

Formato de Presentación

ACIPET

Desarrolle sus iniciativas de sustentabilidad a través de la digitalización

Autor(es): Juan Reyes, Consultor de Soluciones – Aspen Technology, juan.reyes@aspentech.com

Categoría: Marque con una “X”

- Artículo Técnico
- Tesis Pregrado
- Tesis Posgrado

Derechos de Autor 2022, ACIPET

Este artículo técnico fue preparado para presentación en el XIX Congreso Regional Colombiano de Petróleo, Gas y Energía organizado por ACIPET en Cartagena, Colombia.

Este artículo fue seleccionado para presentación por el comité técnico de ACIPET, basado en información contenida en un resumen enviado por el autor(es).

Resumen

AspenTech ha desarrollado soluciones innovadoras en Inteligencia Artificial Industrial que permiten mejorar los procesos de descarbonización de los principales procesos de producción de hidrocarburos, aumentar la eficiencia energética, disminuir el consumo de agua, modelar y optimizar los procesos de producción de hidrógeno, utilizar energías alternativas e impulsar la captura y almacenamiento de carbono. En este artículo, se busca presentar una visión integrada para que las industrias de producción, transporte y refinación de hidrocarburos puedan alcanzar sus objetivos de sustentabilidad, presentando referencias de casos de éxito de diferentes compañías a nivel mundial.

Introducción

En los últimos años, la sustentabilidad ha tenido un espacio estratégico clave en todos los agentes de producción y tratamiento de hidrocarburos, en búsqueda de la proyección de la operación en el futuro y en la definición de los objetivos de reducción de impacto ambiental. Las iniciativas asociadas a la sustentabilidad se han generado en parte como consecuencia de los acuerdos internacionales para mitigar los efectos del cambio climático suscritos por los países que albergan a la operación de dichas compañías, como es el caso del Acuerdo de París (UN, 2015).

Los objetivos de sustentabilidad han presentado importantes desafíos a las compañías en la industria de los hidrocarburos, tales como la falta de recursos para la creación de la estrategia de sustentabilidad corporativa y su consecuente implementación, así como también el monitoreo y evaluación de impacto de ésta, para cerrar el ciclo de mejora continua. En particular, el desafío de mantenerse rentables y a la vez de mejorar sus indicadores de sustentabilidad se describe como un desafío dual (AspenTech, 2022). Adicionalmente, se han reportado desafíos relacionados con el incremento de la complejidad de los nuevos procesos de sustentabilidad dentro del capital humano de las compañías, lo que hace complejo sobrellevar estas nuevas iniciativas que afectan a toda la cadena de valor (Forbes, 2021).

Las soluciones digitales han tenido un papel clave en relación con la sustentabilidad, principalmente enfocadas a eficiencia energética, control de polución y optimización de la cadena de valor. La Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés) ha encontrado que las soluciones digitales pueden mejorar la eficiencia energética hasta en un 30% para las operaciones industriales (IEA, 2019).

Se han observado casos de éxito al aplicar tecnologías digitales como la inteligencia artificial (IA), para controlar las operaciones y empoderar a los operadores para tomar mejores decisiones. Se pueden visualizar aplicaciones diversas y relevantes de las soluciones digitales y sustentabilidad, por ejemplo: reducción del consumo de agua y energía, disminución de emisiones de gases de efecto invernadero y emisiones fugitivas de hidrocarburos, mejora de la confiabilidad e integridad de los procesos, innovación en nuevos procesos y productos, integración de las cadenas de valor (producción, transporte, refinación y petroquímica), desarrollo de soluciones innovadoras en economía circular, captura uso y secuestro de carbono, entre otras (AspenTech, 2021).

En la región latinoamericana se han observado iniciativas interesantes relacionadas con la sustentabilidad. Petrobras ha establecido diez objetivos de sostenibilidad que buscan minimizar las emisiones de GEI, aumentar la captura y el almacenamiento de carbono, y maximizar el reciclaje de agua. Estos objetivos de sostenibilidad están alineados con el compromiso de los ODS para 2030 con una reducción del 25% de las toneladas de CO₂ equivalente, en comparación con el resultado de 2015 (Petrobras, 2021).

Un proceso clave que Petrobras ha identificado para alcanzar sus objetivos de sostenibilidad es la transformación digital de su negocio. Su transformación digital se basa en tres iniciativas: *Go Digital*, *Be Digital* y *Go Lean*. Estas iniciativas se centran en plataformas tecnológicas innovadoras y en la innovación digital, así como en la automatización y optimización de procesos.

Otro caso interesante de las empresas en la región lo demuestra Ecopetrol, quien ha logrado resultados financieros positivos en 2020, con planes estratégicos clave de contingencia que implicaron estrategias de adaptación a la volatilidad de los precios, inversión, asignación de capital y rotación del portafolio (Ecopetrol, 2021).

Ecopetrol ha adoptado la estrategia basada en tecnología denominada *SosTecnibilidad*, la cual es un enfoque innovador que consiste en combinar la tecnología con las cuestiones medioambientales, sociales y de gobernanza. Los aspectos clave de esta estrategia son la gestión integral del agua, el cambio climático, la biodiversidad y la economía circular. El Grupo Ecopetrol ha dotado a su organización de nuevas capacidades digitales para el intercambio de información entre personas, empresas y dispositivos, incluyendo la computación en la nube, la IA, la analítica avanzada, el Internet Industrial de las Cosas (IIoT) y la tecnología blockchain. La pandemia de COVID-19 aceleró la transformación digital dentro de la compañía, la cual se ha convertido en un activo clave para la operativa del negocio y es esencial para abordar los objetivos de sostenibilidad propuestos en la estrategia *SosTecnibilidad*.

En este artículo se busca entender cómo la digitalización puede apoyar a las compañías de la industria de los hidrocarburos a alcanzar sus objetivos de sustentabilidad y a su vez mejorar sus procesos productivos para ser más rentables.

Metodología y datos

Este artículo busca presentar las siguientes dimensiones en las que las tecnologías digitales tienen gran relevancia en apoyar al cumplimiento de los objetivos de sustentabilidad: captura, uso y almacenamiento de carbono, economía del hidrógeno, gestión de emisiones y eficiencia energética. Además, presentaremos casos de éxito de compañías que han aplicado estas tecnologías con desafíos transversales a diferentes agentes del sector.

Resultados

A continuación, se presentan las diferentes dimensiones en las que las soluciones digitales pueden apoyar a los objetivos de sustentabilidad.

Captura de carbono, uso y almacenamiento. En relación con la descarbonización, la captura de carbono es una tecnología clave para reducir el impacto medioambiental de las emisiones de CO₂ y sus efectos en el cambio climático. Esta tecnología presenta una serie de desafíos, tales como sus altos costos de capital al escalar las tecnologías actuales de captura de carbono a la demanda requerida, así como también las inversiones de capital requeridas para su transporte y almacenamiento (Vishal, Chandra, Singh, & Verma, 2021).

Adicionalmente, se han observado limitaciones comerciales debido a estos altos costos, tal como un valor presente neto (VPN) negativo para la cadena de valor, especialmente si no existe una fuente de ingresos constante a largo plazo. Los riesgos percibidos a nivel de inversión están asociados principalmente con la gestión de la confiabilidad en el almacenamiento del CO₂ capturado (IEA, 2019).

Existen diferentes soluciones digitales que pueden apoyar a los procesos de captura de carbono, uso y almacenamiento, abarcando el diseño conceptual e investigación, la optimización del proceso de captura, el transporte y almacenamiento, y el monitoreo del almacenamiento y todas las facilidades. Como ejemplo, la simulación de procesos puede apoyar al desarrollo de procesos innovadores con menores costos de capital y operación. Mediante modelado geológico y sísmico, los inversionistas pueden tener más confianza en que el almacenamiento de CO₂ en yacimientos sea seguro y confiable.

En la Figura 1 se presenta el camino de tecnología digital que AspenTech propone para la captura, uso y almacenamiento de carbono. Este camino inicia desde el diseño de las facilidades, con soluciones digitales que permitan diseñar en forma efectiva, representar el

comportamiento de los solventes y el CO₂ en los equipos de captura y despojo, así como también permitir evaluar en forma técnica las diferentes tecnologías existentes para este proceso.

Un ejemplo de este tipo de desarrollos lo realizó CarbonCapture Inc., tomando en cuenta energía solar y la captura de carbono como un sistema integrado, y utilizando la IA industrial de AspenTech en conjunto con un riguroso software de modelado para encontrar soluciones innovadoras y optimizar los diseños encontrados, logrando avances en la escalabilidad y la rentabilidad del proceso (AspenTech, 2022). En este caso en particular, se han desarrollado tecnologías innovadoras en captura directa del aire (DAC por sus siglas en inglés), donde debido a que la concentración de CO₂ en el aire es baja, estos procesos requieren agentes de remoción de CO₂ muy efectivos, tipo zeolitas, solventes líquidos y sólidos de alta adsorción.

Se han desarrollado tecnologías de captura de carbono utilizando herramientas de simulación, tal como la tecnología Fluor Ecoamine FG Plus, la cual ya tiene 30 plantas licenciadas y 30 años de operación. Aspectos claves de esta tecnología se basan en el modelado riguroso de las unidades de captura de carbono con solventes químicos en base de aminas, calibrados con datos de plantas piloto, y los cuales representan el desempeño de la planta a condiciones reales de operación, permitiendo una evaluación en diferentes escenarios. Para ello, se hace uso de la tecnología basada en la velocidad de transferencia de calor y masa (Rate-Based) para el modelado riguroso de las columnas (AspenTech, 2022).

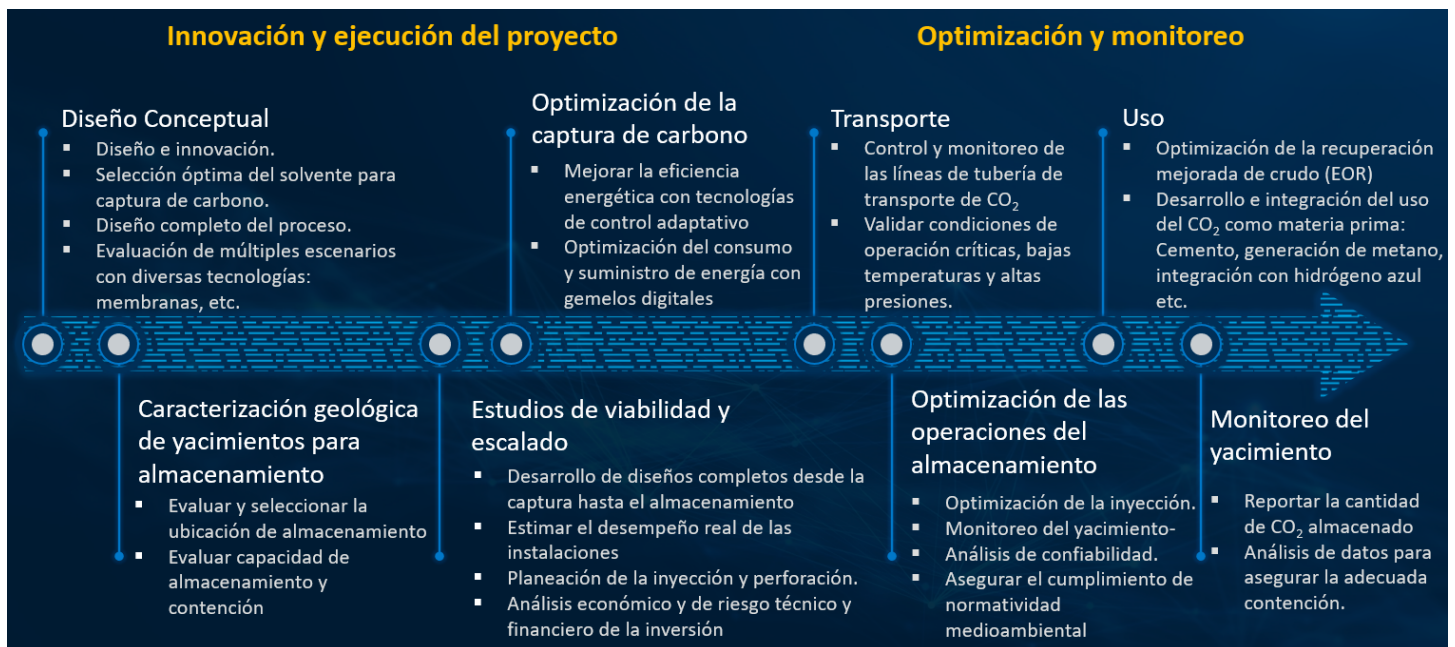


Figura 1. Camino de tecnología digital para la captura de carbono, uso y almacenamiento. Fuente: Autoría propia.

El siguiente punto descrito en la Figura 1 corresponde a la caracterización geológica de yacimientos para almacenamiento de CO₂. La solución digital de caracterización y modelización del subsuelo ofrece la oportunidad de examinar y seleccionar rápidamente los mejores yacimientos para el almacenamiento de carbono, al tiempo que diseña la perforación y la inyección de CO₂ óptimas. Adicionalmente, la solución de interpretación geofísica y modelización de yacimientos, combinado con los historiales de datos de las compañías, ofrece soluciones para la supervisión a largo plazo y auditable del CO₂ almacenado, la cual se presenta como una etapa final de monitoreo del yacimiento para cuantificar la cantidad de CO₂ almacenado y realizar un análisis de contención.

Para esta aplicación, la consultora austriaca NFR Studies GmbH evaluó un yacimiento al final de su vida productiva, candidato para el almacenamiento de carbono. Utilizando la solución de interpretación de sísmica y modelado volumétrico de la red de fallas, se interpretaron alrededor de 40 fallas, logrando identificar y representar el yacimiento y con ello poder avanzar en la evaluación de múltiples escenarios de inyección (AspenTech Subsurface Science and Engineering, formerly Emerson Paradigm, 2005).

La optimización de los procesos de captura de carbono puede realizarse a través de la construcción de un gemelo digital, el cual correspondería a la posibilidad de integrar datos de planta con el modelo matemático del proceso. Este gemelo digital estaría buscando la condición óptima de operación para cumplir con los requerimientos de proceso y maximizar la rentabilidad del proceso en tiempo

real. Un ejemplo de este tipo de aplicaciones fue realizado por Technology Centre Mongstad (TCM), el cual desarrolló un modelo riguroso en la plataforma Aspen Plus® conectado a el historiador de datos Aspen InfoPlus.21®, obteniendo beneficios económicos y operativos importantes (AspenTech, 2022).

En relación a la utilización del carbono capturado, existen diversas tecnologías y aplicaciones tales como: materia prima para procesos químicos, generación de combustibles como la generación de metano, carbonatación mineral, recuperación mejorada de crudo, y conversión biológica y utilización directa de CO₂ (Cuéllar-Franca & Azapagic, 2015). En la práctica, los procesos de utilización de carbono requieren atravesar diversas etapas desde la conceptualización y viabilidad técnica y económica, hasta la optimización completa de la cadena de producción, desde la captura hasta el producto final de uso.

Economía del hidrógeno. La encuesta global de sustentabilidad de AspenTech (AspenTech, 2021), impartida a diversas compañías en el sector energético, encontró que de las inversiones esperadas para ser desarrolladas dentro de los próximos 5 años, el 39% de los encuestados mencionó que el Hidrógeno sería una de ellas. Siendo esta categoría la más mencionada, ratifica su rol en el futuro cercano y valida su importancia para cumplir con los objetivos de sustentabilidad a mediano plazo.

Siendo esta iniciativa de gran relevancia en la actualidad, existen desafíos en toda la cadena de valor, desde la fuente de energía más apropiada para la síntesis de hidrógeno, la tecnología de producción de hidrógeno, la distribución, reconversión y almacenamiento, y finalmente su uso final. Un ejemplo de ello es el análisis de ciclo de vida del hidrógeno SESAME (*Sustainable Energy Systems Analysis Modeling Environment*) realizado por el MIT (Gençer, Torkamani, Miller, Wu, & O'Sullivan, 2020).

Uno de los objetivos principales de SESAME es proporcionar información sobre la viabilidad, la escalabilidad y el potencial de reducción de emisiones de varias vías tecnológicas a medida que se reestructura el sistema energético. Esta aplicación utiliza como motor el simulador de procesos Aspen Plus® para poder representar el comportamiento real de cada una de las configuraciones de producción, tratamiento y uso final, y así generar una base de datos de modelos de simulación que generen información relevante en relación con el consumo de energía y la emisión de gases de efecto invernadero.

Debido a la gran complejidad de estructuras posibles y con restricciones de mercado técnicas y de cadena de valor, se requiere encontrar el camino óptimo de la economía del hidrógeno. Para ello, los beneficios de las soluciones digitales son claves.



Figura 2. Camino de tecnología digital para la economía del hidrógeno. Fuente: Autoría propia.

La posibilidad de innovar en el desarrollo de procesos de electrólisis para la generación de hidrógeno es posible al representar en forma rigurosa los procesos fisicoquímicos y electroquímicos que ocurren dentro de la celda electrolítica, de tal manera que puedan permitir la estimación de productos secundarios y la evaluación de diferentes condiciones de operación para encontrar el desempeño óptimo del proceso. Un ejemplo de este tipo de implementaciones corresponde al estudio publicado por Zaccara et al. (Zaccara, et al, 2020), donde se describe el uso de modelos rigurosos de celdas electrolíticas en base a membranas poliméricas en Aspen Plus® para integrarlos con energías renovables y realizar un análisis de sensibilidad con la finalidad de evaluar el efecto de diferentes condiciones de operación en el proceso. Adicionalmente, se evaluó la integración con otros procesos como la producción de metano y metanol.

Los gemelos digitales en el contexto de la economía del hidrógeno son claves para poder representar y monitorear las plantas de producción de hidrógeno y su integración con otros procesos productivos, encontrando puntos de operación óptimos para reducir así el consumo de energía y aumentar su productividad. Air Products logró disminuir el costo de producción de hidrógeno al integrar 20 plantas de producción de hidrógeno en un único ambiente a través del simulador Aspen Plus® tomando datos en tiempo real, lo que permitió la reconciliación de todas las plantas. Adicionalmente, este gemelo digital le permitió a la compañía encontrar puntos de maximización del rendimiento de cada planta (AspenTech, 2021).

Gestión de emisiones y eficiencia energética. La gestión de emisiones en las compañías de extracción, procesamiento y refinación de hidrocarburos presentan grandes desafíos desde el punto de vista de la medición o estimación, así como también en relación a las limitaciones asociadas a la poca disponibilidad de capital para inversión y mantenimiento de equipos de medición de gases de efecto invernadero en cada una de las fuentes de emisiones, y tomando en cuenta también la dificultad de medir y estimar las emisiones fugitivas de hidrocarburos gaseosos o líquidos que ocurren durante el proceso productivo.

En este punto, las tecnologías digitales pueden apoyar a las compañías a superar estas dificultades y obtener una línea base de emisiones, las cuales, en conjunto con tecnologías para evitar interrupciones, mejorar la estabilidad y optimizar la producción, permiten estimar en forma directa el impacto de cada iniciativa y con ello poder establecer el grado de reducción de emisiones, el cual es un parámetro clave a tener en cuenta dentro de los objetivos de sustentabilidad de las compañías en la actualidad.

En la Figura 3 se presenta el camino digital para la gestión de emisiones, el cual inicia con la medición, estimación y priorización de las fuentes de emisión. En este ítem se busca indicar cómo las soluciones digitales pueden contribuir al desafío de medición y estimación de emisiones. Por ejemplo, Bharat Petroleum pudo obtener beneficios en tiempos de reporte y cumplir con sus objetivos de emisión de CO₂ utilizando un gemelo digital en línea con la plataforma de simulación Aspen HYSYS®, integrado con el historiadore de datos de operación Aspen InfoPlus.21®. Con esta implementación, se pudieron implementar tableros de gestión de emisiones para toda la refinería, los cuales le permitieron a todos los usuarios, independientemente de su nivel de habilidades, utilizar la solución. El gemelo digital le permitió a la refinería estimar en tiempo real las emisiones de CO₂, SO_x, O₂ en exceso, gases de combustión, entre otros (AspenTech, 2021).

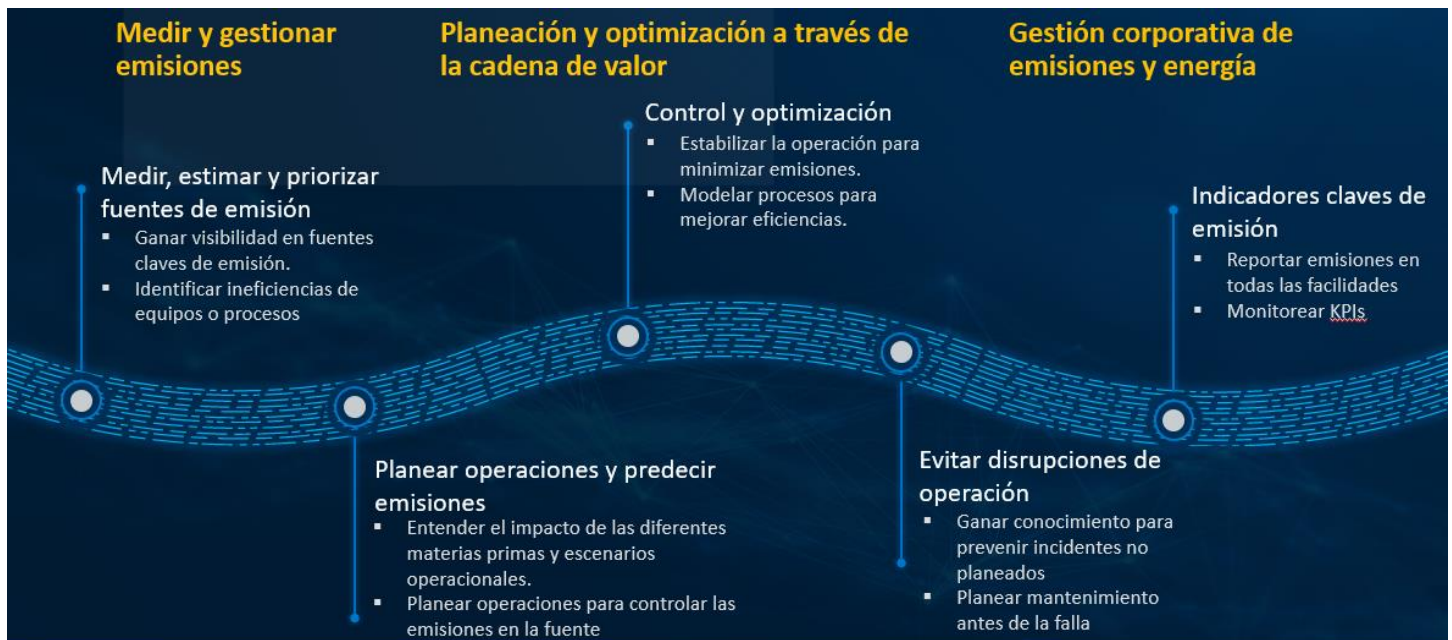


Figura 3. Camino de tecnología digital para la gestión de emisiones. Fuente: Autoría propia.

A nivel de la extracción y producción de crudo y gas, esquemas de gestión de emisiones se pueden establecer para obtener indicadores similares de emisiones. Adicionalmente, la posibilidad de tener cuantificadas las emisiones fugitivas de hidrocarburos gaseosos y líquidos a través del proceso productivo, permite realizar procesos de mejora continua y de operación de excelencia. La Figura 4 ilustra una estación típica de producción de crudo y gas, la cual está enmarcada por tres soluciones digitales.

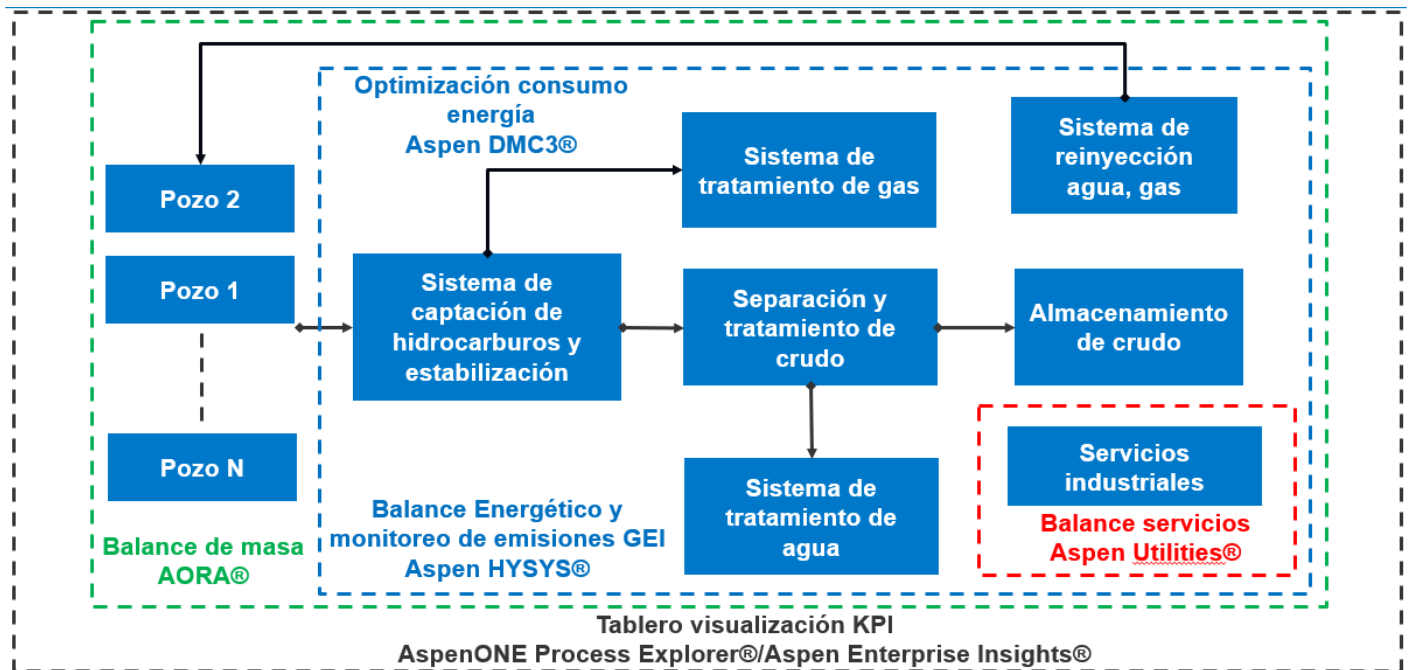


Figura 4. Implementación de un sistema de gestión de emisiones para una estación de producción de crudo y gas utilizando herramientas digitales de AspenTech. Fuente: Autoría propia

En la Figura 4 se pueden visualizar cuatro ambientes que enmarcan una o varias secciones del proceso productivo. En rojo se enmarca el área de servicios industriales, la cual es una de las áreas más relevantes en relación con emisiones y posibilidades de mejora continua, ya que en ella recaen procesos de gestión de energía eléctrica, cogeneración, generación de servicios de calefacción y refrigeración claves para el desempeño de la facilidad de producción. Una solución basada en modelos para la planta de servicios industriales como Aspen Utilities® permite planear, gestionar e incluso optimizar el suministro energético, buscando siempre operar en un rango óptimo y entregando la cantidad de energía que el proceso requiere.

El enmarcado en azul hace referencia a dos aplicaciones. La primera estaría basada en la plataforma de simulación Aspen HYSYS para gestionar y monitorear el desempeño de la facilidad de producción, estimando los requerimientos energéticos de cada equipo del proceso y reportándolo en tiempo real. Adicionalmente, esta plataforma permitiría tener un modelo de las fuentes de emisiones del proceso, tales como hornos, calderas, puntos de quema, entre otros, que permitirían tener una visualización en tiempo real de las emisiones y evaluar soluciones que pretendan mejorar dichos indicadores. Adicionalmente, se indica la herramienta Aspen DMC3® como solución para la optimización del consumo energético, ya que esta solución permite estabilizar la operación, minimizando las emisiones y buscando en tiempo real llevar a la operación al mínimo consumo energético con estrategias de control avanzado basadas en modelos.

El enmarcamiento en color verde corresponde a una herramienta de reconciliación de balances de masa llamada AORA® (Aspen Operations, Reconciliation & Accounting), la cual permitiría establecer todos los flujos que entran y salen de la facilidad e identificar dónde se encuentran las fugas de materia, correspondientes a emisiones fugitivas o problemas de contención, y así poder tomar decisiones al respecto en tiempo real. Adicionalmente, nos permite establecer los flujos de agua a través de toda la planta, lo que puede llevarnos a establecer estrategias de reducción de huella de agua.

Finalmente, el enmarcado en negro, indica la última capa que recoge toda la información que generan cada uno de los sistemas digitales y permite tener una visualización adecuada de la planta de procesamiento, como también de varios sitios de una misma compañía, logrando una visualización a nivel corporativo. Este tipo de implementaciones han tenido gran éxito, como en el caso de ADNOC, compañía de producción de gas con una producción significativa en Medio Oriente. Esta compañía implementó con éxito un sistema de gestión de emisiones fugitivas, CO₂, agua y energía utilizando herramientas digitales de AspenTech. ADNOC obtuvo beneficios como reducción del 10% del consumo de energía y 5% del consumo de agua, e identificó problemas con las unidades de compresión de gas para reinyección que permitieron una mejora significativa en la operación de la planta (AspenTech, 2021).

El esquema de gestión de emisiones y energía es una herramienta que puede apoyar procesos de certificación de mejora continua, tal como es el caso de la norma ISO 50001, relacionada con sistemas de gestión energética. En ella, los procesos de planeación energética, implementación y operación, revisión, monitoreo, medición y análisis, y corrección de no-conformidades, acciones correctivas y preventivas estarían alineados con el sistema de gestión de emisiones y energía descrito en la Figura 4.

Una herramienta crítica para la eficiencia energética de los procesos de producción de hidrocarburos es el control avanzado de procesos (APC por sus siglas en inglés). Por ejemplo, este tipo de tecnologías aplicadas a el área de la refinación pueden tener múltiples beneficios como: incrementar la eficiencia de hornos y calderas, optimizar la calidad de los productos refinados minimizando el consumo energético y la recirculación de productos, y maximizando la recuperación de energía de calentamiento y refrigeración en esquemas integrados, entre otros (Lodolo, 2022).

Un ejemplo clave en la región fue la implementación de una capa de optimización dinámica de la producción para toda una línea productiva con herramientas de control avanzado por unidad de proceso, implementado por Ecopetrol S.A. En dicha implementación, la solución digital Aspen GDOT® permitió integrar todas las soluciones de APC en una de sus refinerías, esperando tener un beneficio de productividad como en la reducción del consumo energético de toda la refinería (Businesswire, 2021).

Discusión y conclusiones

Diferentes compañías han hecho uso de soluciones digitales para apoyar al cumplimiento de sus objetivos de sustentabilidad en forma exitosa. Estas soluciones tienen un carácter modular y pueden adaptarse a las necesidades de cada una de las compañías, de acuerdo a sus necesidades particulares. Es claro que los cambios en el mercado de combustibles y de venta de hidrocarburos líquidos o gaseosos implicarán cambios en las cadenas de producción y en los modelos de negocio. En la Figura 5, se presenta una visión de la línea de tiempo de implementación de estas soluciones y posibles rutas y caminos para la conseguir afrontar el desafío dual de sustentabilidad y rentabilidad.



Figura 5. Línea de tiempo de impacto en el mercado para las rutas tecnológicas en sustentabilidad. Fuente: Autoría propia.

En conclusión, las herramientas digitales tienen un lugar clave en las iniciativas de sustentabilidad y pueden abrir caminos nuevos y nuevas posibilidades para las compañías del sector en un ambiente cambiante y volátil como el actual.

Referencias

- AspenTech. (2021). *Digital Emission and Efficiency Monitoring Through Modeling Improves Sustainability and Margins at BPCL's Kochi Refinery*. Retrieved from AspenTech.com: <https://www.aspentech.com/en/resources/white-papers/digital-emission-and-efficiency-monitoring-through-modeling-improves-sustainability-at-bpcl>
- AspenTech. (2021). *On-Demand Data Reconciliation for a Fleet of Hydrogen Production Plant*. Bedford MA: AspenTech. Retrieved from <https://www.aspentech.com/en/resources/on-demand-webinars/on-demand-data-reconciliation-for-a-fleet-of-hydrogen-production-plant>
- AspenTech. (2021). *Sustainability takes center stage*. Bedford MA: AspenTech. Retrieved from <https://www.aspentech.com/en/resources/executive-brief/sustainability-takes-center-stage>
- AspenTech. (2021). *Sustainability, Decarbonization and Industry Initiatives: Survey Findings and Analysis*. Bedford MA: AspenTech. Retrieved from <https://www.aspentech.com/en/resources/report/sustainability-decarbonization-and-industry-initiatives-survey-findings-and-analysis>
- AspenTech. (2021). *Track Emissions, Manage Compliance Sitewide with Digital Twins*. Retrieved from AspenTech.com: <https://www.aspentech.com/en/resources/on-demand-webinars/track-emissions-manage-compliance-sitewide-with-digital-twins>
- AspenTech. (2022). *Addressing Key Technical and Economical Challenges of Carbon Capture Technology*. Retrieved from [aspentech.com: https://www.aspentech.com/en/resources/on-demand-webinars/addressing-key-technical-and-economical-challenges-of-carbon-capture-technology](https://www.aspentech.com/en/resources/on-demand-webinars/addressing-key-technical-and-economical-challenges-of-carbon-capture-technology)
- AspenTech. (2022). *Mastering the dual challenge*. Retrieved from AspenTech web site: <https://www.aspentech.com/en/resources/video/mastering-the-dual-challenge>
- AspenTech. (2022). *Optimizing Carbon Capture Utilization and Storage to Meet Ambitious Sustainability Goals*. Retrieved from AspenTech.com: <https://www.aspentech.com/en/resources/white-papers/optimizing-carbon-capture-utilization-and-storage-to-meet-ambitious-sustainability-goals>
- AspenTech Subsurface Science and Engineering (Formerly Emerson Paradigm). (2005). *From Seismic Interpretation to Reservoir Model: An Integrated Study to Tackle the Structural Complexity of the Vienna Basin*. Retrieved from <https://www.pdgm.com: https://www.pdgm.com/resource-library/customer-stories/From-Seismic-Interpretation-to-Reservoir-Model-An>
- Businesswire. (2021, Marzo 18). *Ecopetrol extiende su inversión en Soluciones de Aspen Technology para acelerar sus iniciativas de transformación digital*. Retrieved from <https://www.businesswire.com: https://www.businesswire.com/news/home/20210318005214/es/>
- Cuéllar-Franca, R. M., & Azapagic, A. (2015). Carbon capture, storage and utilisation technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts. *Journal of CO2 Utilization*, 82-102.
- Ecopetrol. (2021). *Integrated Sustainable Management Report*. Bogota: Ecopetrol. Retrieved from <https://files.ecopetrol.com.co/web/esp/cargas/aga2022/220318-Integrated-Report-2021.pdf>
- Forbes. (2021, October 23). *How The Oil And Gas Industry Is Building A Sustainable Future*. Retrieved from Forbes web site: <https://www.forbes.com/sites/sap/2021/10/23/how-the-oil-and-gas-industry-is-building-a-sustainable-future/?sh=469a11ec72ce>
- Gençer, E., Torkamani, S., Miller, I., Wu, T. W., & O'Sullivan, F. (2020). Sustainable energy system analysis modeling environment: Analyzing life cycle emissions of the energy transition. *Applied Energy*. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626192031062X?via%3Dihub>
- IEA. (2019). *Energy efficiency 2019*. International Energy Agency.
- IEA. (2019). *Transforming Industry Through CCUS*. International Energy Association. Retrieved from https://iea.blob.core.windows.net/assets/0d0b4984-f391-44f9-854f-fda1ebf8d8df/Transforming_Industry_through_CCUS.pdf
- Lodolo, S. (2022, Mayo). Save energy and reduce CO2 emissions with closed-loop optimization of utilities networks. *Hydrocarbon Processing*, 43-48.
- Petrobras. (2021). *Sustainability Report*. Petrobras. Retrieved from <https://sustentabilidade.petrobras.com.br/en/>
- UN. (2015). *The Paris Agreement*. United Nations.
- Vishal, V., Chandra, D., Singh, U., & Verma, Y. (2021). Understanding initial opportunities and key challenges for CCUS deployment in India at scale. *Resources, Conservation and Recycling*.
- Zaccara, A., Petrucciani, A., Matino, I., Branca, T. A., Dettori, S., Lannino, V., . . . Panopoulos, K. (2020). Renewable Hydrogen Production Processes for the Off-Gas Valorization in Integrated Steelworks through Hydrogen Intensified Methane and Methanol Syntheses. *Metals*, 1-24. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2075-4701/10/11/1535>