhanced Oil Recovery: An Update Review. *Energies*, 12(9), 1667. <https://doi.org/10.3390/en12091667>
- Amani, M., et al. (2023). Operational safety assessment of steam injection pilots using HAZOP and QRA techniques. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 225, 104227.
- Arslan, C., et al. (2022). Application of nanotechnology in oil field scale: A comprehensive field study. *Journal of Molecular Liquids*, 365, 120070. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.120070>
- Baviere, M. (2021). Basic Concepts in Enhanced Oil Recovery Processes. Editions Technip.
- Bayat, A. E., et al. (2020). Review of recent advancements in nano-EOR techniques: from laboratory to field. *Petroleum Science*, 17(3), 1011–1042. <https://doi.org/10.1007/s12182-020-00446-2>
- Cano, C. A., et al. (2021). Aplicación de técnicas HAZOP y What if en procesos de inyección térmica en Colombia. *Revista Ingeniería y Seguridad*, 9(1), 22–35.
- Chengara, A., et al. (2022). Operationalizing nanoparticle-assisted steam injection: Field trials and learnings. *SPE Journal*, 27(4), 1789–1802. <https://doi.org/10.2118/205899-PA>
- Darabi, F., et al. (2021). Thermal behavior of nanoparticles in cyclic steam stimulation. *Journal of Petroleum Science*, 58(4), 402–415.
- Delgado, L. F., & Castillo, J. C. (2021). Evaluación de riesgos operacionales mediante metodología What if en pruebas piloto EOR. *Revista de Ingeniería Petrolera*, 35(1), 67–78.
- El-Diasty, A. I., & Aly, A. M. (2015). Applications of Nanotechnology in the Oil & Gas Industry: Latest Trends Worldwide & Future Challenges in Egypt. *Egyptian Journal of Petroleum*, 24(1), 1–7.
- Flores, J. R., et al. (2022). Modeling thermal front behavior in nanoparticle-assisted CSS. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 61(2), 23–36.
- García, M., & Pineda, J. (2021). Inyección de vapor con nanofluidos: Avances en campos maduros. *Revista Latinoamericana de Energía*, 44(3), 15–28.
- Gupta, R., & Mohanty, K. K. (2019). Wettability alteration mechanisms of nanoparticle dispersions in oil recovery. *Energy & Fuels*, 33(1), 612–620.

- Hamida, T., et al. (2023). HAZOP-based design optimization in nanoparticle-enhanced EOR. *Energy Reports*, 9, 980–995.
- Hernández, D. A., & Vargas, E. (2022). Análisis de integridad y eficiencia térmica en pilotos de inyección cíclica de vapor. *Revista Técnica Energética*, 39(4), 41–55.
- Jung, H., et al. (2021). Integration of simulation and laboratory data for optimized nano-EOR field design. *Journal of Petroleum Technology*, 73(5), 56–63.
- Kanj, M. Y., et al. (2020). Field application of nanotechnology in EOR operations. SPE International Conference on Oilfield Chemistry. <https://doi.org/10.2118/199756-MS>
- Kumar, R., et al. (2023). Design and implementation of nanoparticle-based chemical EOR in South Asia. *Journal of Energy Resources Technology*, 145(6), 064501.
- Lee, C., & Kim, J. (2021). Risk analysis and thermal instability in cyclic steam injection with additives. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 74, 104588.
- Li, Z., et al. (2020). A review on field applications of nanofluids for EOR. *Fuel*, 265, 116947.
- Liu, J., et al. (2022). Heat retention and injectivity performance of metal oxide nanoparticles in heavy oil reservoirs. *Fuel*, 320, 123896.
- Mendoza, F., & Carrillo, A. (2022). Nanopartículas metálicas en recuperación mejorada: Revisión técnica para campos colombianos. *Revista de Energía y Petróleo*, 27(2), 71–85.
- Morales, A. M., et al. (2021). Thermal EOR pilot design using HAZOP and simulation feedback. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 143(8), 081008.
- Nasr, T. N., & Ayodele, O. R. (2020). *Thermal EOR Processes: Fundamentals and Field Applications*. Gulf Professional Publishing.
- Pereira, E., et al. (2019). Development of chemical slugs with nanoparticle carriers for oil mobility improvement. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 182, 106320.
- Quintero, L. J., & Suárez, P. R. (2023). *Manual de seguridad operativa para pilotos térmicos con nanofluidos*. Fondo Editorial de Ingeniería Energética.
- Rivas, H., & Pérez, J. D. (2021). Diseño metodológico para evaluación de riesgo operacional en inyección química térmica. *Revista Seguridad y Operación*, 18(2), 13–24.
- Rodríguez, C., et al. (2022). Aplicación integrada de simulación, pruebas de laboratorio y HAZOP en campo piloto. *Revista de Ingeniería Aplicada*, 11(3), 89–104.

Wang, X., et al. (2020). Transport behavior of nanoparticles in thermal EOR processes. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 603, 125243.

Zambrano, D. F., & Torres, M. I. (2021). Simulación numérica y criterios de diseño para pruebas piloto con nanofluidos térmicos. *Revista de Modelación de Yacimientos*, 14(1), 25–37.