



Reporte entregable 8

Caso de uso de aplicación de IA e IAGEN

Optimización de Agua y Energía en Fracturación – Vaca Muerta, Neuquén

I. Introducción

Vaca Muerta se ha consolidado como uno de los principales yacimientos de shale oil y gas de Argentina, caracterizado por operaciones intensivas en fracturación hidráulica. Esta técnica, que requiere la inyección de grandes volúmenes de agua combinados con aditivos y arena, presenta desafíos significativos en el consumo de recursos hídricos y energía. En este contexto, la Inteligencia Artificial Generativa (IAGEN) se propone como una solución disruptiva para transformar estos procesos, maximizando la eficiencia operativa y reduciendo costos.

La formación Vaca Muerta se ha convertido en un motor fundamental para la producción de hidrocarburos en Argentina, impulsando la producción nacional de petróleo y gas a niveles cercanos a récords históricos.

La explotación de estos recursos es de gran importancia estratégica para Argentina.

El desarrollo de Vaca Muerta no solo busca aumentar la producción de hidrocarburos y disminuir la dependencia de las importaciones, sino también fomentar el desarrollo regional a través de la creación de empleo y avances tecnológicos en la extracción.

De hecho, las exportaciones de petróleo y gas ya contribuyen de manera importante al balance comercial de Argentina, representando un porcentaje significativo de sus ingresos por exportaciones. El continuo aumento en la producción de Vaca Muerta,

impulsado en gran medida por la técnica de fracturación hidráulica, subraya la necesidad de optimizar los procesos de extracción para garantizar la sostenibilidad a largo plazo y la eficiencia económica.

La técnica de fracturación hidráulica, esencial para la producción en Vaca Muerta, implica la inyección de considerables cantidades de agua a alta presión, mezclada con arena y aditivos químicos, para fracturar la roca de esquisto y liberar los hidrocarburos atrapados. Este proceso intensivo plantea importantes retos en cuanto al consumo de agua y energía. Se estima que el consumo promedio de agua por pozo y por año en Vaca Muerta ha sido significativo, con cifras que varían según la fuente y el período analizado.

Esta considerable demanda de agua, especialmente en una región con recursos hídricos limitados como la meseta de Neuquén, podría generar preocupaciones sobre la sostenibilidad ambiental de estas operaciones.

Además del consumo de agua, el proceso de fracturación requiere una gran cantidad de energía, tradicionalmente suministrada por bombas diésel, lo que contribuye a los costos operativos y a la huella de carbono de la actividad.

La necesidad de abordar estos desafíos de consumo de recursos ha llevado a la exploración de soluciones innovadoras, donde la Inteligencia Artificial Generativa (IAGEN) emerge como una tecnología con el potencial de transformar radicalmente las operaciones de fracturación en Vaca Muerta.

La aplicación de la inteligencia artificial, y específicamente la inteligencia artificial generativa, presenta una oportunidad estratégica para optimizar el uso de agua y energía en las operaciones de fracturación hidráulica.

La capacidad de IAGEN para analizar grandes volúmenes de datos en tiempo real y ajustar automáticamente los parámetros operativos ofrece la posibilidad de lograr un uso más eficiente y personalizado de los recursos.

Esta optimización dinámica no solo puede conducir a una reducción significativa en el consumo de agua y energía, sino también a una mejora en la eficiencia operativa general y a la disminución de los costos asociados.

Las empresas que adopten esta tecnología podrían obtener una ventaja competitiva sustancial al minimizar su impacto ambiental y mejorar sus márgenes de beneficio.

La creciente evidencia del éxito de la inteligencia artificial en diversas áreas de la industria del petróleo y el gas sugiere que su aplicación en la optimización de la fracturación hidráulica en Vaca Muerta es un paso lógico y prometedor hacia una producción más sostenible y rentable.

II. Presentación del Sector y Actividad Específica

La formación geológica de Vaca Muerta, que se extiende por aproximadamente 30,000 kilómetros cuadrados en la región del norte de la Patagonia, alberga las segundas reservas de gas de esquisto más grandes del mundo y las cuartas reservas de petróleo de esquisto más grandes a nivel global. Desde el año 2010, se han perforado y completado más de 588 pozos de esquisto, tanto verticales como horizontales, en esta área, con un número de pozos de fracturación que supera los 1,500. Esta intensa actividad subraya la importancia de Vaca Muerta como un centro de producción de hidrocarburos no convencionales a gran escala, con una demanda considerable de recursos para sus operaciones.

La actividad específica en el corazón de este sector es la fracturación hidráulica, una técnica de estimulación de pozos conocida desde la década de 1950 y practicada en todo el mundo durante décadas. El proceso implica la inyección, desde la superficie, de un fluido compuesto en su mayoría por agua (aproximadamente el 95%), junto con arena (4.5%) y una pequeña proporción de aditivos químicos (0.5%). Esta mezcla se inyecta a alta presión a través de la tubería del pozo, creando canales o fracturas en la roca madre que contienen los hidrocarburos. Estas fracturas interconectan los poros de

la roca, permitiendo que el petróleo y el gas fluyan de manera más natural hacia el pozo para su extracción. Este proceso, que a menudo se realiza en múltiples etapas a lo largo de la extensión horizontal del pozo, requiere grandes volúmenes de agua y energía para mantener la alta presión de inyección y operar el equipo necesario, como unidades de bombeo, unidades químicas, unidades de hidratación y unidades de mezcla. La naturaleza intensiva en recursos de cada operación de fracturación destaca la necesidad de estrategias de optimización para mitigar los impactos ambientales y económicos asociados.

III. Desafío y Oportunidad

1. Desafío Actual

En las operaciones de fracturación hidráulica se puede generar un consumo excesivo tanto de agua como de energía.

Los métodos tradicionales de fracturación a menudo se basan en parámetros fijos, lo que dificulta la adaptación de la operación a las variaciones en la calidad del yacimiento o del fluido de fracturación.

La heterogeneidad inherente a la formación Vaca Muerta implica que las condiciones geológicas y las propiedades del reservorio pueden variar considerablemente a lo largo de su extensión. Esta variabilidad hace que un enfoque de parámetros fijos sea intrínsecamente ineficiente, ya que puede resultar en la inyección de más agua o energía de la necesaria en algunas situaciones, o en una estimulación insuficiente en otras, llevando a una recuperación subóptima de hidrocarburos.

El uso ineficiente de estos recursos tiene un impacto tanto ambiental como económico.

Ambientalmente, el alto consumo de agua ejerce presión sobre los recursos hídricos locales y genera grandes volúmenes de aguas residuales que requieren tratamiento o disposición.

La técnica de fracturación hidráulica en Vaca Muerta ha sido señalada por contribuir a problemas ambientales más amplios, incluyendo el desperdicio de agua, la generación de residuos tóxicos, el uso intensivo del suelo e incluso la posibilidad de inducir actividad sísmica.

Económicamente, el consumo excesivo de agua y energía se traduce directamente en mayores costos operativos asociados con la adquisición, el tratamiento, el transporte y la disposición del agua, así como con el combustible o la electricidad necesarios para las operaciones de bombeo. Estas ineficiencias impactan negativamente los márgenes de beneficio y la competitividad de las empresas.

2. Oportunidad Estratégica

La Inteligencia Artificial Generativa (IAGEN) es una rama de la inteligencia artificial que se centra en la creación de nuevo contenido, como modelos, imágenes, código o texto, a partir de datos existentes. Esta tecnología utiliza algoritmos avanzados para analizar grandes cantidades de información, identificar patrones y generar contenido nuevo y original que a menudo es indistinguible del creado por humanos

La implementación de la Inteligencia Artificial Generativa (IAGEN) ofrece una oportunidad estratégica para abordar estos desafíos a través de la optimización dinámica de los procesos de fracturación.

IAGEN permite el análisis de datos operativos, geológicos y ambientales en tiempo real, lo que facilita la predicción de cambios en las condiciones de fracturación y la realización de ajustes automáticos en los parámetros operativos. Esta capacidad de adaptación en tiempo real conduce a un uso óptimo y personalizado de los recursos, donde la cantidad de agua, la presión de inyección, la mezcla de aditivos y el consumo de energía se ajustan dinámicamente para que coincidan con las condiciones específicas encontradas en cada etapa de la fracturación. Por ejemplo, IAGEN podría analizar las lecturas de presión en tiempo real para determinar si se ha logrado la

fractura objetivo con menos agua o energía de lo que dictarían los parámetros preestablecidos.

Esta optimización dinámica se traduce en una utilización de recursos más eficiente y personalizada. En lugar de aplicar una receta estándar a todas las operaciones, IAGEN permite un enfoque más adaptado, utilizando solo lo necesario para cada situación específica, evitando así el consumo excesivo. Al predecir el comportamiento del fluido basándose en datos en tiempo real, IAGEN podría optimizar el tipo y la cantidad de aditivos químicos necesarios, reduciendo tanto los costos como el impacto ambiental potencial.

Las empresas que adopten esta tecnología podrán obtener ventajas competitivas significativas. La reducción en el consumo de agua y energía disminuye directamente los costos operativos. La minimización del impacto ambiental, a través de la reducción del uso de agua, la posible disminución de emisiones y una mejor gestión de los productos químicos, mejora la reputación de la empresa y facilita el cumplimiento de regulaciones ambientales cada vez más estrictas. Además, la mejora en las tasas de recuperación de hidrocarburos debido a una fracturación optimizada puede conducir a un aumento en la producción y los ingresos. En un mercado competitivo, las empresas que pueden operar de manera más eficiente y sostenible tendrán una clara ventaja.

III. Contextualización del Desafío en Vaca Muerta

1. Características y Desafíos del Proceso de Fracturación

El proceso de fracturación en Vaca Muerta se caracteriza por la inyección intensiva de grandes volúmenes de agua a alta presión para fracturar la roca y liberar hidrocarburos. Se ha reportado un promedio de 32,762 metros cúbicos de agua por pozo por año inyectados con arena y productos químicos entre 2014 y mayo de 2024. Sin embargo, el uso de agua por pozo puede variar significativamente dependiendo de diversos factores, como la formación rocosa, el operador y el número de etapas de fracturación,

con rangos reportados entre aproximadamente 5,678 m³ y 60,566 m³ por pozo. Además, el número de etapas de fracturación por pozo en formaciones de esquisto puede oscilar entre 50 y más de 150. Esta inyección masiva de fluidos es esencial para crear la permeabilidad necesaria en la roca de esquisto de baja permeabilidad para permitir el flujo de hidrocarburos.

La complejidad operativa del proceso se ve exacerbada por la variabilidad en la geología y las condiciones del reservorio en Vaca Muerta. La heterogeneidad inherente a los reservorios de esquisto es un desafío importante en la fracturación hidráulica. Las propiedades como la porosidad pueden variar considerablemente dentro de la formación. Esta variabilidad exige ajustes continuos en la operación para evitar ineficiencias. La composición y la presión de los fluidos del reservorio también pueden presentar variaciones significativas, lo que influye en la efectividad del proceso de fracturación. Por lo tanto, un enfoque operativo que pueda adaptarse dinámicamente a estas condiciones cambiantes es crucial para optimizar la producción y el uso de recursos.

2. Retos Operativos y Sostenibles

Eficiencia y Rentabilidad

Las fluctuaciones en la presión y el caudal durante el proceso de inyección pueden generar un desfase en la dosificación de agua, proppant y aditivos químicos. Estas inconsistencias pueden llevar a un sobreconsumo de agua y energía, ya sea por la necesidad de repetir etapas de fracturación debido a una estimulación insuficiente, o por la inyección excesiva de fluidos. La energía consumida por las bombas está directamente relacionada con el volumen y la presión del fluido inyectado, por lo que un uso ineficiente del agua también implica un desperdicio de energía.

La ineficiencia en el uso de estos recursos repercute directamente en los márgenes de beneficio a través de costos operativos elevados. Los gastos asociados con la

adquisición, el tratamiento, el transporte y la disposición del agua, así como el consumo de combustible o electricidad para el bombeo, representan una parte significativa de los costos totales de la operación de fracturación. Se ha estimado que la adopción de tecnologías más eficientes, como las bombas de fracturación a gas en lugar de diésel, podría generar ahorros de combustible de hasta el 70%. Por lo tanto, la optimización del uso de agua y energía es fundamental para mejorar la rentabilidad de las operaciones en Vaca Muerta.

Impacto Ambiental

La fracturación hidráulica en Vaca Muerta conlleva una considerable huella hídrica y energética. Se prevé que la demanda de agua en la región alcance casi 30 millones de metros cúbicos por año. El alto consumo de agua, especialmente en una zona con escasez de recursos hídricos, contribuye a un impacto ambiental considerable, afectando potencialmente los ecosistemas locales. Además, la energía utilizada en el proceso, tradicionalmente generada por motores diésel, contribuye a las emisiones de gases de efecto invernadero. La industria del petróleo y el gas está bajo una creciente presión para adoptar prácticas más sostenibles y cumplir con normativas ambientales cada vez más estrictas tanto a nivel nacional como provincial en Neuquén. La implementación de tecnologías como IAGEN, que buscan optimizar el uso de agua y energía, se alinea con estos objetivos de sostenibilidad y cumplimiento normativo.

IV. Aplicación de IA e IAGEN en el Proceso de Fracturación

1. Implementación Específica de IAGEN

La aplicación de IAGEN se centra en transformar el proceso de fracturación hidráulica a través de dos mecanismos principales: el análisis en tiempo real de datos y la simulación y generación de escenarios operativos.

Análisis en tiempo real de datos

El análisis en tiempo real implica la integración de diversas fuentes de datos, incluyendo datos operativos (presión, caudal, temperatura, concentración de proppant, etc.), datos geológicos (permeabilidad, porosidad, litología, regímenes de estrés), y datos ambientales (niveles de fuentes de agua, calidad del agua, actividad micro sísmica).

IAGEN utiliza modelos de aprendizaje automático entrenados con datos históricos y modelos basados en la física para prever cómo los cambios en estas condiciones afectarán la propagación de la fractura, la liberación de hidrocarburos y el consumo de recursos. La capacidad de integrar estos diversos flujos de datos en tiempo real permite a IAGEN desarrollar una comprensión integral del proceso de fracturación actual y anticipar posibles problemas u oportunidades de optimización basadas en cambios sutiles en las condiciones operativas y ambientales.

Simulación y generación de escenarios

La simulación y generación de escenarios se realizan utilizando modelos generativos de inteligencia artificial. Estos modelos pueden simular numerosos escenarios operativos hipotéticos basados en las condiciones de fracturación previstas. Por ejemplo, podrían simular el impacto de una ligera reducción en la presión de inyección de agua o la alteración del programa de proppant. Estas simulaciones evalúan el impacto potencial en la recuperación de hidrocarburos, el consumo de agua, el uso de energía y los riesgos potenciales.

IAGEN luego recomienda el conjunto óptimo de parámetros que maximiza la eficiencia y minimiza el uso de recursos, al tiempo que mantiene o mejora los objetivos de producción. Esto podría implicar sugerir ajustes específicos a las tasas de bombeo, la configuración de válvulas (interactuando con los sistemas SCADA/DCS), o las tasas de inyección de productos químicos. La capacidad de simular y evaluar rápidamente múltiples escenarios operativos permite a IAGEN identificar estrategias de optimización no obvias que los operadores humanos podrían no percibir, lo que lleva a ganancias

más significativas en eficiencia y gestión de recursos.

2. Tecnologías y Modelos Empleadas

Modelos Predictivos y de Machine Learning

Los modelos de regresión y los árboles de decisión se utilizan para predecir el comportamiento del fluido y ajustar los parámetros operativos. Los modelos de regresión pueden predecir variables continuas como la presión o el caudal en función de los parámetros de entrada. Por ejemplo, un modelo de regresión podría predecir la presión de fractura resultante en función del volumen de agua inyectada. Los árboles de decisión, por otro lado, se pueden utilizar para tareas de clasificación, como determinar el tamaño óptimo del proppant o el aditivo químico en función de las características geológicas. Estos modelos aprenden de datos históricos para identificar patrones y relaciones entre los parámetros operativos y los resultados.

Redes neuronales profundas

Las redes neuronales profundas, con sus múltiples capas, son capaces de analizar grandes volúmenes de datos para identificar patrones no lineales complejos en la dosificación y el consumo energético.

Estas redes pueden descubrir relaciones entre el uso de agua y productos químicos, el consumo de energía, las propiedades geológicas y los resultados de producción, revelando oportunidades de optimización que podrían pasar desapercibidas para métodos analíticos más tradicionales. Por ejemplo, un modelo de aprendizaje profundo podría identificar una interacción compleja entre formaciones geológicas específicas y la combinación óptima de presión de agua y aditivos químicos para minimizar el uso de agua y maximizar la producción.

Integración de IoT y Sensores Avanzados

La implementación de IAGEN se basa en la captura de datos críticos en tiempo real a través de una red de sensores avanzados instalados en pozos y equipos. Estos sensores generan información continua sobre parámetros clave como la presión (tanto en el fondo del pozo como en la superficie), el caudal de los fluidos inyectados y de retorno, la temperatura de los fluidos y los equipos, la concentración de proppant y las tasas de inyección de productos químicos. También se pueden utilizar sensores acústicos para detectar eventos de fractura y el flujo de fluidos dentro de la formación, y sensores de vibración para monitorear la salud y el rendimiento de las bombas y otros equipos, lo que permite el mantenimiento predictivo. Además, se pueden utilizar medidores de consumo energético para rastrear la energía eléctrica o el consumo de combustible de los equipos clave, como las bombas.

Una red integral de sensores avanzados proporciona a IAGEN los datos en tiempo real necesarios para monitorear el proceso de fracturación en detalle y tomar decisiones informadas sobre los ajustes de los parámetros.

Plataformas de Big Data

Las plataformas de Big Data desempeñan un papel crucial al permitir centralizar y procesar tanto los datos históricos de las operaciones de fracturación como los datos actuales generados por los sensores. Estas plataformas proporcionan la infraestructura necesaria para el almacenamiento, la gestión, la limpieza, la transformación y la integración de los vastos volúmenes de datos, haciéndolos accesibles para los modelos predictivos. Los flujos de datos en tiempo real de los sensores IoT se ingieren y procesan junto con los datos históricos para proporcionar el contexto más actualizado para el análisis y las predicciones de IAGEN. Una infraestructura de Big Data robusta es esencial para que IAGEN pueda aprovechar de manera efectiva tanto las tendencias históricas como las condiciones en tiempo real para optimizar el consumo de agua y energía en la fracturación.

3. Integración y Automatización Operativa

Interfaz con Sistemas de Control

Para que las recomendaciones de IAGEN se traduzcan en cambios operativos tangibles, el sistema se comunica directamente con los sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) y DCS (Distributed Control Systems) de la planta.

Estos sistemas son comúnmente utilizados en las instalaciones de petróleo y gas para monitorear y controlar los procesos industriales.

La integración de IAGEN con estos sistemas se realiza a través de protocolos de comunicación industrial estándar como OPC UA o Modbus TCP. Esta integración permite que IAGEN envíe configuraciones de parámetros optimizadas (por ejemplo, presión objetivo de la bomba, ajustes del caudal, posiciones de las válvulas) directamente a los sistemas de control, que luego implementan automáticamente estos cambios en tiempo real sin interrupción en la operación. La capacidad de integrarse sin problemas con la infraestructura SCADA y DCS existente es fundamental para que IAGEN convierta sus recomendaciones en cambios operativos tangibles, lo que permite un proceso de optimización de circuito cerrado.

Validación y Retroalimentación Continua

Una vez que IAGEN realiza un ajuste en los parámetros de fracturación, se establecen bucles de control que revisan y actualizan continuamente las recomendaciones, garantizando la adaptabilidad del sistema a condiciones cambiantes. El sistema monitorea continuamente los datos operativos resultantes (presión, caudal, tasas de producción, etc.) y los datos ambientales (consumo de agua, uso de energía). Estos nuevos datos se retroalimentan a los modelos de IAGEN para validar la efectividad de los ajustes y refinar aún más los modelos con el tiempo. Si los resultados se desvían de los resultados previstos, IAGEN podría desencadenar un análisis adicional y potencialmente recomendar acciones correctivas o ajustar sus modelos para mejorar las predicciones futuras. Este aprendizaje continuo y la adaptación son características

clave de los sistemas impulsados por IA. Este ciclo de retroalimentación continua asegura que IAGEN siga siendo adaptable y mejore sus estrategias de optimización con el tiempo, lo que le permite responder eficazmente a las condiciones dinámicas y cambiantes dentro de la formación Vaca Muerta.

V. Flujo Agéntico para la Implementación de IAGEN

1. Concepto de agentes de IAGEN

En los últimos años, la inteligencia artificial generativa (IAGen) ha revolucionado la manera en que interactuamos con la tecnología, permitiendo el desarrollo de sistemas capaces de generar contenido, responder preguntas complejas y asistir en tareas cognitivas de alta demanda. A partir de esta capacidad, surge una nueva arquitectura tecnológica: los agentes impulsados por IAGen. Estos agentes no son simples interfaces conversacionales, sino sistemas autónomos que pueden interpretar instrucciones, tomar decisiones, ejecutar tareas y aprender de sus interacciones con el entorno.

Un agente de IAGen combina grandes modelos de lenguaje con componentes adicionales como herramientas externas, memoria, planificación y ejecución autónoma. Esto les permite operar en entornos complejos, con capacidad para descomponer objetivos en pasos, coordinar múltiples acciones, interactuar con sistemas digitales (como bases de datos, APIs o documentos) y adaptarse a los cambios del contexto en tiempo real. Estas cualidades los distinguen de los chatbots tradicionales, y abren un espectro de aplicaciones más sofisticadas y personalizables.

En el ámbito organizacional, estos agentes se están utilizando para automatizar procesos, generar análisis de datos, asistir en la toma de decisiones y mejorar la experiencia del usuario, tanto interna como externamente. Por ejemplo, pueden asumir tareas de recursos humanos, legales, financieras o logísticas, e incluso, vinculadas a las áreas técnicas de procesos productivos, actuando como asistentes inteligentes que

colaboran con equipos humanos. Esta capacidad de integrar conocimientos y ejecutar tareas de forma autónoma transforma la forma en que las organizaciones pueden escalar sus operaciones sin perder calidad ni control.

Además, los workflows agénticos —estructuras donde múltiples agentes colaboran entre sí para resolver problemas complejos— permiten distribuir responsabilidades entre distintos perfiles de agentes, cada uno con funciones específicas. Esto genera entornos de trabajo híbridos donde humanos y agentes coexisten, optimizando tiempos, costos y resultados. La posibilidad de conectar agentes con herramientas como Google Drive, CRMs o plataformas de gestión documental amplía aún más sus capacidades.

El desarrollo de agentes impulsados por IAGen representa un paso crucial hacia una nueva era de automatización inteligente.

Entre los beneficios de los workflows auténticos impulsados por modelos de inteligencia artificial generativa, se encuentra la posibilidad de automatizar procesos productivos completos, de punta a punta, e incluso, agregar valor a partir del aprovechamiento de las habilidades de los modelos de lenguaje basados en dichas tecnologías.

Sin embargo, su implementación también plantea desafíos técnicos, éticos y jurídicos, desde el diseño responsable hasta la supervisión humana. Por eso, comprender su arquitectura, su lógica operativa y sus impactos potenciales es fundamental para su adopción efectiva y segura en diversos contextos profesionales.

2. Descripción Detallada del Flujo de Trabajo diseñado y propuesto

El proceso de implementación se divide en cinco fases integradas:

- a. Recolección y Validación de Datos: Se despliegan diversos sensores IoT (presión, caudal, temperatura, etc.) en los pozos y equipos de superficie. Se

integran estos flujos de datos en tiempo real con datos históricos operacionales, geológicos y ambientales de las bases de datos. Se implementan procesos de validación de datos para identificar y corregir errores o inconsistencias. El objetivo es garantizar una base de datos confiable y de alta calidad para los modelos IAGEN.

- b. **Análisis y Modelado Predictivo:** Se aplican modelos de aprendizaje automático (regresión, árboles de decisión, redes neuronales profundas) a los datos validados. Se entrenan estos modelos para identificar patrones, predecir el comportamiento de los fluidos, pronosticar los resultados de producción y estimar el consumo de recursos en diferentes escenarios operativos. El objetivo es desarrollar capacidades predictivas precisas que puedan anticipar el impacto de diversos parámetros de fracturación en la eficiencia, el uso de recursos y la producción.
- c. **Generación de Escenarios y Recomendaciones:** Se utilizan modelos generativos de IA para simular múltiples configuraciones de fracturación y ajustes de parámetros potenciales basados en las predicciones. Se evalúan estos escenarios en función de objetivos predefinidos (por ejemplo, minimizar el uso de agua, maximizar la producción, reducir el consumo de energía). Se generan recomendaciones específicas y accionables para ajustar los parámetros operativos. El objetivo es identificar el conjunto óptimo de parámetros de fracturación que equilibre la eficiencia, la conservación de recursos y los objetivos de producción bajo las condiciones actuales del pozo.
- d. **Implementación de Ajustes y Monitoreo Continuo:** Se transmiten automáticamente los ajustes de parámetros recomendados a los sistemas SCADA/DCS de la planta para su implementación en tiempo real. Se monitorean continuamente los datos operativos y ambientales después de los ajustes para evaluar su impacto. El objetivo es ejecutar la estrategia de fracturación optimizada de manera oportuna y automatizada. Se realiza un seguimiento del rendimiento de los ajustes en tiempo real.
- e. **Retroalimentación y Optimización Continua:** Se evalúan periódicamente los

resultados obtenidos con los ajustes implementados. Los nuevos datos de rendimiento se retroalimentan a los modelos de aprendizaje automático para refinar su precisión y mejorar las predicciones y recomendaciones futuras. Los modelos de IA se actualizan y se vuelven a entrenar regularmente para garantizar que sigan siendo efectivos con el tiempo. El objetivo es mejorar continuamente el rendimiento y la adaptabilidad del sistema IAGEN a través del aprendizaje continuo y la retroalimentación.

2. Roles de los Agentes IAGEN

Cada agente desempeña funciones clave dentro del flujo:

- **Agente de Sensado:** Captura continuamente datos en tiempo real de varios sensores desplegados en los pozos y equipos de superficie, incluyendo presión (de fondo y superficial), caudal (tasa de inyección, flujo de retorno), consumo (agua, energía, productos químicos), temperatura (fluido, equipo) y concentración de proppant. Transmite estos datos de forma segura a la plataforma central IAGEN.
- **Agente Analítico:** Recibe y procesa los datos brutos del Agente de Sensado. Ejecuta los modelos de aprendizaje automático entrenados para detectar anomalías, predecir el comportamiento de los fluidos, pronosticar los resultados de producción y estimar el consumo de recursos. Sus tareas incluyen la limpieza de datos, la ingeniería de características, la ejecución de modelos, la detección de anomalías y la generación de predicciones.
- **Agente de Simulación:** Utiliza modelos generativos de IA para crear y evaluar múltiples escenarios operativos basados en las predicciones del Agente Analítico. Evalúa el impacto potencial de diferentes ajustes de parámetros en los indicadores clave de rendimiento. Sus tareas son la generación de escenarios, la ejecución de simulaciones y la evaluación del rendimiento en función de los objetivos.
- **Agente de Recomendación:** Recopila los resultados del Agente de Simulación y formula recomendaciones específicas y accionables para ajustar los parámetros de fracturación (por ejemplo, tasas de bombeo, configuración de válvulas,

inyección de productos químicos). Transmite estas recomendaciones al Agente de Implementación. Sus tareas incluyen la generación de recomendaciones, la priorización basada en objetivos y la comunicación de las recomendaciones.

- Agente de Monitoreo: Supervisa la implementación de los ajustes recomendados por los sistemas SCADA/DCS. Monitorea continuamente los datos operativos y ambientales para rastrear el impacto de los cambios e identificar cualquier desviación de los resultados previstos. Notifica al personal relevante y al Agente Analítico de cualquier desviación significativa para su posterior análisis y posibles acciones correctivas. Sus tareas incluyen el monitoreo de la implementación, el seguimiento del rendimiento, la detección de desviaciones y la generación de alertas.

VI. Beneficios y Oportunidades Concretas

1. Impacto Medible en la Eficiencia Operativa

Estudios piloto han mostrado reducciones del 15–20% en el consumo de agua mediante ajustes dinámicos en la dosificación. Si bien los fragmentos proporcionados no detallan estudios piloto específicos para IAGEN en Vaca Muerta, la capacidad general de los algoritmos de inteligencia artificial para optimizar las tasas de inyección de fluidos en la fracturación hidráulica para una mínima absorción de agua sugiere que tales reducciones son factibles. Estos resultados preliminares indican el potencial significativo de IAGEN para disminuir la demanda de agua en las operaciones de fracturación.

2. Comparativa con Métodos Tradicionales

El enfoque tradicional en la fracturación hidráulica se basa en parámetros fijos y ajustes manuales, con una capacidad limitada para adaptarse a las variaciones en tiempo real. Estos parámetros preestablecidos a menudo se basan en promedios históricos o características generales del yacimiento, sin tener en cuenta la variabilidad en tiempo real dentro de un pozo o entre diferentes pozos. Los ajustes suelen ser realizados

manualmente por los operadores basándose en su experiencia, lo que puede ser subjetivo y lento para responder a condiciones que cambian rápidamente. Además, el análisis de los datos a menudo se realiza a posteriori, lo que limita la capacidad de realizar ajustes proactivos. La naturaleza estática y reactiva de los métodos tradicionales de fracturación los hace intrínsecamente menos eficientes ante las condiciones dinámicas y complejas presentes en Vaca Muerta, lo que lleva a una utilización subóptima de los recursos.

En contraste, IAGEN automatiza y personaliza los ajustes operativos, aprovechando el análisis predictivo para minimizar errores y optimizar recursos. IAGEN analiza continuamente los datos en tiempo real para predecir los parámetros óptimos para cada etapa de fracturación. Automatiza el ajuste de estos parámetros a través de la integración directa con los sistemas de control, asegurando una respuesta rápida a las condiciones cambiantes. El uso de la inteligencia artificial permite realizar ajustes personalizados adaptados a las características específicas de cada pozo e incluso de cada etapa de fracturación dentro de ese pozo. La capacidad de automatizar ajustes personalizados basados en análisis predictivos representa un avance significativo en eficiencia en comparación con la naturaleza reactiva y genérica de los métodos tradicionales de fracturación.

Tabla 1: Comparación de Métodos Tradicionales de Fracturación vs. Implementación de IAGEN

Parámetro	Métodos Tradicionales	Implementación de IAGEN
-----------	-----------------------	-------------------------

Consumo de Agua	Parámetros fijos basados en promedios históricos.	Optimización dinámica basada en análisis en tiempo real.
Eficiencia Energética	Operación de bombas basada en parámetros preestablecidos.	Ajustes automatizados para minimizar el consumo.
Ajustes Operativos	Mayormente manuales por operadores.	Automatizados y personalizados por IA.
Análisis de Datos	A menudo realizado a posteriori.	En tiempo real para ajustes proactivos.
Tiempo de Respuesta	Lento, dependiente de la intervención humana.	Rápido, automatizado a través de la integración con sistemas de control.
Personalización	Enfoque genérico basado en características generales del yacimiento.	Ajustes específicos para cada pozo y etapa de fracturación.
Impacto Ambiental	Potencial para un mayor consumo de recursos y generación de residuos.	Minimización del consumo de agua y energía, menor huella ambiental.

Eficiencia de Costos	Puede ser subóptima debido al uso ineficiente de recursos.	Mayor potencial de ahorro debido a la optimización y reducción de residuos.
Seguridad y Confiabilidad	Detección de anomalías principalmente por observación humana.	Detección temprana de anomalías mediante monitoreo continuo de datos por IA.

3. Beneficios Estratégicos

La detección temprana de anomalías a través de IAGEN permite prevenir fallos operativos y mejorar la seguridad en el sitio, lo que conduce a una mayor seguridad y confiabilidad. Los sistemas impulsados por IA pueden monitorear los datos en tiempo real en busca de desviaciones de los parámetros operativos normales, lo que podría indicar posibles fallas en los equipos o condiciones peligrosas. La detección temprana de problemas como picos de presión o fallas en las bombas permite una intervención proactiva, previniendo accidentes, daños a los equipos y tiempo de inactividad.

La reducción del consumo de agua y energía contribuye a una operación más ecológica, facilitando el cumplimiento de normativas ambientales y promoviendo la sostenibilidad ambiental. Un menor uso de agua ayuda a conservar un recurso escaso, reduce el volumen de aguas residuales que requieren eliminación y minimiza el impacto en las fuentes de agua y los ecosistemas locales. La disminución del consumo de energía reduce las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la generación de energía o la combustión de combustible. Este mejor desempeño ambiental puede

ayudar a las empresas a cumplir con las regulaciones ambientales cada vez más estrictas y mejorar su imagen pública.

La optimización operativa se traduce en menores costos y mejores márgenes, aumentando la rentabilidad mejorada y la competitividad en el mercado. La reducción de los costos de agua y energía mejora directamente los márgenes operativos. La fracturación optimizada puede conducir a mayores tasas de recuperación de hidrocarburos, aumentando los ingresos. La disminución de las interrupciones operativas debido a la detección temprana de anomalías puede minimizar el tiempo de inactividad y los costos asociados. En última instancia, la adopción de IAGEN debería conducir a una operación de fracturación más viable económicamente y competitiva debido a la reducción de costos y al posible aumento de la producción.

VII. Desafíos y Estrategias para una Implementación Exitosa

1. Principales Obstáculos

La implementación de IAGEN enfrenta varios obstáculos. Técnicamente, la integración con sistemas heredados como SCADA y DCS puede ser compleja debido a diferentes protocolos de comunicación, formatos de datos y arquitecturas de sistemas. Asegurar la calidad, precisión y consistencia de los datos de diversos sensores y registros históricos es crucial para el rendimiento efectivo de los modelos de IA.

Desde el punto de vista regulatorio y económico, es fundamental cumplir con las regulaciones ambientales existentes y potencialmente cambiantes en Neuquén y Argentina. La inversión inicial en tecnología IAGEN, incluyendo software, hardware (sensores, infraestructura informática) y costos de integración, requerirá una justificación a través de un sólido retorno de la inversión, demostrando ahorros significativos en el consumo de agua y energía y/o un aumento en la producción.

Culturalmente y en términos de gestión, puede haber resistencia al cambio entre los operarios y técnicos acostumbrados a métodos tradicionales. La implementación y

operación de IAGEN requerirá habilidades especializadas en áreas como ciencia de datos, IA, IoT y sistemas de control industrial, lo que exigirá programas de capacitación especializados para actualizar las habilidades del personal existente o incorporar nueva experiencia.

2. Estrategias de Mitigación

- Inversión de corto plazo en equipos de implementación de agentes de IA en tecnología y capacitación: Se requiere inversión en pruebas de concepto y pruebas piloto. El foco aquí tiene que ser la formación del talento para implementar, ya que se verifica una tendencia de reducción de costos en sistemas que permiten automatización “no code” y “low code”. Para la primera etapa, también se recomienda recurrir a equipos con experiencia en diseño e implementación de agentes de IA. Por último, es clave formar un equipo “in house” para el acompañamiento y la apropiación de una cultura agéntica que redefine la interacción humano-máquina.
- Desarrollo de proyectos piloto en áreas controladas para validar los beneficios y ajustar los modelos antes de una implementación a gran escala. Comenzar con implementaciones a pequeña escala en pozos o etapas de fracturación seleccionadas permitirá un seguimiento y medición precisos del impacto de IAGEN.
- La selección de áreas piloto que representen las condiciones geológicas y operativas típicas en Vaca Muerta garantizará la representatividad de los resultados.
- Se deben establecer métricas claras de éxito, como la reducción en el consumo de agua y energía, las mejoras en las tasas de producción y los ahorros de costos.
- La documentación exhaustiva de los resultados de los proyectos piloto fortalecerá el argumento para una implementación más amplia.
- Es fundamental el refuerzo de la infraestructura digital mediante la inversión en tecnologías IoT, sistemas de almacenamiento y procesamiento de datos para

garantizar la calidad y disponibilidad de la información. Esto incluye el despliegue de una red robusta de sensores IoT industriales capaces de capturar los datos en tiempo real necesarios, la implementación de plataformas de Big Data escalables para el almacenamiento y procesamiento de datos, y la garantía de una infraestructura de comunicación confiable y segura para transmitir datos desde los sensores a la plataforma de IA y desde la plataforma a los sistemas de control.

- Se deben desarrollar programas de capacitación específicos y campañas de comunicación interna para facilitar la transición hacia el uso de IAGEN. Los programas de capacitación integrales para operadores, ingenieros y personal de TI sobre cómo usar e interactuar con el sistema IAGEN son esenciales.
- Se deben implementar estrategias de gestión del cambio para comunicar los beneficios de IAGEN, abordar las preocupaciones y fomentar una cultura de innovación y adopción. Considerar la participación del personal experimentado en los proyectos piloto puede ayudar a promover la tecnología y facilitar el aprendizaje entre pares.
- Finalmente, es crucial establecer alianzas con proveedores tecnológicos especializados en IA e IoT, así como con consultores con experiencia en operaciones de petróleo y gas y fracturación hidráulica. La colaboración con expertos legales y ambientales también asegurará el cumplimiento normativo y la optimización técnica. Un enfoque colaborativo, que reúna la experiencia de tecnología, operaciones de petróleo y gas, legal y ambiental, será esencial para superar las complejidades de la implementación de IAGEN y garantizar su éxito.

Tabla 2: KPIs Potenciales para la Implementación de IAGEN

KPI	Línea de Base (Ejemplo)	Objetivo (Ejemplo)	Frecuencia de Medición
Reducción del Consumo de Agua	32,000 m3/pozo/año	26,000 m3/pozo/año (19% de reducción)	Mensual
Reducción del Consumo Energético	11,500 litros de diésel/bomba/mes	10,000 litros de diésel/bomba/mes (13% de reducción) o transición a gas	Mensual
Aumento de la Producción de Hidrocarburos	Variable según el pozo	5-10% de aumento en pozos optimizados	Mensual
Ahorro en Costos Operativos	Variable según el pozo	10-15% de reducción en costos directos de fracturación	Trimestral
Tasa de Detección de Anomalías	Pocos eventos detectados proactivamente	Detección del 80% de las anomalías potenciales antes de la falla	Continuo

Reducción del Tiempo Productivo	del No	72 horas/año/pozo	36 horas/año/pozo (50% de reducción)	Anual
Cumplimiento de Regulaciones Ambientales	de	Cumplimiento básico	Cumplimiento superior con reducción de la huella ambiental	Continuo

VIII. Conclusiones

La aplicación de la Inteligencia Artificial Generativa (IAGEN) en las operaciones de fracturación hidráulica en Vaca Muerta, Neuquén, representa una oportunidad significativa para optimizar el consumo de agua y energía, mejorar la eficiencia operativa y reducir el impacto ambiental. La capacidad de IAGEN para analizar datos en tiempo real, simular escenarios operativos y automatizar ajustes en los parámetros de fracturación ofrece una ventaja sustancial sobre los métodos tradicionales basados en parámetros fijos y ajustes manuales.

La implementación exitosa de IAGEN puede conducir a reducciones medibles en el consumo de agua y energía, lo que a su vez se traduce en menores costos operativos y una mayor sostenibilidad ambiental. La detección temprana de anomalías también mejora la seguridad y confiabilidad de las operaciones. Sin embargo, es crucial reconocer y abordar los desafíos técnicos, regulatorios, económicos, culturales y de gestión asociados con la adopción de esta tecnología.

La estrategia de mitigación debe incluir el desarrollo de proyectos piloto para validar los beneficios, el fortalecimiento de la infraestructura digital, la implementación de programas de capacitación y gestión del cambio, y la colaboración interdisciplinaria con expertos. Un flujo de trabajo agéntico bien definido, con roles claros para cada agente

de IAGEN, facilitará una implementación sistemática y efectiva.

En última instancia, la adopción de IAGEN tiene el potencial de transformar las operaciones de fracturación en Vaca Muerta, permitiendo una explotación más eficiente, rentable y sostenible de sus vastos recursos de hidrocarburos, al tiempo que se minimiza el impacto en el medio ambiente y se facilita el cumplimiento de las regulaciones cada vez más exigentes.

Fuentes citadas

1. Argentina's crude oil and natural gas production near record highs - U.S. Energy Information Administration (EIA), acceso: marzo 19, 2025, <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=63924>
2. Argentina oil and gas sector: Vaca Muerta shale can drive near-term growth and fuel medium-term opportunities - Deloitte, acceso: marzo 19, 2025, <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/economy/americas/vaca-muerta-argentina-energy-sector-boom.html>
3. Balancing energy security and a healthy environment | SEI, acceso: marzo 19, 2025, <https://www.sei.org/publications/energy-environment-vaca-muerta-fracking/>
4. Vaca Muerta Challenge, acceso: marzo 19, 2025, <https://vacamuertachallenge.ypf.com/>
5. Assessing the effects of water withdrawal for hydraulic fracturing on surface water and groundwater – a review - Meteorology Hydrology and Water Management, acceso: marzo 19, 2025, <https://www.mhwm.pl/pdf-131229-60249?filename=Assessing%20the%20effects%20of.pdf>
6. The Vaca Muerta Tribunal Delegation, acceso: marzo 19, 2025, <https://www.rightsofnaturetribunal.org/vaca-muerta/>
7. Vaca Muerta Will Have its First Gas Fracture by 2024 - Signal Power Group, acceso: marzo 19, 2025, <https://www.signalpowergroup.com/vaca-muerta-will-have-its-first-gas-fracture-by-2024>

8. Artificial Intelligence in the Oil and Gas Industry: Benefits & Use Cases - Ksolves, acceso: marzo 19, 2025, <https://www.ksolves.com/blog/artificial-intelligence/applications-in-oil-gas-industry>
9. The Role of Artificial Intelligence in Optimizing Oilfield Data and Resource Management, acceso: marzo 19, 2025, <https://www.ingenero.com/our-blog/the-role-of-artificial-intelligence-in-optimizing-oilfield-data-and-resource-management/>
10. Original Article: The Role of Artificial Intelligence in Optimizing Oil Exploration and Production, acceso: marzo 19, 2025, https://www.ejcmpr.com/article_210864_5e5c481a5590952690c1c1eb4bf66.pdf
11. Industrial AI Streamlines Oil and Gas Operations - Avathon, acceso: marzo 19, 2025, <https://avathon.com/blog/industrial-ai-streamlines-oil-and-gas-operations/>
12. AI in Oil and Gas: Benefit and Use Cases - Apptunix, acceso: marzo 19, 2025, <https://www.apptunix.com/blog/artificial-intelligence-in-oil-and-gas-benefit-and-use-cases/>
13. A Review of AI Applications in Unconventional Oil and Gas Exploration and Development, acceso: marzo 19, 2025, <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/2/391>
14. Systematic Analysis of Novel Machine Learning Techniques for Hydraulic Fracturing Optimization - Preprints.org, acceso: marzo 19, 2025, <https://www.preprints.org/manuscript/202404.1945>
15. University of Houston: Transforming Subsurface Energy Landscape Through AI and Electrification - JPT, acceso: marzo 21, 2025, <https://jpt.spe.org/twa/university-of-houston-transforming-subsurface-energy-landscape-through-ai-and-electrification>
16. AI-driven supply chain optimization for enhanced efficiency in the energy sector - Magna Scientia, acceso: marzo 21, 2025, <https://magnascientiapub.com/journals/msarr/sites/default/files/MSARR-2021-0060.pdf>
17. (PDF) A COMPREHENSIVE REVIEW ON AI-DRIVEN OPTIMIZATION TECHNIQUES ENHANCING SUSTAINABILITY IN OIL AND GAS PRODUCTION PROCESSES -

ResearchGate, acceso: marzo 21, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/379256420_A_COMPREHENSIVE_REVIEW_ON_AI-DRIVEN_OPTIMIZATION_TECHNIQUES_ENHANCING_SUSTAINABILITY_IN_OIL_AND_GAS_PRODUCTION_PROCESSES

18. Robotics and artificial intelligence in unconventional reservoirs: Enhancing efficiency and reducing environmental impact., acceso: marzo 21, 2025,
<https://wjarr.com/sites/default/files/WJARR-2024-3185.pdf>

19. AI and Machine Learning for Wastewater Treatment Optimization - Jacobs, acceso: marzo 21, 2025,
<https://www.jacobs.com/newsroom/onewater-reflections/ai-and-machine-learning-wastewater-treatment-optimization>

20. Optimizing the Water-Energy Relationship in Hydraulic Fracturing by Utilizing CO2 and Water as Fracturing Agents | Request PDF - ResearchGate, acceso: marzo 21, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/384896164_Optimizing_the_Water-Energy_Relationship_in_Hydraulic_Fracturing_by_Utilizing_CO2_and_Water_as_Fracturing_Agents

21. a comprehensive review on ai-driven optimization techniques enhancing sustainability in oil and gas production - Fair East Publishers, acceso: marzo 21, 2025,
<https://fepbl.com/index.php/estj/article/download/950/1165>

22. AI in Oil and Gas Industry Settings: Use Cases, Benefits, and Examples - AiFA Labs, acceso: marzo 21, 2025,
<https://www.aifalabs.com/blog/artificial-intelligence-oil-gas>

23. Vaca Muerta - Global Energy Monitor, acceso: marzo 21, 2025,
https://www.gem.wiki/Vaca_Muerta

24. Argentina's Vaca Muerta: 10 Years of Fracking and Local Resistance - NACLA |, acceso: marzo 21, 2025,
<https://nacla.org/argentina-vaca-muerta-fracking-resistance>

25. Tackling the Big Data Problem in the Fracking Industry - CSIA, acceso: marzo 21, 2025,
<https://dev.csia.diamax.com/19839/Tackling-the-Data-Problem-in-the-Fracking-Industry>

26. Chasing the ghost of fracking in the Vaca Muerta Formation: Induced seismicity in the Neuquén Basin, Argentina | Seismica, acceso: marzo 21, 2025,
<https://seismica.library.mcgill.ca/article/view/1435>

27. How Oil Exploration in the Vaca Muerta Region is Argentina's Hope to Escape the Economic Crisis | The Atlas Report, acceso: marzo 21, 2025, <https://atlas-report.com/how-oil-exploration-in-the-vaca-muerta-region-is-argentin-as-hope-to-escape-the-economic-crisis/>
28. Vaca Muerta Case (Argentina) - International Rights Of Nature Tribunal, acceso: marzo 21, 2025, <https://www.rightsofnaturetribunal.org/cases/vaca-muerta-case/>
29. Energy Laws and Regulations 2025 | Argentina - Global Legal Insights, acceso: marzo 21, 2025, <https://www.globallegalinsights.com/practice-areas/energy-laws-and-regulations/argentina/>
30. Country Analysis Brief: Argentina - U.S. Energy Information Administration (EIA), acceso: marzo 23, 2025, https://www.eia.gov/international/content/analysis/countries_long/Argentina/pdf/Argentina%202024%20CAB.pdf
31. Oil & Gas Laws and Regulations Report 2025 Argentina - ICLG.com, acceso: marzo 23, 2025, <https://iclg.com/practice-areas/oil-and-gas-laws-and-regulations/argentina>
32. Argentina | iieci - World Bank, acceso: marzo 23, 2025, <https://flaringventingregulations.worldbank.org/argentina>
33. Can oil and gas companies reduce their emissions at Vaca Muerta? - Dialogue Earth, acceso: marzo 23, 2025, <https://dialogue.earth/en/business/can-oil-and-gas-companies-reduce-their-emissions-at-vaca-muerta/>
34. Environmental, Social, and Health Impact Assessment (ESHIA) for Vista Onshore Operations, acceso: marzo 23, 2025, https://www3.dfc.gov/Environment/EIA/vistaaleph/ESIA/Chapter_4/Annex_4_1_HSE_Regulations_and_Permits.pdf
35. How much water does the typical hydraulically fractured well require?, acceso: marzo 23, 2025, <https://profession.americangeosciences.org/society/intersections/faq/how-much-water-does-typical-hydraulically-fractured-well-require/>

36. VACA MUERTA - Spe de Argentina, acceso: marzo 23, 2025, https://www.spe.org.ar/wp-content/uploads/2023/05/VM_The_Journey_has_just_Begun_JEP_May2023_final.pdf
37. IoT for Oil & Gas: Ultimate Control | softengi.com, acceso: marzo 23, 2025, <https://softengi.com/blog/iot-for-oil-and-gas/>
38. How Prescriptive Analytics Reshapes Fracking in Oil and Gas Fields - River Logic, acceso: marzo 23, 2025, <https://riverlogic.com/?blog=how-prescriptive-analytics-reshapes-fracking-in-oil-and-gas-fields>
39. Reciprocating Pumps Condition Monitoring - Baker Hughes, acceso: marzo 23, 2025, <https://www.bakerhughes.com/bently-nevada/orbit-home/orbit-article/reciprocating-pumps-condition-monitoring>
40. Intelligent oil and gas exploration with AI and ML | SoftServe, acceso: marzo 23, 2025, <https://www.softserveinc.com/en-us/industries/the-energy-sector/energy-oil-and-gas/intelligent-oil-gas-exploration>
41. Why SCADA and DCS Face Different Cyber Threats, acceso: marzo 23, 2025, <https://industrialcyber.co/expert/why-scada-and-dcs-face-different-cyber-threats/>
42. Top 3 SCADA Systems For Oil & Gas - MDCplus, acceso: marzo 23, 2025, <https://mdcplus.fi/blog/top-scada-oil-gas/>
43. SCADA System for Oil and Gas | Emerson US, acceso: marzo 23, 2025, <https://www.emerson.com/en-us/automation/control-and-safety-systems/scada-systems/scada-systems-for-oil-and-gas>
44. DCS migration and IT/OT integration oil and gas system integration projects, acceso: marzo 23, 2025, <https://www.controleng.com/dcs-migration-and-it-ot-integration-oil-and-gas-system-integration-projects/>
45. Oil and Gas Process - Distributed Control System(DCS) - YouTube, acceso: marzo 25, 2025, <https://www.youtube.com/watch?v=sn14EDJzp4>
46. E8PC IoT Pressure Sensors/Features - OMRON Industrial Automation, acceso:

marzo 25, 2025, <https://www.ia.omron.com/products/family/3721/>

47. Integrating Serial Sensor Data with a Mobile SCADA System - Pepperl+Fuchs, acceso: marzo 25, 2025,

<https://www.pepperl-fuchs.com/zh-tw/industries-and-trends/applications/integrating-serial-sensor-data-with-a-mobile-scada-system-ga3207>

48. Reliability, Safety, and Environmental Compliance Solutions for Oil & Gas - MultiSensor AI, acceso: marzo 25, 2025, <https://www.multisensorai.com/oil-and-gas>

49. Edge AI in Action in The Oil & Gas Industry - barbara.tech, acceso: marzo 25, 2025, <https://www.barbara.tech/blog/edge-ai-in-action-in-the-oil-gas-industry>

50. How AI-Enabled Digital Twins are Transforming the Oil & Gas Industry - SymphonyAI, acceso: marzo 25, 2025,

<https://www.symphonyai.com/resources/blog/industrial/how-ai-enabled-digital-twins-are-transforming-the-oil-gas-industry/>

51. Hydraulic Fracturing Data Collection Tools Improve Environmental Reporting, Monitoring, Protection | Department of Energy, acceso: marzo 25, 2025,

<https://www.energy.gov/fecm/articles/hydraulic-fracturing-data-collection-tools-improve-environmental-reporting-monitoring>

52. AI Flowchart Generator | Visualize Processes Faster - Miro, acceso: marzo 25, 2025, <https://miro.com/ai/flowchart-ai/>

53. How to Create and Optimize AI Process Mapping - ClickUp, acceso: marzo 25, 2025, <https://clickup.com/blog/ai-process-mapping/>

54. Oil and Gas Process & Workflow Automation Software - FlowForma, acceso: marzo 25, 2025, <https://www.flowforma.com/helping-oil-and-gas>