Metodología Estocástica de Optimización de Instalaciones de Producción® - **MEOIP®**

MIGUEL AGÜERO L., ELIMAR ROJAS M., LIGIA SALAS R., KARINA MEDINA B.

1. Introducción.

Durante los últimos años, las más importantes empresas petroleras del mundo han realizado esfuerzos para mejorar su desempeño, tanto en rentabilidad como seguridad y protección ambiental, mediante la implantación de mejores prácticas y la implementación de disciplinas, metodologías y herramientas de confiabilidad Integral. Esto enmarcado en conjunto de normas y leyes regionales e internacionales, así como bajo limitaciones presupuestarias, lo cual hace de las decisiones procesos más complejos por la amplitud de variables a considerar.

En particular, dichas empresas han enfocado sus esfuerzos para alcanzar el nivel de clase mundial en la gestión de mantenimiento y llevan a cabo una serie de iniciativas que permitirán optimizar de forma integral el proceso de gestión de mantenimiento de los activos en las diferentes organizaciones involucradas en la cadena de valor o productiva de la industria petrolera, es decir, exploración, producción, refinación, comercialización y distribución del petróleo y sus derivados.

Durante los últimos años se ha desarrollado un nuevo concepto de gerencia soportado en la toma de decisiones que incorporan las mejores prácticas o Metodologías y Herramientas de Confiabilidad, conocido como Gerencia de Activos para consolidarse como empresas de Mantenimiento Clase Mundial.

Para lograr estos objetivos, se propone la aplicación de la metodología que combina la ingeniería de procesos, la ingeniería de confiabilidad y la ingeniería económica conocida como Metodología Estocástica de Optimización de Instalaciones de Producción (MEOIP®), la cual considera los cambios y/o modificaciones en los sistemas o procesos mediante la incorporación, desincorporación o reemplazo de equipos, la aplicación de nuevas políticas de mantenimiento, cambios en la mantenibilidad de los equipos, cambios en la política de inventarios o la utilización de nuevas tecnologías, entre otros; obteniendo para cada momento de la vida del proyecto en análisis, instalaciones optimas según múltiples criterios, lo que implica un constante redimensionamiento de las capacidades instaladas.

MEOIP® surge de la necesidad de optimizar las instalaciones o infraestructura de producción como parte integral de la optimización de proyectos o inversiones asociados a procesos productivos, manteniendo o superando los objetivos comprometidos en las áreas de producción, rentabilidad, seguridad, protección ambiental y presupuestarios, entre otros. La optimización se sustenta principalmente en la valoración de múltiples criterios de seguridad, confiabilidad, capacidad, flexibilidad operativa, impacto ambiental, eficiencia operativa, perfiles de producción e ingresos, entre otros, los cuales son definidos y evaluados por un equipo de trabajo, en donde participan personas con diferentes conocimientos y especialidades.

Como producto del análisis, se lograrán decisiones y acciones, que influirán en el ciclo de vida del activo y determinarán las opciones que redimensionen las instalaciones, las cuales serán jerarquizadas de acuerdo a parámetros económicos, para encontrar la mejor combinación riesgo-rentabilidad.

El MEOIP® es un proceso complejo que contempla ocho etapas principales en su desarrollo

1. Identificar Necesidad.
2. Definir Alternativas.
3. Recolectar Información.
4. Análisis de Ingeniería de Proceso.
5. Análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad (CDM).
6. Análisis Económico.
7. Jerarquizar Alternativas.
8. Definir Planes de Acción.

La utilización de esta metodología permite obtener entre otros beneficios:

- Optimizar la utilización de las instalaciones de producción.
- Establecer sensibilidades entre la capacidad instalada y la requerida para el cumplimiento de los compromisos de producción y seguridad.

- Pronosticar para un periodo de tiempo la disponibilidad y factor de producción diferida de un proceso de producción basado en su configuración, en la confiabilidad de sus componentes y en las filosofías de operación y mantenimiento.
- Estimar los ingresos y egresos de las opciones de optimización de instalaciones.
- Detectar y jerarquizar opciones de optimización de instalaciones, buscando la mejor combinación de riesgo y rentabilidad.
- Desarrollar proyectos de confiabilidad donde se involucre al personal de operaciones, mantenimiento, seguridad industrial, control de calidad, suministro, ingeniería de proyectos, procesos, etc.

Cabe destacar que la aplicación de esta metodología depende de la calidad de la información recopilada, el tratamiento de la misma, la definición de las alternativas, el adecuado análisis de procesos, confiabilidad y económico, y muy particularmente del trabajo en equipo, de los integrantes del mismo, que realiza la aplicación de esta metodología, para jerarquizar y definir los planes de acción.

2. Equipo de Trabajo.

El equipo de trabajo tiene como objetivo realizar las actividades relacionadas a la aplicación sistemática de la Metodología Estocástica de Optimización de Instalaciones de Producción.

Dado que el análisis del optimización involucra diversas áreas del conocimiento y en algunos casos depende de los resultados de otras metodologías de confiabilidad (Análisis Causa-Raíz, Análisis de Criticidad, Inspección Basada en Riesgo, Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, entre otros), sus resultados se fundamentan en cómo se involucren los especialistas claves que posean el conocimiento y la experiencia adecuada para el desarrollo del análisis, siendo necesaria la intervención de diferentes áreas del conocimiento como: operación, productividad, mantenimiento, seguridad, procesos, finanzas, planeación y presupuesto, análisis de riesgo, etc.

El Equipo de Trabajo esta normalmente integrado por personal técnico con las siguientes funciones y responsabilidades, entre otras (Ver Figura 3. 1):

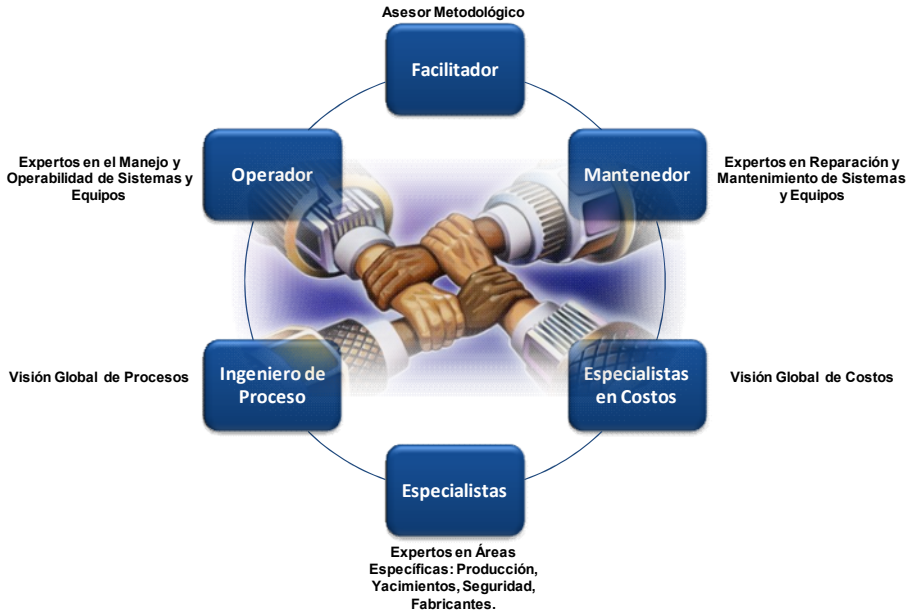

Figura 3. 1. Equipo de Trabajo

- Líder del Equipo: poseer experiencia en análisis de los equipos objeto de estudio, así como habilidades y conocimiento de la metodología, ya que es el responsable de los resultados del análisis. Entre otras cosas, debe convocar al equipo de trabajo, velar por la buena conducción del análisis, dar seguimiento a los acuerdos generados y asegurar que las recomendaciones sean ejecutadas.
- Facilitador o Asesor de la Metodología: responsable de guiar el desarrollo de los análisis necesarios, definir en conjunto con el líder del Equipo los datos a ser solicitados a cada miembro del equipo, los niveles de exactitud

requeridos en el análisis, establecer las actividades de control de calidad de los datos suministrados y contribuir en la realización de los cálculos necesarios (selección y aplicación de normas, manuales o software especializado).

- Mantenedor: responsable de suministrar información histórica del tiempo para la falla, tiempo para reparar, tiempos para reemplazos, estrategias de mantenimiento, reparaciones y/o modificaciones en los equipos.
- Operador: responsable de suministrar las condiciones de operación del proceso o de los equipos objeto de estudio, condiciones normales de operación, filosofías de operación, diagramas de flujo de procesos y de tubería e instrumentación, plano de localización y pronósticos de producción de la instalación o proceso, tiempos requeridos para sacar fuera de servicio y poner en servició los equipos afectados por una falla.
- Ingeniero de Proceso: responsable de proveer las condiciones de proceso, identificar las corrientes y características de los fluidos manejados en los equipos objeto de estudio, filosofía de operación del proceso, capacidad instalada, afectación en producción resultado de la falla de equipos o de cualquier otro evento no deseado que impacte los objetivos de producción de manera parcial o total, identificar las alternativas de rediseño y realizar las simulaciones de proceso de las alternativas consideradas y recomendar los escenarios más viables desde el punto de vista técnico y de capacidad del proceso.
- Especialista en Costos: responsable de realizar las evaluaciones económicas de todas las posibles alternativas que se generen, así como de suministrar los datos de costos de la instalación o equipos, los costos de pérdidas de producción, costos de mantenimiento, de mano de obra, de operación, procura de partes o equipos e inventario de activos.
- Otros Especialistas o personal técnico especial, que participara activamente en el análisis de la situación, planteamiento y validación de las soluciones. Los especialistas que pueden participar son:
    - Ingeniero de Producción o Yacimientos: responsable de suministrar los perfiles de producción, reservas remanentes, plan de explotación de los yacimientos asociados a las instalaciones, sistemas, procesos o equipos objeto de estudio. Así como, identificar las alternativas de rediseño, realizar las simulaciones necesarias de las alternativas consideradas y de recomendar los escenarios más viables en su área de conocimiento.
    - Especialista en Seguridad: responsable de suministrar información asociada a la seguridad, accesibilidad, posibles riesgos a las personas, permisos, riesgo de los desechos, sistemas de seguridad y protección ambiental y las regulaciones vigentes.
    - Fabricante: responsable de aportar información y apoyo técnico sobre los equipos involucrados en el análisis, uso de nuevas tecnologías, experiencias de sus equipos en otras instalaciones, mejores prácticas, entre otros.

3. Descripción de la Metodología.

A continuación se presentan las actividades y los requisitos aplicables para efectuar de manera secuencial, las fases de la Metodología Estocástica de Optimización de Instalaciones de Producción (MEOIP®), la documentación a generar y la información requerida para que los análisis se realicen en forma adecuada.

Con el fin de analizar las instalaciones de acuerdo a los requerimientos operacionales, de mantenimiento o de los pronósticos de producción que consideren la declinación de yacimientos y la capacidad instalada, se debe evaluar, si es necesario redimensionar las instalaciones, a través del análisis de la información histórica, pronósticos, ingeniería, diseño, mantenimiento y análisis de costos, para la adecuación, incorporación o desincorporación de equipos, con el objeto de optimizar la utilización de los mismos y sus indicadores (producción, operación, confiabilidad, financieros, etc.).

El MEOIP® es un conjunto de actividades que consideran el análisis de la información de diferentes fuentes de datos históricos, diseño, mantenimiento y análisis de costos, con el objeto de realizar un análisis probabilístico e integral de la instalación sistema o proceso bajo estudio, que permita verificar o adecuar el proceso a las necesidades operativas de acuerdo al contexto operacional considerando el perfil de producción, la capacidad instalada y el horizonte económico definido en la planeación estratégica. El mismo contempla las siguientes etapas

- Identificar las necesidades.
- Definir las alternativas de evaluación.
- Recolectar la información requerida.
- Evaluar desde el punto de vista de ingeniería de procesos: la capacidad actual de las instalaciones, redes de transporte y equipos para procesar los perfiles de producción previstos o los cambios en las variables de operación.
- Evaluar desde el punto de vista de ingeniería de confiabilidad: la confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad de las instalaciones bajo estudio, considerando las filosofías de operación y mantenimiento.
- Realizar el análisis económico de las diferentes alternativas evaluadas, considerando los resultados de los análisis de proceso y de confiabilidad previamente realizados, así como las variables económicas que apliquen.

- Jerarquizar las alternativas en función del análisis de ingeniería económica.
- Generar las recomendaciones y definir los planes de acción para la implantación de la alternativa.

La Figura 3. 2 muestra de manera esquemática las etapas de la metodología, mientras que la

Figura 3. 3 presenta el diagrama de flujo, basado en el Estándar NORZOK Z-016, que permite visualizar con más detalle las actividades a seguir para la selección de las alternativas y la aplicación de dicha metodología.

Cabe destacar que la aplicación de esta metodología depende de la calidad de la información recopilada, su tratamiento, la definición de las alternativas, los análisis de procesos, confiabilidad y económicos, y muy particularmente del trabajo en equipo y del aporte de cada uno de los integrantes del mismo, que realiza la aplicación de esta metodología para jerarquizar las alternativas, generar las recomendaciones y definir los planes de acción.

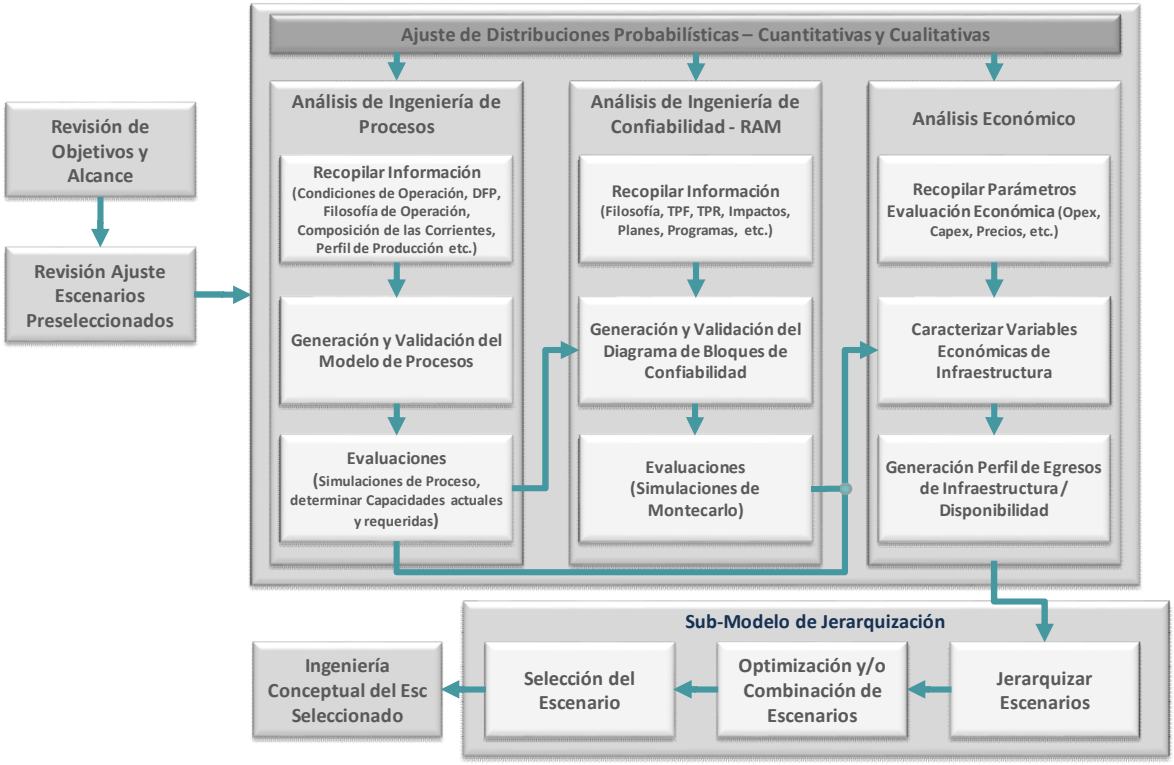

Figura 3. 2. Etapas de la Metodología Estocástica de Optimización de Instalaciones de Producción.

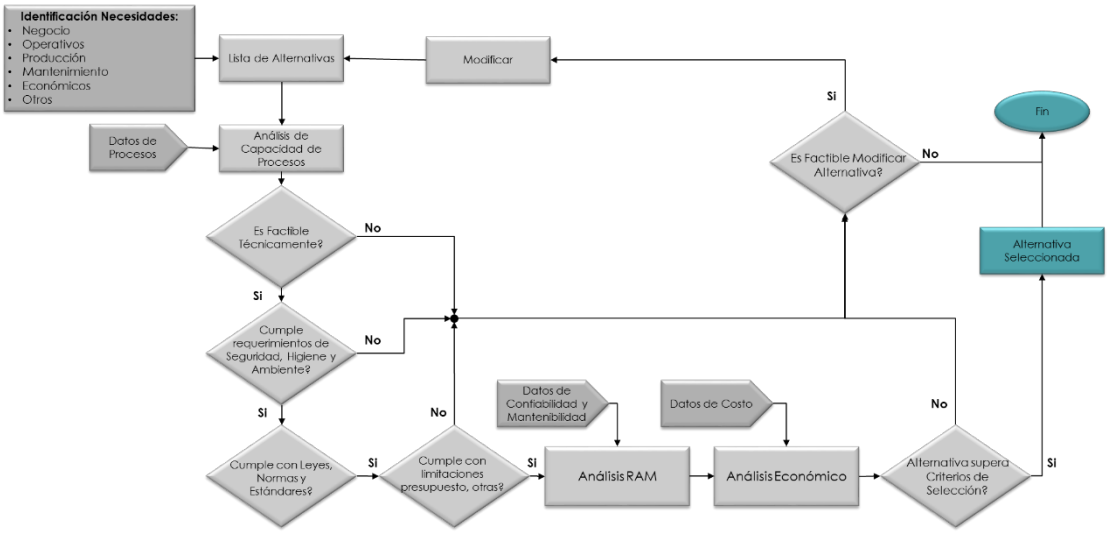

Figura 3. 3. Diagrama de Flujo para la Optimización de Instalaciones de Producción

3.1. Identificación de las Necesidades.

La optimización o redimensionamiento de una red, instalación, sistema o proceso, dependerá del contexto operacional del que se trate, ya que la experiencia indica que una parte importante de los eventos de fallas son asociados a incompatibilidades entre el diseño y el contexto operacional, y sus posibles variaciones en el cual los equipos o instalaciones deben operar.

El identificar las áreas de oportunidad dentro de los procesos de cada instalación e identificar los que tienen mayor impacto en el beneficio de los mismos, permite dirigir con mayor eficacia los criterios de redimensionamiento.
En base a lo anterior, entre los motivos más comunes que originan un redimensionamiento destacan (Ver

Figura 3. 3):

- Requerimientos del negocio: perfiles de producción, optimización del personal, requerimientos del mercado, etc.
- Requerimientos Operacionales: sub-utilización de la infraestructura, cambios del contexto operacional, etc.
- Requerimientos de Mantenimiento: costos excesivos, políticas de inventarios, etc.
- Recomendaciones o plan de acción de la aplicación de otras metodologías de confiabilidad, como: Análisis Causa-Raíz (ACR), Análisis de Criticidad (AC), Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (MCC) u otras metodologías.

3.2. Definición de Alternativas.

Una vez identificada la necesidad de aplicación de la metodología, se tratan de definir las alternativas de redimensionamiento a través del Análisis de Ingeniería de Proceso y el Análisis de Ingeniería de Confiabilidad (CDM - Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad) para su posterior Análisis Económico. Básicamente estas tres fases sustentan la MEOIP®.

En el Análisis de Ingeniería de Procesos, las opciones o alternativas de redimensionamiento se definen considerando requerimientos como: pronostico de producción, el diseño de acuerdo a las normas y estándares, condiciones de operación, limitaciones del proyecto, estándares de seguridad e higiene, regulaciones ambientales, análisis de riesgos y requerimientos del negocio de acuerdo a los planes de desarrollo actuales y futuros que existen para la explotación del campo y en donde se involucran las organizaciones de explotación, producción y operación del activo bajo estudio.

El Análisis CDM caracteriza el estado actual de los equipos y sistemas y predice su comportamiento futuro; involucra la recopilación de los datos de fallas y reparación de activos con el propósito de realizar un diagnóstico de la disponibilidad y producción diferida del sistema. Este análisis considera la evaluación de las opciones o alternativas de redimensionamiento de acuerdo al cumplimiento de la función del sistema, estándares de seguridad y requerimientos del negocio.

Mientras que, en el Análisis Económico, las opciones o alternativas de redimensionamiento se definirán considerando requerimientos netamente financieros de acuerdo requerimientos del negocio (rentabilidad esperada, riesgo económico, presupuesto, otros).

3.3. Recopilación de la Información.

La recolección de datos es uno de los pasos más importante para el desarrollo de la Metodología Estocástica de Optimización de Instalaciones de Producción (MEOIP®), en conjunto con la definición de las alternativas, ya que la cantidad y calidad de la misma reduce los valores de incertidumbre en el análisis, permitiendo una caracterización más adecuada del comportamiento de las variables.

Los analistas de diseño, operación, mantenimiento y costos que integran el equipo de trabajo, deben realizar la recopilación de datos de operación de los procesos, así como los datos de fallas de sus instalaciones y equipos, con sus impactos asociados, con el fin de realizar un tratamiento de los mismos, para conducir adecuadamente los análisis de Ingeniería de Proceso e Ingeniería de Confiabilidad y posteriormente en conjunto con los datos recolectados para el análisis económico, realizar los cálculos, jerarquizar las opciones y seleccionar la mejor alternativa de redimensionamiento.

A. Información del Proceso.

Para el adecuado análisis de ingeniería de proceso, se debe recopilar entre otra, la siguiente información:

- Diagramas de flujo de procesos (DFP´s o PFD´s).
- Diagramas de tubería e instrumentación (DTI´s o PID´s).
- Planos de localización general de equipos (Plot plant o PLG´s).
- Filosofías de operación o manuales de operación.
- Condiciones de operación (flujo, presión y temperatura) y sus tendencias.
- Reportes de operación.
- Resultados de evaluaciones técnicas previas.
- Simulaciones de la redes de crudo y gas con la finalidad de conocer el impacto de producción en caso de ocurrir una falla en cualquier elemento o equipo del sistema.
- Características de las tuberías (diámetro, longitud) y de los equipos (capacidad mínima, normal, máxima, etc.).

También se debe considerar la búsqueda de nuevas tecnologías o herramientas computacionales que soporten las opciones de rediseño para cada uno de las alternativas identificadas.

B. Información de Confiabilidad de Equipos.

Para el adecuado análisis de confiabilidad, debe recopilarse, entre otros, la siguiente información:

- Datos de fallas.
- Datos de reparación.
- Datos del mantenimiento de equipos.
- Catálogo de fallas.
- Manuales de operación o del proveedor (para equipo genérico) de los equipos analizados y de sus sistemas de control y de seguridad.
- Registros y reportes de inspecciones de los equipos, reparaciones y/o reemplazos.
- Datos de producción diferida, impacto en seguridad y ambiente, etc.
- Planes de mantenimiento e inspección.
- Información específica sobre las fallas: causas inmediatas, estudios previos, entre otros.
- Reportes de mantenimiento.

Es de resaltar que la cantidad y calidad de los datos de tiempo entre fallas y para reparar reducen los valores de incertidumbre en el análisis. Por lo tanto, se recomienda usar en orden de prioridad:

- Base de datos histórica disponibles.
- Base de datos histórica de fallas de equipos similares existentes en otras instalaciones, previamente filtradas y adecuadas al contexto operacional en estudio para posteriormente estimar y decidir su utilización.
- Datos proveniente de bases de datos genéricos como OREDA, PARLOC, WELL MASTER, IEEE: que contienen tasas de fallas y tiempos de reparación de reconocidas fuentes internacionales, las cuales son muy útiles en instalaciones nuevas, cuando no se pueden hacer determinadas pruebas por características propias de los procesos o simplemente cuando no se tiene bien documentado el registro de las fallas.
- Datos de opinión de expertos. En los casos donde no se cuenta con suficiente información de campo, y en ausencia de ella existen metodologías que permiten la recolección de información bajo opinión de expertos.

C. Información para el Análisis Económico.

Para llevar a cabo el análisis económico de las alternativas que sean seleccionadas es importante recopilar la siguiente información:

- Costos de operación.
- Costos de mantenimiento (programado y correctivo): personal, equipos y materiales consumibles.
- Costo de los activos (Impuestos).
- Costos de planeación e ingeniería del proyecto.
- Costos de construcción para nueva infraestructura.

- Costos de adquisición e instalación de equipos y tuberías (rotativos, eléctricos, instrumentos, estáticos, etc.).
- Tasa de inflación.
- Tasa de descuento para evaluación de proyectos.
- Depreciación (método o porcentaje).
- Tasa de cambio (Moneda Nacional / US Dólar).
- Precio unitario del producto para el período de evaluación (Ej. Dólares por Barril).
- Horizonte económico para la evaluación.

D. Información Adicional.

Para evaluaciones de campos de producción es requerida la siguiente información:

- Plan de negocios y desarrollo de infraestructura o instalaciones.
- Perfiles de producción de crudo, gas y otros fluidos asociados al crudo.
- Lista de pozos activos indicando: producción neta, producción bruta, tipo de completación o terminación del pozo, tipo de método de producción, pronóstico de producción, ubicación, etc.
- Planes y estudios previos de explotación de reservas remanentes, probadas y posibles.
- Plan de intervención de pozos.
- Costos de perforación o rehabilitación de pozos.
- Costos de transporte: terrestre, aéreo o marítimo.
- Asociación yacimiento – Instalación.
- Declinación por yacimiento.
- Porcentaje de agua y sedimento.
- Relación gas - petróleo (RGP).
- Factores de recobro, entre otros.

3.4 Validación y Tratamiento de la Información.

Al igual que la recolección de información, la validación y tratamiento de la información es parte integral para la adecuada aplicabilidad de la Metodología Estocástica de Optimización de Instalaciones de Producción (MEOIP®) permitiendo una mejor representatividad del nivel de incertidumbre y valores más probables de las variables dentro del modelo.

A. Información del Proceso.

Para realizar el tratamiento de los datos recopilados, el analista de procesos deberá validar la información a través de las visitas a campo y entrevistas con el personal de operaciones y de mantenimiento, con el fin de adquirir el conocimiento adecuado del proceso que se va a analizar y asegurar la realidad y autenticidad de los datos que se utilizarán en los modelos de simulación de proceso. En tal sentido, es recomendable el uso de herramientas de cálculo para la validación o reconciliación de datos de la información de procesos recolectada.

B. Información de Confiabilidad de Equipos.

Para realizar el tratamiento de los datos de confiabilidad recopilados, el analista de mantenimiento integrante del equipo de trabajo deberá validar la información a través de visitas a campo y entrevistas con los mantenedores de tal forma que se puedan determinar, clarificar y clasificar la información. Así mismo, es factible el uso de datos disponibles asociados a estudios previos como Análisis de Criticidad o Mantenimiento Centrado en Confiabilidad.

La base fundamental para el análisis de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad es la caracterización de los tiempos para la falla (Tiempo Promedio para la Falla - TPPF ó MTTF) y tiempos para reparar (Tiempos Promedio Para Reparar - TPPR ó MTTR) para los diversos equipos del sistema de producción en estudio. En tal sentido, se debe tener presente que:

- El tiempo promedio entre eventos de paro (TPEEP) y la tasa de interrupciones (λ_i) son los indicadores estadístico de mayor interés en el estudio del "up-time".
- El TPEEP es el promedio de los tiempos entre interrupciones de diversa índole o causa. Mientras que la tasa de interrupciones es un indicador de la frecuencia con que el equipo o sistema bajo análisis, sale de servicio por razones de diversa índole o causa.

- Cuando los eventos que ocasionan paros son solo fallas; es decir; no se toma en cuenta las paradas para mantenimientos planificados; al tiempo promedio entre eventos de paro (TPEEP) se le llama tiempo promedio para fallar (TPPF) y la tasa de interrupciones (λ_i); toma el nombre de tasa de Fallas (λ = 1/TPPF).
- El tiempo promedio para fallar (TPPF) o Tiempo Esperado para la Falla, corresponde a la media de la distribución de la variable aleatoria tiempo para la falla y permite inferir el promedio de tiempo que un equipo o una familia de equipos pueden operar antes de la ocurrencia de una falla. Así mismo es un parámetro muy importante para la selección de equipos y diseño de sistemas.
- El tiempo para reparar (TPR) es el tiempo que transcurre desde que ocurre la falla hasta que el equipo es puesto en operación después de su reparación, por lo que incluye tanto el tiempo efectivo de la reparación así como todas las actividades previas y posteriores a esta, que permiten restituir las condición de operación del equipo o sistema.
- El Tiempo para Mantenimiento (TM) es el Tiempo que transcurre desde que el equipo es desactivado para hacerle mantenimiento; hasta que es puesto en operación.
- El tiempo promedio para reparar (TPPR) es la sumatoria de los tiempos para reparar (TPR) y para mantenimiento (TPM) de la muestra divido por la suma del número de valores del TPR y el número de valores del TM de la muestra.
- La tasa de reparación (μ) es el inverso del TPPR, es decir, (1/TPPR).

En el caso de no contar con suficiente información para la obtención de TPPF y TPPR de cada elemento del sistema, es posible combinar la información proveniente de las bases de datos genéricas adecuada al contexto operacional bajo análisis, seleccionando de las bases de datos, solo aquellos modos de fallas que puedan realmente ocurrir en el entorno bajo estudio y la información obtenida por la evidencia propia o de sistemas o procesos similares.

En tal caso, el Teorema de Bayes permite hacer las combinaciones de forma estructurada y matemática de la experiencia de otros como "Conocimiento previo" normalmente representado por una distribución de probabilidades, con los datos de la experiencia propia (Evidencia) obteniendo una distribución de probabilidad modificada o conocimiento mejorado o actualizado ("upgraded knowledge"). Tema ampliamente discutido en la sección 3, capítulo 2.

C. Información Económica.

Para realizar el tratamiento de los datos recopilados, el especialista en Costos debe validar la información a través entrevistas con el personal que maneja las Finanzas, de tal forma que se pueda determinar, clarificar y clasificar la información. Esta validación deberá realizarse también con cualquier otra persona que el Facilitador o el Asesor Metodológico del equipo de trabajo proponga, con el fin de asegurar la realidad y autenticidad de los datos que se utilizarán en el análisis económico.

D. Información Adicional.

Tal como se indicó en la sección 3.3.D, sobre la necesidad de información adicional para una evaluación más detallada, en la cual se haga necesario evaluar campos de producción, los integrantes especiales del equipo de trabajo están en capacidad de validar dicha información a través de visitas de campo o entrevistas con el personal que consideren conveniente.

La validación debe realizarse con cualquier otra persona que el facilitador o asesor metodológico del equipo de trabajo proponga, de tal manera que se asegure la realidad y autenticidad de los datos que se utilizarán en los modelos de simulación, y pueden usarse herramientas de cálculo para la validación de la información adicional recolectada.

E. Características de los Software para el Análisis Estadístico de Datos.

Existen muchos paquetes comerciales al respecto, que son básicamente programas complementarios a la aplicación Microsoft Excel, que permiten la caracterización probabilística de variables y la propagación de incertidumbre a través de la simulación de Montecarlo.

Entre las principales características que debe poseer una herramienta de computación o software, se pueden mencionar:

- Visualizar diferentes distribuciones y permitir seleccionar la que mejor se adecue a la serie de datos bajo estudio.
- Permitir identificar los factores que generan riesgo, proporcionando un Análisis de sensibilidad y de escenarios para determinar los factores críticos de los modelos bajo estudio, permitiendo determinar los factores de incertidumbre del modelo según el impacto que tienen en los resultados.
- Facilidades graficas que permitan visualizar rápidamente los histogramas y las curvas acumulativas para interpretar y presentar los resultados.
- Facilidad de navegación y gráficos preestablecidos.
- Facilidad de copiar los resultados y graficas en el Portapapeles de Windows o exportar directamente a Excel.
- Facilidad de informes estadísticos de las simulaciones realizadas y sus datos.

3.5 Análisis de Ingeniería de Procesos.

La calidad del análisis de proceso depende del conocimiento de las instalaciones, sistema o procesos bajo estudio, así como la filosofía operacional, los parámetros de operación y los requerimientos de entrada y salida.

Las actividades a realizar en esta etapa o fase de la Metodología Estocástica de Optimización de Instalaciones de Producción (MEOIP®) considera el uso de herramientas de cálculo, y la generación y validación de los modelos de simulación de proceso de acuerdo al conocimiento del proceso y la filosofía, configuración y condiciones de operación, conforme al modelo general de análisis de ingeniería de proceso mostrado esquemáticamente en la Figura 3. 4.

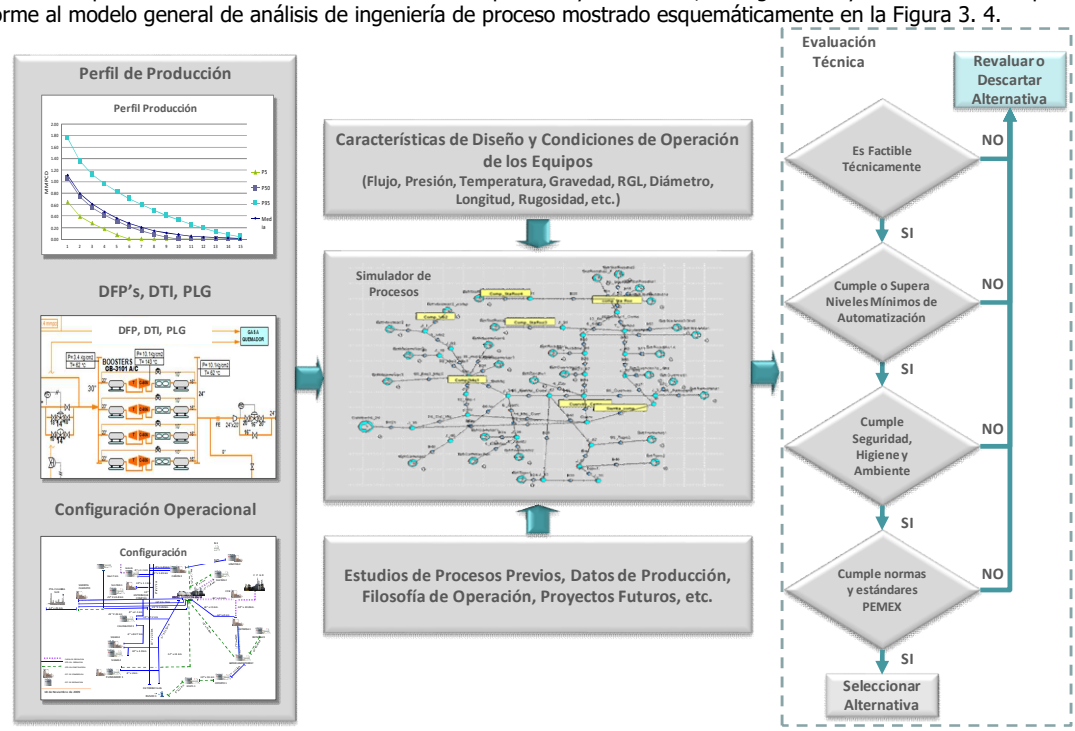

Figura 3. 4. Modelo General de Análisis de Proceso.

En tal sentido, se deben revisar, haciendo uso de las normas y herramientas de cálculo disponibles: la capacidad de los equipos de proceso instalados (bombas, compresores, separadores, depuradores, torres, tanques, tuberías, intercambiadores de calor, hornos, calderas, filtros, entre otros), la capacidad disponible en instalaciones cercanas, las capacidades de las redes de transporte de fluidos, la disponibilidad de nuevos equipos, el potencial uso de nuevas tecnologías, etc. Un elemento diferenciador de este modelo al compararlo con los modelos tradicionales de análisis de proceso, es el pronóstico o perfil de producción estocástico. Siendo un reto la estimación de cada pronóstico por instalación para finalmente dimensionar los diferentes volúmenes probables a los que podrían estar exigidos los equipos, en esta etapa se deben totalizar los pronósticos de producción de los pozos que drenarán a cada instalación (Figura 3. 5)Partiendo de los pronósticos estocásticos de cada corriente que procesara la instalación (aceite, gas y agua) el analista estimara la cantidad y capacidad de los equipos (separadores y recipientes en general, compresores de gas, bombas de aceite, agua y líquido total) para cada momento del tiempo dentro del ciclo de vida de la instalación, teniendo la posibilidad de seleccionar la capacidad instalada según el nivel de riesgo que esté dispuesto a correr, el cual estará asociado al nivel de producción probable que no estaría cubriendo con los equipos instalados (Ver Figura 3. 5).

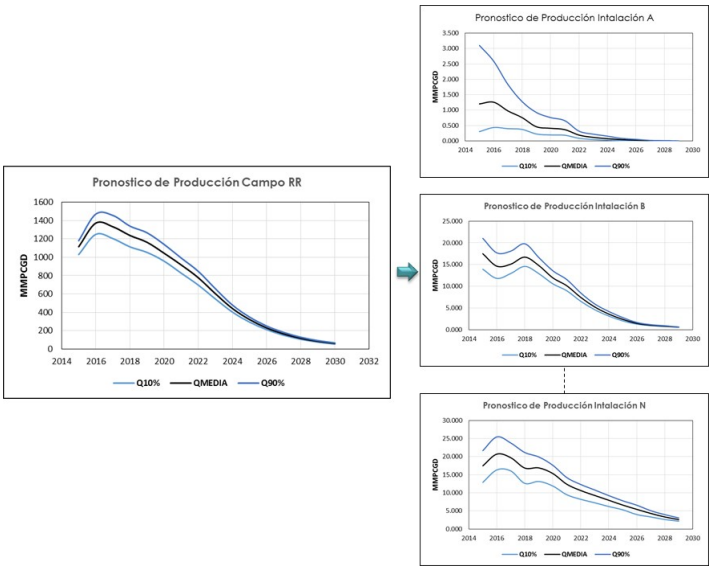

Figura 3. 5. Pronostico de Producción Estocástico por Instalación

Este enfoque permite estimar las capacidades requeridas partiendo de los máximos volúmenes posibles a producir (Ej. Cuando se considera como volumen máximo a procesar el P95 del pronóstico de producción), lo cual puede llegar a representar un costo mayor que si el análisis se realiza partiendo del percentil 75 o 50 del pronóstico de producción. La decisión no es la misma en todos los casos, ya que dependerá en gran manera del nivel de incertidumbre (dispersión de la variable pronóstico de producción), de las flexibilidades que exista en otras instalaciones, nivel de riesgo al que esté dispuesto a someterse el analista; en los casos donde la decisión se haga compleja se recomienda el uso de la metodología Costo Riesgo – Beneficio, para dimensionar y jerarquizar la mejor alternativa (Ver Figura 3. 6).

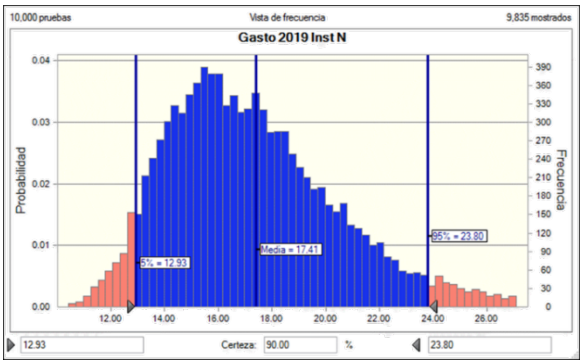

Figura 3. 6. Pronóstico de Producción Probabilístico del año 2019 para la Instalación N

Al estar definido el criterio para estimar las capacidades, el analista puede estimar la cantidad de equipos por año que serán requeridos, lo cual permitirá, bajo un esquema de máximo uso de los mismos, definir las mejores fechas para su instalación y retiro. En la Figura 3. 7 se muestran los cambios de capacidad para la separación y compresión en la Instalación N, así como la cantidad de equipos requeridos, partiendo de Separadores con Capacidad de 10 Millones de Pies Cúbicos Diarios (MMPCD) y 150 Barriles Diarios (BPD), mientras la capacidad de los compresores será de 7 MMPCD.

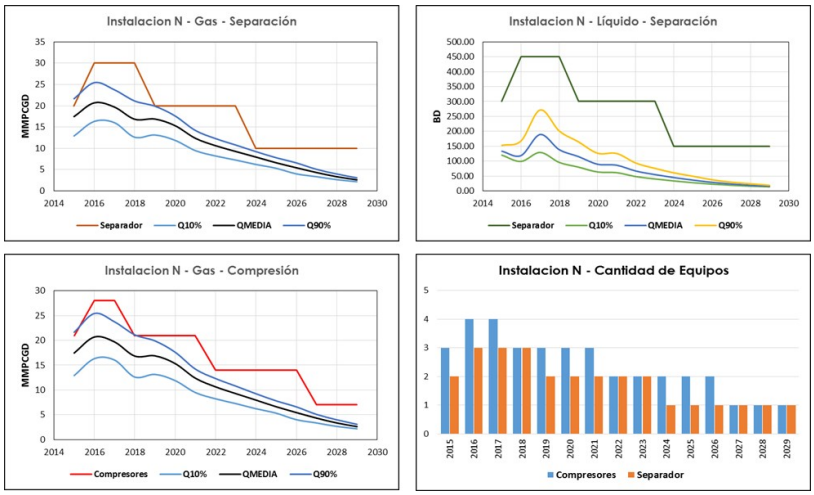

Figura 3. 7. Pronostico de Capacidad Instalada para Gas y Líquido

Una vez planteadas las opciones de redimensionamiento para una instalación específica, o combinaciones de estas; ¿el modelo de simulación de proceso que fue construido, se puede utilizar como un simulador "Que pasa si…?" ("what if..?"), el cual permite inferir el impacto de las opciones de redimensionamiento planteadas, en las condiciones de proceso.

Es importante destacar que todo este análisis se apoyará en el uso de herramientas computacionales especialmente diseñadas para facilitar y agilizar los cálculos, ya que contienen los algoritmos para resolver complejos modelos matemáticos requeridos para el análisis de las diferentes alternativas.

A. Características de los Software para el Análisis de Procesos.

Existen muchos simuladores de proceso comerciales, que permiten la representación y modelaje del proceso considerando como plataforma básica las mismas ecuaciones de estado y algunas otras más que son específicas o mejoradas. Entre las principales características que debe poseer un simulador de proceso, se encuentran:

- Facilidad para poder especificar o calcular las propiedades físicas de componentes comunes, componentes puros, mezclas, seudo-componentes y componentes relacionados a la industria química y petrolera, además con opción de crear alguna paquetería especial para el usuario.
- Poseer plantillas gráficas y herramientas para especificar información del proceso bajo un ambiente Windows, que posea facilidades de simulación interactiva.
- Presentar modelos de ecuaciones de estado y métodos rigurosos para el cálculo de las propiedades termodinámicas.
- Cálculo de balances de materia y energía para la predicción de los procesos y sus variantes.
- Facilidad para dimensionar y/o optimizar un proceso complejo considerando las diferentes fases (líquido, vapor, gas, mezcla) y las condiciones de operación del mismo proceso. Las rutinas de las operaciones unitarias deben poseer un nivel de detalle que permita evaluar con exactitud, velocidad y eficiencia las actividades de diseño de las alternativas estudiadas.
- Versatilidad para el manejo de unidades de medición.
- Visualización de los resultados de las diferentes operaciones unitarias.

Cabe destacar que, los simuladores de procesos comerciales, tienen la versatilidad para realizar las simulaciones en estado estacionario ó en estado dinámico. Las diferencias entre los mismos radican en que las simulaciones a régimen estacionario, se realizan sin que las propiedades cambien con respecto al tiempo, por lo que facilitan el ajuste de las condiciones de operación; mientras que la simulación dinámica utiliza métodos más rigurosos que tienden a la mejor optimización y definición de estrategias a partir del modelo estacionario. Los simuladores dinámicos presentan una mejor fidelidad de los resultados porque considera la simulación en tiempo real o través del tiempo y tiene como ventajas que mejora la comprensión y diseño del proceso, pero requieren de tiempo para realizar sus cálculos.

B. Resultados del Análisis de Procesos.

Los resultados del análisis de proceso permiten determinar las alternativas que presente la configuración óptima del sistema o proceso analizado, logrando obtener la máxima utilización de los procesos productivos. Entre los resultados se encuentran:

- Modelos de Simulación del sistema en estudio.
- Establece sensibilidades entre la capacidad instalada, la capacidad actual y la requerida para el cumplimiento de los compromisos de producción y seguridad.

- Recomendaciones para optimizar utilización de instalaciones de producción.
- Evaluación y recomendaciones técnicas para cada alternativa evaluada.
- Disponibilidad, reubicación o requerimiento de equipos de proceso dentro del sistema en estudio.
- Insumos de la configuración operacional que debe ser considerada para el Análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad (CDM) o Análisis RAM.

3.6 Análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad.

El análisis CDM (Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad), conocido también como análisis RAM (Reliability, Availability and Mantainability) permite pronosticar la producción que pudiera perderse y la indisponibilidad de un proceso de producción, mediante un estudio de diagnóstico que busca caracterizar el estado actual de un equipo, sistema o proceso y predecir su comportamiento para un periodo determinado de tiempo.

Su finalidad es revelar áreas de atención, debilidades, definir y desarrollar alternativas de soluciones y apoyar la asignación de recursos y presupuestos para mejorar efectivamente la productividad, a través de la reducción sistemática de la ocurrencia de fallas o eventos no deseados, así como de la reducción de su impacto en el negocio medular.

Durante las diferentes fases de un proyecto (ingeniería básica, construcción, puesta en marcha y operación) este tipo de estudio genera información que permite planear, organizar, controlar y comunicar acciones dirigidas a evitar escenarios factibles de ocurrencia y responder al instante preguntas como: ¿Qué tan productivo es o será el proceso?, ¿Qué mejoras se pueden introducir?, ¿Qué trabajos quedan por hacer?, ¿Cuáles son las actividades críticas? Y ¿Dónde concentrar los esfuerzos y recursos? entre otras.

El análisis CDM se sustenta en un modelo de simulación que toma en cuenta:

- La confiabilidad y mantenibilidad de los equipos.
- La configuración del sistema.
- Las fallas aleatorias y sus reparaciones.
- La influencia del "error humano".
- Las pérdidas de capacidad por degradación.
- Disponibilidad de recursos humanos y materiales.
- La probabilidad de ocurrencia de eventos simultáneos en diferentes elementos del sistema.

El pilar fundamental de este análisis es la "construcción" de los TPEF (Tiempos promedios entre la falla) y TPPR (Tiempos promedios para reparar) para los diversos componentes, con base en información proveniente de bases de datos propias, bancos de datos genéricos de la industria y opinión de expertos.

El equipo de trabajo debe definir y aclarar las premisas referentes a la base de datos de la información de confiabilidad de equipos. Es importante considerar todas las fuentes posibles de información para conformar esta base de datos ya que es fundamental para obtener la mejor estimación de los TPPF y TPPR.

El análisis CDM permite realizar sensibilidades entre la capacidad instalada y la requerida, modificaciones del plan de mantenimiento, entre otros ; permitiendo determinar las diferencias con respecto a una condición, planear opciones de redimensionamiento y generar los planes de acción que permitan cumplir los compromisos de producción y seguridad solicitados.

Tal como se muestra en la Figura 3. 8., el análisis CDM, se inicia con la estimación de las tasas de falla y reparación de cada uno de los componentes o equipos que conforman los sistemas bajo estudio. Esta estimación mejorada de las tasa de falla alimenta un modelo de Diagramas de Bloques de Disponibilidad (DBD); que representa la arquitectura del sistema y su filosofía de operación.

El análisis CDM se sustenta en un modelo de simulación que toma en cuenta la configuración de los equipos, las fallas aleatorias, las reparaciones, el mantenimiento planificado y las paradas parciales y totales.

El análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad de un Sistema Productivo no es un problema sencillo, para ello se requieren herramientas y metodologías de cálculo con niveles de complejidad de acuerdo con la complejidad del proceso analizado.

Para el análisis existen estándares y normas que soportan la aplicación de la metodología, entre los más importantes se tiene:

- DoD – Department of Defense - Guide for achieving Reliability, Availability, and Maintainability.
- DoD 3235.1-H - Department of Defense - Test & Evaluation of System Reliability, Availability and Maintainability.
- IEC61078: Analysis techniques for dependability - Reliability block diagram method.
- IEC61025: Fault tree analysis.
- IEC61165: Application on Markov techniques.

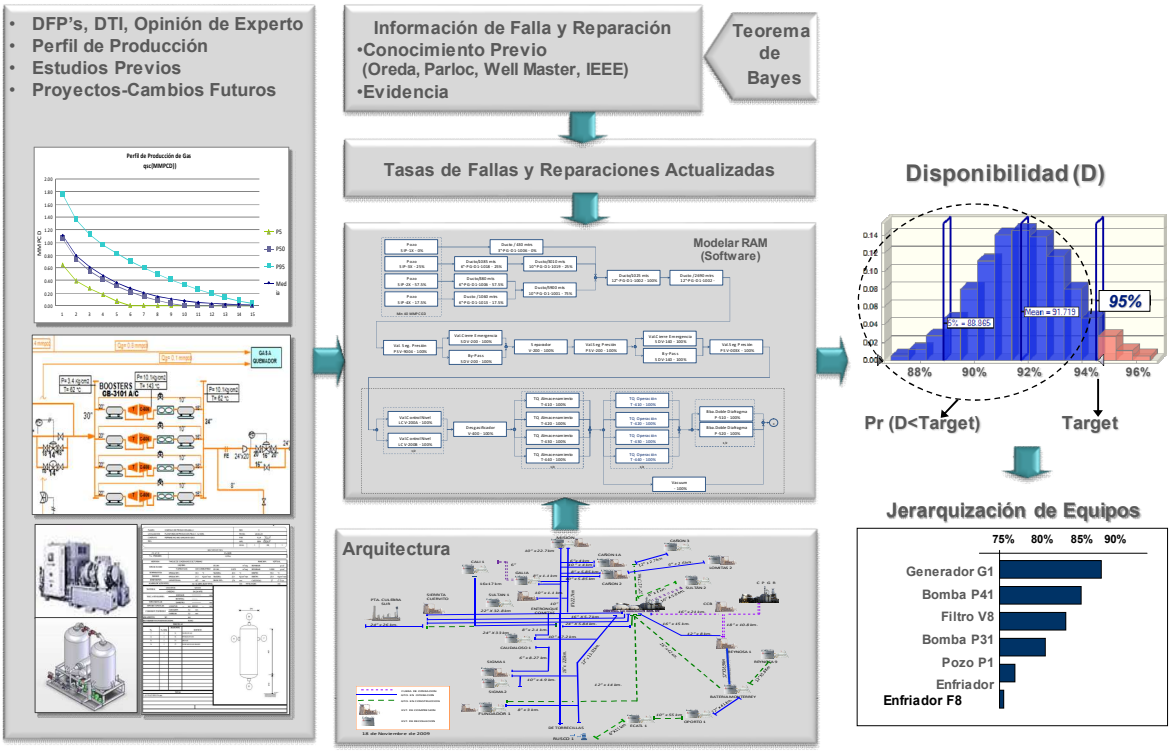

Figura 3. 8. Modelo General del Análisis CDM.

Una vez construido y validado, el modelo trabaja como un simulador "¿Que pasa si..?" ("what if…?"), que permite inferir el impacto que tienen en la disponibilidad y producción diferida del sistema: nuevas políticas de mantenimiento, cambios en la mantenibilidad de los equipos, aplicación de nuevas tecnologías, cambios en la configuración de los equipos o sistemas dentro de los procesos de producción, reubicación o desincorporación de equipos, cambios en la política de inventarios, implantación de nuevos métodos de producción, etc.

Durante la ejecución de un estudio CDM, se realiza la adecuada caracterización probabilística de los procesos de deterioro que afectarán los equipos, sub-sistemas y sistemas asociados al citado proceso de producción a fin de pronosticar la mayoría de los escenarios de paros o fallas.

Adicionalmente con los resultados obtenidos, se pueden identifican acciones para minimizar la ocurrencia de estos escenarios e identificar las implicaciones de cada uno al compararlo con el escenario basado en "Las Mejores Prácticas" ("Best Practices"), a fin de contribuir con el establecimiento de estrategias óptimas de mantenimiento para el manejo del negocio.

A. Etapas de un análisis CDM.

El plan de trabajo para un análisis CDM, se desarrolla en tres etapas fundamentales, tal como se muestra en la Figura 3. 9.

Etapa I: Asignación de Tasas de Fallas y Reparación.

Se deben asignar las tasas de falla (λ) y de reparación (μ) de los componentes o equipos que conforman el sistema, así como la revisión de los planes de mantenimiento planificados y no planificados.

Para ello se deben recopilar los datos históricos disponibles o en su defecto, registros de fallas de equipos similares instalados en otras instalaciones, datos provenientes de bases de datos genéricos o la opinión de expertos. Esta información debe ser resguardada en una base de datos para posteriormente ser sometida a una etapa de revisión y validación con los especialistas asociados al proceso productivo (operadores, mantenedores, analistas, programadores, ingenieros de procesos), con la finalidad de intercambiar y aclarar las premisas referentes a la base de datos, y de revisar y conocer la filosofía de operaciones del proceso productivo bajo estudio. La información proveniente de los pasos anteriores se utiliza para obtener una estimación representativa de las tasas de falla y reparación características del sistema o proceso. Esto se logra formulando relaciones algebraicas que permitan usar distribuciones de probabilidad y fundamentos de matemática Bayesiana, para combinar la evidencia con información genérica.

Etapa II. Generación y Validación del Modelo.

El modelo CDM, se basa en el uso de la técnica de diagramas de bloques para la configuración del sistema o instalación bajo estudio desde el punto de vista de confiabilidad, el cual ayuda a predecir qué tan frecuentemente puede fallar un sistema y determinar la conveniencia de los diferentes arreglos operacionales o alternativas disponibles para cumplir la función esperada. Además, permitirá establecer controles para minimizar los efectos de las fallas que pudieran ocurrir.

El propósito de los diagramas de bloques es representar gráficamente los criterios de éxito y fracaso, y utilizar los diagramas lógicos resultantes para evaluar los parámetros de confiabilidad del sistema o de disponibilidad en estado estable. Las unidades individuales son representadas por bloques que consideran solamente un estado de dos posibles, es decir, en operación o en falla.

El uso de los DBC es similar al uso de los análisis de árbol de falla. En principio los DBC se pueden utilizar para predecir la disponibilidad de producción de una planta o instalación completa. Una de sus limitaciones es que las fallas parciales de un sistema no son manejadas fácilmente, debido a que los DBC cubren solamente sistemas de estado binario (operación / falla) mientras que las teorías de redes de flujo son cubiertas por sistemas multiestado, tratadas por simuladores basados en el método de Montecarlo.

En tal sentido, los diagramas de bloques, permiten el análisis de mayor a menor nivel o de arriba hacia abajo, en el cual el diagrama resultante muestra la configuración del sistema, y ayuda a visualizar de manera simple la interrelación funcional de los subsistemas. La principal ventaja de este método es que el mismo permite analizar caminos paralelos, redundantes y caminos caracterizados por tener componentes en espera ("standby paths").

El primer nivel de análisis es a nivel de sistema. Posteriormente, el sistema es dividido en subsistemas y los subsistemas en componentes hasta que es alcanzado el último nivel seleccionado para análisis.

El cálculo de confiabilidad puede realizarse en sistemas en serie o en paralelo, el arreglo dependerá de la filosofía de operación del sistema.

La construcción del Diagrama de Bloques debe representar la configuración del equipo, sistema o instalación. La configuración se realizará con el apoyo del personal de ingeniería de proceso, operaciones y mantenimiento, quienes revisaran detalladamente los PFD´s, PID´s y diagramas funcionales previos para completar la configuración del modelo (Figura 3. 10).

Posteriormente, la información actualizada de tasas de falla y reparación, se introduce al modelo desarrollado con el fin de validar el modelo y proceder luego a simular las alternativas planteadas en el análisis.

Para la validación se debe verificar la representatividad del modelo con respecto al sistema bajo estudio, sometiendo el mismo a pruebas que simulen adecuadamente los eventos previamente ocurridos. En tal sentido, se puede realizar reuniones con el equipo de trabajo o con los especialistas de proceso y de operaciones, que intervienen directamente en el proceso o sistema bajo estudio.

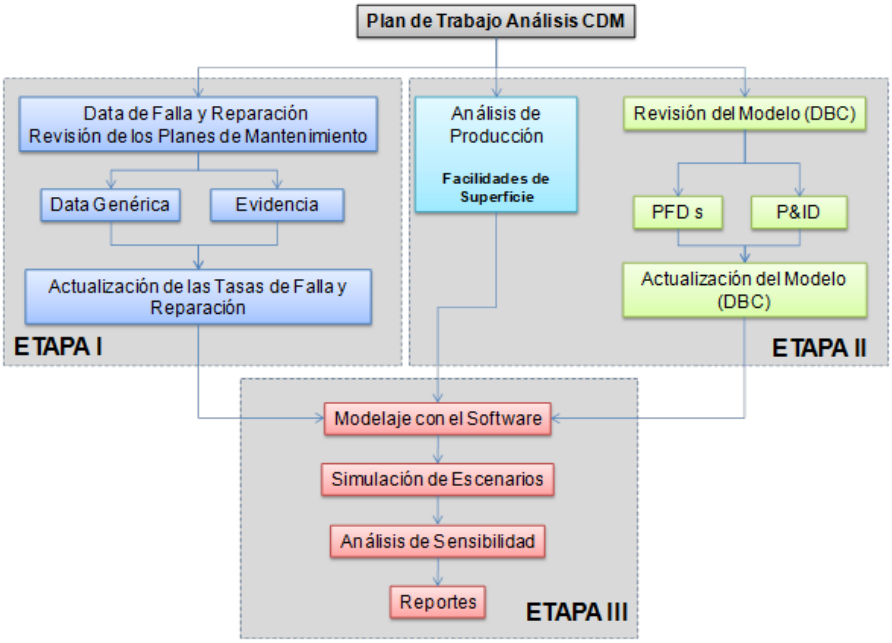

Figura 3. 9. Plan de Trabajo Análisis CDM.

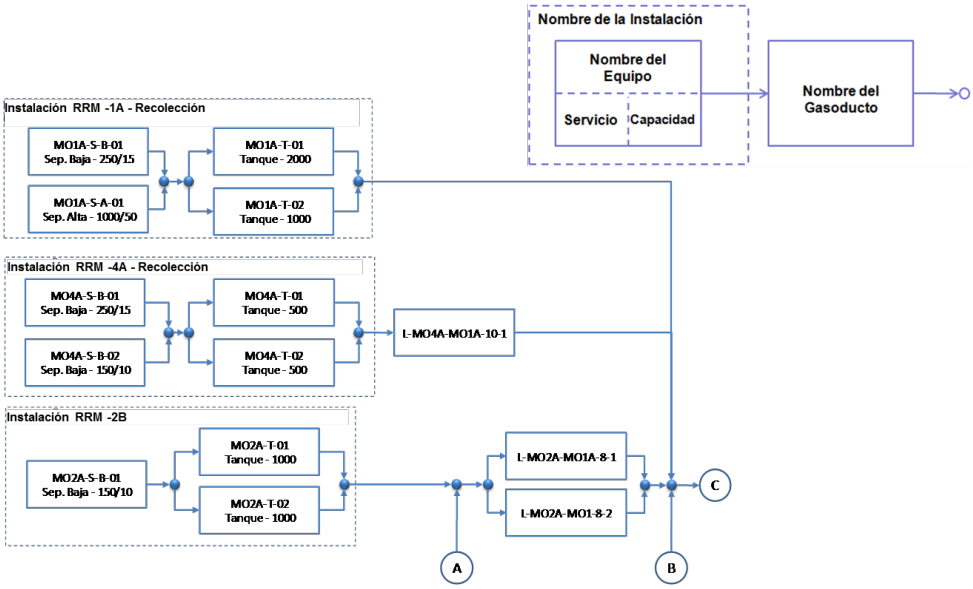

Figura 3. 10. Diagrama de Bloques de Confiabilidad.

Etapa III: Modelado y Simulación.

Consiste en la combinación de los resultados obtenidos en las etapas I y II. La información de tasas de falla y reparación actualizadas proveniente de la primera etapa se introduce al modelo desarrollado en la etapa II utilizando para ello herramientas o softwares diseñados para tal fin. A partir de este momento comienza el proceso final de simulación para cada uno de los escenarios pre-establecidos, obteniéndose de esta manera el pronóstico del factor de disponibilidad para el periodo de tiempo requerido.

Adicionalmente, del resultado de la simulación se desprende la ejecución de un análisis de sensibilidad (para cada escenario), para establecer el impacto de cada componente del sistema en los factores de disponibilidad y producción diferida del proceso analizado. Una vez planteadas las opciones de redimensionamiento para una instalación específica, o combinaciones de estas; el modelo CDM construido, se utiliza como un simulador "what if" ("que pasa si? "…) que permite inferir el impacto de las opciones de redimensionamiento planteadas, en la disponibilidad y producción diferida del sistema.

Es importante destacar que todo este análisis se apoyará en el uso de herramientas computacionales especialmente diseñadas para facilitar y agilizar los cálculos, ya que contienen los algoritmos para resolver complejos modelos matemáticos requeridos para el dimensionamiento de las consecuencias y la estimación de frecuencias de falla.

Dichos simuladores están basados en la simulación de Montecarlo, que es una técnica en la cual las fallas y las reparaciones de un sistema son simuladas por la generación de números al azar o aleatorios ("random") tomados desde una distribución de probabilidades. Antes de realizar una simulación de Montecarlo se deben analizar la estructura de confiabilidad y la lógica del sistema para ser modelado por diagrama de bloques multi-estado u otras técnicas.

La simulación de Montecarlo está bien adaptada para la predicción de la regularidad de una facilidad de producción. También puede ser utilizada para modelar una variedad de situaciones incluyendo distribuciones complejas de fallas y reparaciones, los efectos de diversas políticas de reparación, redundancia, aspectos operacionales, de disponibilidad de cuadrillas de mantenimiento, política de refacciones, etc.

B. Características de los Software para un análisis CDM.

Entre las principales características que debe poseer una herramienta de computación o software para realizar análisis de Confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad, se encuentran:

- Capacidad para predecir de manera estocástica la efectividad de un sistema en términos de la confiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y productividad.
- Capacidad para modelar redes desde el punto de vista de confiabilidad, que consideren entre otros, la configuración del sistema, las fallas aleatorias, las paradas parciales o totales, la capacidad de procesamiento (volúmenes de operación y

máximo de los equipos y componentes), las políticas de mantenimiento programadas y no programadas, la logística y los escenarios de demanda operacional y económica.

- Facilidad para crear una representación lógica del sistema bajo estudio.
- Facilidad para la jerarquización de los equipos, según el impacto que tienen sobre la disponibilidad de la instalación, sistema o equipo.
- Facilidad para modelar eventos condicionales, capacidad del sistema, modos y efectos de fallas, sistemas de almacenaje, equipos o sistemas de respaldo, entre otros.
- Capacidad estimar la confiabilidad de equipos mecánicos y electromecánicos.
- Consideración de múltiples corrientes posibles en los procesos (aceite, gas de proceso, gas combustible, agua de inyección, otros).

C. Análisis de Sensibilidad.

Una vez finalizado el proceso de simulación de los escenarios generados, es conveniente realizar el análisis de sensibilidad para determinar el impacto de cada componente en los factores de disponibilidad y producción diferida.

Este análisis es de vital importancia para "gerenciar la incertidumbre" ya que nos permite identificar las variables de entrada al modelo en las que debe centrarse la atención y tomar las acciones necesarias (compra de información, toma de datos, análisis causa raíz, etc.) para mejorar el nivel de conocimiento sobre las mismas, (de ser técnicamente factible y económicamente rentable), porque solo así se logrará reducir la incertidumbre de la variable de salida.

Existen diversos tipos de análisis de sensibilidad, cada uno de los cuales tiene un "gráfico de resultados característico". Los más conocidos son:

- Contribución de la Varianza.
- Diagramas de Tornado.

D. Resultados del Análisis CDM.

Los resultados obtenidos del análisis CDM permiten determinar la configuración óptima del sistema o proceso analizado, para:

- Obtener los niveles adecuados de disponibilidad y rentabilidad de los procesos productivos.
- Pronosticar la disponibilidad para un período determinado de tiempo.
- Determinar el factor de producción diferida de un proceso de producción, basado en su configuración, en la confiabilidad de sus componentes y en la filosofía de mantenimiento.
- Definir el modelo de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad.
- Elaborar el perfil estocástico de la Disponibilidad y Producción Diferida por Unidad Operativa o Sistema Productivo asociado a cada opción de redimensionamiento.
- Jerarquizar lista de los equipos y sistemas críticos, con base a su impacto al factor de disponibilidad y su contribución sobre el factor de producción diferida, para establecer acciones que mitiguen el riesgo y permitan optimizar la rentabilidad.
- Realizar la adecuada caracterización probabilística de los procesos de deterioro que soportarán los equipos, sistemas y sub-sistemas asociados al proceso de producción bajo estudio con la finalidad de identificar los escenarios de paros o fallas, o eventos no deseados.
- Identificar acciones en las políticas de mantenimiento o modificaciones (en el proceso o la arquitectura) que permitan minimizar la ocurrencia de los escenarios no deseado.
- Dimensionar las implicaciones económicas de cada escenario, comparándolo con el escenario basado en "Mejores Prácticas", a fin de contribuir con el establecimiento de estrategias óptimas de mantenimiento para el manejo del negocio.
- Emitir las recomendaciones técnicas para mitigar el riesgo e incrementar la disponibilidad.

3.7. Análisis Económico.

Tradicionalmente, las evaluaciones económicas de proyectos se hacen con base al cálculo de indicadores financieros como valor presente neto (VPN) y la tasa interna de Rendimiento (TIR).

Desde el punto de vista económico, la metodología a aplicar, es el análisis económico del ciclo de vida, la cual se basa en estimar o pronosticar todos los posibles "flujos de caja" que puedan ocurrir durante toda la vida útil de un activo, sistema o

proceso; incluyendo todas las fases; desde el diseño, procura, construcción, operación, mantenimiento hasta su desincorporación y en la conversión de estos flujos de caja proyectados o futuros, a un valor económicamente comparable considerando el valor del dinero en el tiempo; tal como el valor presente neto (VPN).

Este Análisis hace especial énfasis en la inclusión de los eventos derivados del nivel de confiabilidad de los sistemas y procesos; incluyendo los impactos de probables eventos no deseados tales como fallas, pérdidas de producción, accidentes, huelgas, desastres naturales, etc., en el ciclo de vida del activo.

En tal sentido, esta metodología hace referencia a aquellos proyectos cuya naturaleza exige una evaluación económica de naturaleza probabilística que tome en cuenta la incertidumbre de las variables que intervienen en dicha evaluación.

En la Figura 3. 11, se muestra el modelo de distribución probabilística para el indicador VPN, el cual permite cuantificar el impacto de la incertidumbre asociada a cada una de las variables de entradas (ingresos, egresos, inversión inicial) dentro del modelo matemático.

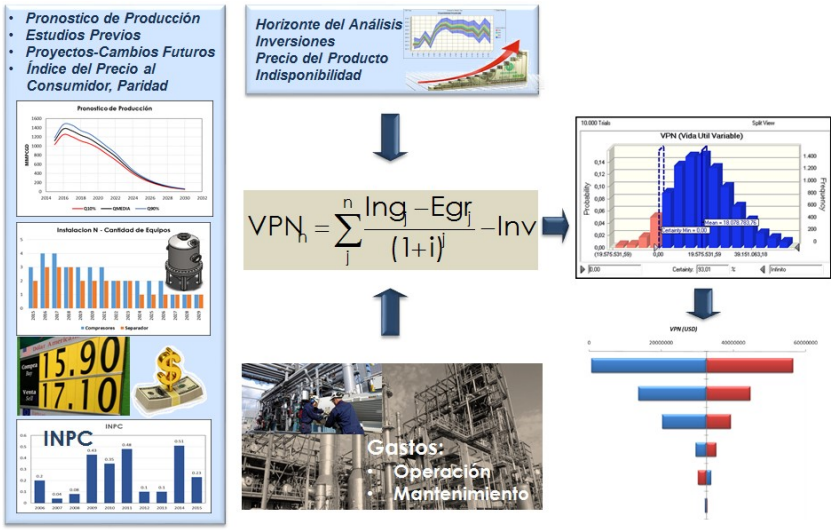

Figura 3. 11. Modelo del Análisis Económico.

Este enfoque probabilístico de la estimación de la variable de salida del modelo; es decir, el VPN, permite estimar la probabilidad que existe de valores que son menores a cero o a una cantidad objetivo, la cual corresponde al área bajo la curva del VPN que se muestra en color rojo; así mismo se puede estimar un área de probables valores mayores que cero o valor objetivo. El área de probables valores menores que cero, representa la probabilidad de destruir valor o "riesgo del proyecto" y el área positiva, representa la probabilidad de agregar valor.

La base fundamental de este análisis es la identificación de todos los posibles costos e inversiones en los que se puede incurrir durante el periodo de evaluación del activo, así como la cuantificación de la incertidumbre de cada una de estas variables. Dependiendo de la etapa del proyecto se contara con una información de costos con más o menos incertidumbre, relacionada principalmente con el nivel de definición del proyecto. Es así, como en el área de estimación de costos es normal relacionar estos con Clases, las cuales se muestran en la Tabla 3. 1.

Tabla 3. 1. Clases de Costo.

CLASE V	Estimado de orden de magnitud propias de las etapas más tempranas del proyecto - Visualización. Usado en la planeación estratégica de negocios, estudios de mercado, factibilidad inicial, evaluación de esquemas alternativos e investigación, análisis de varias alternativas para evaluar si el proyecto es técnicamente factible y económicamente atractivo. La información disponible es escaza y básicamente consiste en: tipo de planta, capacidad, configuración, localización y requerimientos especiales.
CLASE IV	Estimado Preliminar, relacionadas con la etapa de Conceptualización de los Proyectos. Usado en la planeación estratégica, el análisis de esquemas alternativos y la confirmación de factibilidad técnico económica. Requerido para la solicitud de presupuestos de estudios de pre inversión. Es frecuentemente estimado a partir de curvas o técnicas de prorrateo.
CLASE III	Estimado para solicitar presupuesto, posible en etapas más maduras del diseño como lo es el comienzo de la Ingeniería Básica. Usado como presupuesto del proyecto hasta que se reemplace por uno de mayor precisión. En esta etapa el diseño esta formalizado, ya se cuenta con balances de masa, de energía, diagramas de flujo de proceso y listas de equipos.

CLASE II	Usado para determinar la línea de control detallada contra la que se medirá y controlara el proyecto. Se obtiene al contar con la Ing. Básica Extendida. Usado para la contratación, donde ya se cuenta con detalles como el tamaño, función, características de diseño, materiales y planos de los equipos, así como todo el detalle necesario para la construcción del proyecto.
CLASE I	Usado para el control del proyecto durante la ejecución y se genera al contar con la Ingeniería de Detalle, basado en las propuestas de las contratistas.

Diferentes empresas han definido la exactitud de los costos para los diferentes niveles de un proyecto. Es normal que las empresas adopten una de estas metodologías como referencia para homologar sus estimaciones. En la Tabla 3. 2 se muestran tres de las más conocidas.

Tabla 3. 2. Exactitud del Estimado de Costos.

Association for Advancement of Cost Engineering AACE (18R-97)	Construction Industry Institute CII (CII – SD 6)	Aspen Technologies / S&B engineering
Clase 5 -50% / +100%	Orden de Magnitud ±30% a 50%	Clase V Estimado Orden de Magnitud -30% / +50%
Clase 4 -30% / +50%	Estimado de Estudio ±25% a 30%	Clase IV Estimado Preliminar -20% / +35%
Clase 3 -20% / +30%	Estimado de Control ±10% a 15%	Clase III Presupuesto Estimado -15% / +25%
Clase 2 -15% / +20%	Estimado Definitivo ± < 10%	Clase II Estimado de Control -10% / +15%
Clase 1 -10% / +15%		Clase I Estimado Definitivo -5% / +10%

Existen diferentes métodos para la estimación de costos, siempre que los mismos se sustenten en información histórica es de suma importancia considerar los Factores de Actualización y Regionalización, para asegurar así datos homologados a un momento del tiempo y la zona donde realizara el proyecto. En tal sentido, se deben considerar los siguientes aspectos:

Factor de Actualización: Permite hacer estimaciones actuales a partir de costos pasados. Para estimar este Factor es necesario conocer la variación histórica del Índice Nacional del Precio al Consumidor (INPC)

$$\text{Costo Año A} = \text{Costo Año B} \times \left[\frac{\text{Indice Año A}}{\text{Indice Año B}} \right]$$

Factor de Regionalización: Es factible que la fuente de información histórica de costos corresponda a localidades diferentes a la de interés. En el caso de la industria del Petróleo y el Gas una de las principales fuentes corresponde a la Costa del Golfo de los Estados Unidos, para poder reflejar las variaciones de eficiencia de la mano de obra de ingeniería y construcción, fletes, impuestos, seguros, efectos climáticos, legislación ambiental, y cualquier otra particularidad; es necesario aplicar este factor.

Dentro de los métodos de estimación de Costos en Proyectos se encuentran:

MÉTODOS PRELIMINARES

- Curvas Costos Capacidad.
- Factorización
- Ley del Tamaño y la Potencia

METODOS DETALLADOS

- Horas Hombre
- Análisis de Precios Unitario

El analista seleccionará el método dependiendo de la etapa en la que se encuentra el proyecto, así como de los requerimientos o procedimientos homologados de la empresa custodia del mismo. El método de las Curvas Costos

Capacidad es uno de los más usados para las estimaciones Clase V, IV y algunos casos usado para Clase III. Dentro de sus características principales están:

- Requiere de información histórica específica y suficiente como para construir las curvas de Costo vs Capacidad.
- Se basa en considerar que el costo de capital por unidad de producción se mantiene constante.
- Se aplica gráficamente, utilizando una curva que representa varias plantas, unidades o equipos de diversas capacidades y su respectivo costo. La curva permite proyectar el costo de una instalación, unidad o equipo con una capacidad determinada.
- Las curvas pueden ser generadas a varios niveles: plantas, equipos mayores.
- La curva predice el costo estándar para el diseño, vinculado con la fecha y el lugar de emisión de la curva.
- Se requiere realizar ajustes en cuanto al diseño actual, tiempo y ubicación.
- Su estimación y respuesta es rápida, al compararlo con otros métodos.
- Incluye todos los componentes del costo o solo los costos directos, dependerá de la fuente de información.
- Su precisión es baja, utilizado para estimado clase V o IV principalmente.
- No recomienda para instalaciones o plantas que son desconocidas o atípicas para el estimador.
- Se sustenta en que las diferentes variables de las que depende el costo de inversión, mantienen una participación constante, para diferentes tamaños de una planta, equipos, obra o trabajo.
- Cuando se trata de plantas o unidades, la base de cálculo son los equipos mayores. El resto de los elementos del costo se calcula como porcentaje del costo de los equipos.
- Existen tablas con los factores para diferentes clases de equipos: hornos, calderas, bombas, compresores, tanques, recipientes, etc.
- Por ser costos históricos, los mismos pueden corresponder a diferentes momentos del tiempo, por lo que es necesario ajustar el costo al año corriente o de interés para el análisis, para lo cual será necesario estimar el Factor de Actualización de Precios (INPC- Índice Nacional de Precios al Consumidor) así como el conocimiento histórico de la paridad, sobre todo en el caso donde la información corresponde a equipos importados.

En la Figura 3. 12 se muestran los costos reales de tres diferentes recipientes, los cuales se llevan a una gráfica de dispersión y a partir de indicadores de mejor ajuste (coeficiente de determinación – R^2) se estima cuál de las curvas, genera la mejor representación (Línea de tendencia), Ej.: Lineal, Polinómica, Exponencial, Logarítmica o Potencial. En el caso del Recipiente a Presión Separador Horizontal una curva Logarítmica es la que hace mejor ajuste. Basado en esta ecuación se puede estimar el costo de un Separador Horizontal de 10 MMPCD, resultando 2,949.26 M$.

Descripción	Capacidad	Unidad	M$	M$ Estimado	Año Corriente
Separador Trifasico	5	MMPCED	2,750	2,761	2009
Separador Bifasico	20	MMPCED	3,185	3,138	2009
Separador Bifasico	30	MMPCED	3,212	3,248	2009

$$y = 272.2Ln(x) + 2322.5$$

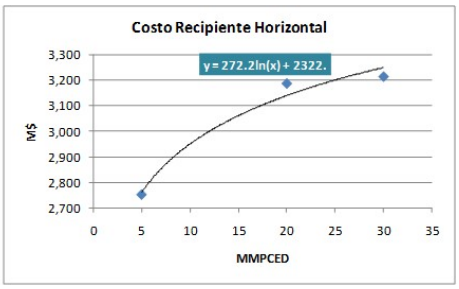

Figura 3. 12. Recipientes a Presión. Información de Capacidad y Costos – Sin Contingencia.

Si los costos estimados por este método corresponden a los de adquisición del equipo, el costo del equipo instalado se puede calcular usando métodos como el de Guthrie. Este método usa factores que multiplican el costo del equipo(s); para obtener el costo total del equipo instalado en obra, así como de las partes que lo conforman.

El primer paso es obtener el costo del equipo principal, lo cual es posible a través de:

- Graficas de Capacidad vs. Costo, Tablas, etc., que deberán estar actualizados con los índices de costos correspondientes.
- Cotización directa con los proveedores de los equipos.

El segundo paso corresponde a los ajustes de los costos obtenidos de proyectos similares, por la misma empresa o empresas del área, así como de publicaciones especializadas. Este ajuste se logra aplicando los Factores de Actualización y Regionalización.

En el tercer paso se estima el costo del equipo instalado considerando los factores que se muestran en la Tabla 3. 3. El costo del equipo instalado es el resultado de multiplicar el costo de adquisición por el Multiplicador Total que se muestra al pie de la tabla.

Tabla 3. 3. Tabla del Método de Guthrie.

Tipo de Equipos	Enfriadores por Aire	Hornos de Cabina	Compresor Centrifugo	Torre de Enfriamiento	Horno Cilindrico	Intercambiador Especial de Doble Tubería	Ventiladores	Caldera Eregida en Campo	Venteos/Quemadores	Generadores	Bomba Horizontal Centrifuga	Recipiente Horizontal	Packed Boilers	Packed/Skidded Units	Packed Columns	Reactor	Compresor Reciprocante	Bomba Reciprocante	Intercambiador Concha Y Tubo	Tryed columns	Bomba Vertical	Recipiente Vertical
Materiales																						
Civiles	0.06	0.10	0.50	0.09	0.09	0.12	0.04	0.06	0.10	0.06	0.04	0.04	0.06	0.05	0.06	0.07	0.04	0.04	0.07	0.07	0.00	0.12
Estructurales	0.15	0.08	0.06	0.03	0.08	0.20	0.05	0.04	0.12	0.07	0.10	0.10	0.04	0.08	0.12	0.12	0.04	0.08	0.15	0.20	0.07	0.20
Tuberias	0.30	0.32	0.22	0.10	0.40	0.64	0.20	0.16	0.42	0.05	0.75	0.75	0.22	0.18	0.66	0.50	0.17	0.52	0.96	0.75	0.40	1.20
Electricos	0.10	0.10	0.14	0.09	0.08	0.12	0.15	0.05	0.09	0.20	0.35	0.35	0.05	0.05	0.06	0.06	0.10	0.30	0.06	0.06	0.30	0.12
Instrumentación	0.08	0.18	0.15	0.08	0.11	1.00	0.06	0.08	0.08	0.06	0.40	0.40	0.05	0.06	0.31	0.15	0.09	0.23	0.30	0.30	0.40	0.40
Pintura	0.01	0.03	0.01	0.01	0.04	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.06
Aislamiento	0.03	0.08	0.03		0.05	0.11		0.04			0.08	0.08	0.03	0.04	0.06	0.08	0.03	0.05	0.09	0.07	0.08	0.08
Equipos de Ajuste	0.00	0.01	0.00		0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total de Materiales	***0.73***	***0.90***	***1.11***	***0.40***	***0.86***	***2.22***	***0.51***	***0.46***	***0.82***	***0.45***	***1.74***	***1.74***	***0.45***	***0.47***	***1.29***	***1.00***	***0.48***	***1.22***	***1.65***	***1.47***	***1.28***	***2.18***
Labor																						
Civil	0.07	0.11	0.05	0.10	0.10	0.13	0.04	0.07	0.11	0.07	0.05	0.05	0.07	0.05	0.07	0.08	0.04	0.04	0.08	0.08	0.00	0.13
Estructurales	0.03	0.02	0.01	0.01	0.02	0.05	0.01	0.01	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.03	0.01	0.02	0.03	0.05	0.02	0.05
Tuberias	0.11	0.12	0.08	0.04	0.15	0.24	0.07	0.06	0.16	0.02	0.28	0.28	0.08	0.07	0.25	0.19	0.06	0.19	0.36	0.28	0.15	0.45
Electricos	0.03	0.03	0.04	0.03	0.02	0.03	0.04	0.01	0.03	0.06	0.10	0.10	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.09	0.02	0.02	0.09	0.03
Instrumentación	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.09	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03	0.00	0.01	0.03	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03
Pintura	0.01	0.04	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.07
Aislamiento	0.01	0.04	0.02		0.03	0.06	0.00	0.02	0.00	0.00	0.04	0.04	0.02	0.02	0.03	0.04	0.02	0.03	0.05	0.04	0.04	0.04
Equipos de Ajuste	0.08	0.15	0.04		0.08	0.14	0.03	0.18	0.06	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.02	0.03	0.05	0.03
Total Labor	***0.35***	***0.52***	***0.26***	***0.18***	***0.42***	***0.75***	***0.21***	***0.37***	***0.40***	***0.21***	***0.57***	***0.57***	***0.23***	***0.23***	***0.48***	***0.41***	***0.21***	***0.43***	***0.60***	***0.53***	***0.40***	***0.83***
Multiplicador Total	***2.08***	***2.42***	***2.37***	***1.58***	***2.28***	***3.97***	***1.72***	***1.83***	***2.22***	***1.66***	***3.31***	***3.31***	***1.68***	***1.70***	***2.77***	***2.41***	***1.69***	***2.65***	***3.25***	***3.00***	***2.68***	***4.01***

Dentro de los costos que frecuentemente no se consideran, se encuentran los costos por contingencia. La "American Association of Cost Engineers (AACE)" en su "International Recommended Practice No. 16R-90" recomienda considerar las contingencias asociadas a la filosofía del proceso y al proyecto. Las contingencias cubren omisiones y gastos imprevistos derivados del desconocimiento de ingenierías tempranas donde no se tiene un alcance bien definido. De esta manera se incorpora un factor de ajuste asociado a la incertidumbre del alcance de los trabajos. La AACE propone los rangos de contingencia que se muestran en la Tabla 3. 4 según el Estado de Desarrollo Tecnológico del proyecto.

Tabla 3. 4. Porcentaje de Contingencia.

Desarrollo Tecnológico	Contingencia Asociada al Porcentaje del Costo a Capital
Concepto Nuevo con Información Limitada	+ 40%
Concepto con estudios experimentales realizados	30 a 70%
Planta Pilote Pequeña	20 a 35%
Modulo Completo que ha sido Operado	5 a 20%
Proceso Usado Comercialmente	0 a 10%

Por ejemplo, para un proyectos de procesos productivos de hidrocarburos, separación, compresión, transporte y bombeo de líquidos bien conocido y controlado, el rango que representara las contingencias esta entre 0 y 10%.

A. Resultados del Análisis Económico.

Como parte de los resultados del análisis económico se obtendrá:

- Perfil de ingresos asociados a un pronóstico de producción por cada opción de redimensionamiento.
- Perfil de egresos planificados de cada opción de redimensionamiento (inversión inicial, costos de producción, costos de mantenimiento planificado). En la Tabla 3. 5 se muestra los egresos relacionados con la Instalación y Desincorporación de algunos equipos típicos en las instalaciones de producción de la industria del P&G. Estos egresos son definidos para cada momento del tiempo de vida del proyecto a partir de una distribución que en este caso se caracteriza a partir de la Media y los percentiles 5 y 95. Todos los egresos deben totalizarse y generar el pronóstico estocástico de los egresos. Relacionado con este análisis, se genera el plan de instalación y desincorporación de equipos, asociado al cumplimiento de los compromisos de producción de cada opción analizada, junto con los costos relacionados para cada tipo de equipo y por año. En la

- Tabla 3. 6 se muestra una un plan de instalación de compresores requeridos para un conjunto de instalaciones.
- Perfil de costos o egresos "no planificados" de cada opción de redimensionamiento. Estos costos incluyen los costos por fallas o eventos de paro no planificados, asociados al sistema (costos de reparación; impacto en producción o producción perdida, multas y penalizaciones, contingencias, etc.).
- Jerarquización de las opciones de redimensionamiento, en base a la mejor combinación de riesgo y rentabilidad, según lo mostrado en la Figura 3. .

Tabla 3. 5. Pronóstico Probabilístico de Egresos por Instalación y Desincorporación de Equipos.

CONTINGENCIA	20%	2011			2012			2013		
RENGLON		P5	(μ)	P95	P5	(μ)	P95	P5	(μ)	P95
Separadores	Instalar	11,843.70	15,791.60	22,108.24	2,526.00	3,368.00	4,715.20	1,498.50	1,998.00	2,797.20
	Desinstalar	14,086.87	18,782.50	26,295.49	2,080.08	2,773.44	3,882.82	2,445.62	3,260.83	4,565.16
Compresores PROPIOS	Instalar	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Desinstalar	0.00	0.00	0.00	0.15	0.20	0.28	0.39	0.52	0.73
Compresores RENTA	Instalar	21,042.13	28,056.17	39,278.63	27,496.53	36,662.04	51,326.85	26,583.72	35,444.95	49,622.94
	Desinstalar	-2,530.56	-3,374.08	-4,723.71	-5,873.07	-7,830.76	-10,963.06	-9,060.09	-12,080.12	-16,912.17
Modulo de Recoleccion	Instalar	24.26	32.35	45.29	23.07	30.77	43.07	19.17	25.56	35.79
Tanques	Instalar	1,539.90	2,053.20	2,874.48	396.45	528.60	740.04	457.35	609.80	853.72
	Desinstalar	3,116.66	4,155.55	5,817.77	58.25	77.66	108.73	0.00	0.00	0.00

Tabla 3. 6. Plan de Instalación de Compresores.

Tipo de Equipo	Ecuación de Costo	$y = 0.0882\,Ln(x) + 0.0619$					*La Ecuación de costo esta desarrollada en codigos de VBA (Comp_Rta_Costo)*					
Compresor Centrifugo	2011			2012			2013			2014		
Instalación	Capacidad MMPCED	Cantidad	Costo M$	Capacidad MMPCED	Cantidad	Costo M$	Capacidad MMPCED	Cantidad	Costo M$	Capacidad MMPCED	Cantidad	Costo M$
ESTACIÓN 1	4.5	2	5,366	4.5	2	5,366	4.5	2	5,366	4.5	2	5,366
ESTACIÓN 1A	10	2	7,721	10	2	7,721	10	2	7,721	10	2	7,721
ESTACIÓN 2	5	1	2,970	5	1	2,970	5	1	2,970			
ESTACIÓN 2B				4.5	1	2,683	4.5	1	2,683	4.5	1	2,683
ESTACIÓN 2C	4	1	2,683	4	1	2,683	4	1	2,683	4	1	2,683
ESTACIÓN 3	11.2	2	7,966	11.2	4	15,933	11.2	4	15,933	11.2	4	15,933
ESTACIÓN 4	7	1	3,402	7	1	3,402	7	1	3,402	7	1	3,402
ESTACIÓN 5	4	2	5,366	4	2	5,366	4	2	5,366	4	1	2,683

B. Jerarquización de las Alternativas.

Para la jerarquización de las opciones o alternativas de redimensionamiento en bases costo-riesgo se deben hacer las siguientes actividades:

- Estimación Probabilística de la Rentabilidad de cada una de las opciones: mediante la estimación del valor presente neto (VPN) para un horizonte económico específico; para cada una de las opciones de redimensionamiento, tomando en cuenta los perfiles de ingresos y egresos resultantes de acuerdo al modelo de análisis económico tal como se muestra en el esquema de la Figura 3. 11.

  Como resultado se obtendrá una distribución de probabilidades del VPN para cada opción de redimensionamiento; para cada una se estimará un "Factor de Riesgo" y un "Factor de Rentabilidad". El Factor de Rentabilidad corresponde al valor esperado (media) del VPN. El Factor de Riesgo, está definido como el área bajo la curva que representa la probabilidad de destruir valor, generalmente está limitada por valores de VPN igual o menor a cero, sin embargo, este requerimiento mínimo de rentabilidad puede ser un objetivo establecido mediante lineamiento corporativo y solo aplicable a los negocios de una empresa determinada. Otra opción para el Factor de Riesgo es el mostrado en la figura, relacionado con el indicador de que tan alejado puede estar el valor real del VPN del valor esperado de Rentabilidad (Ver Figura 3.).

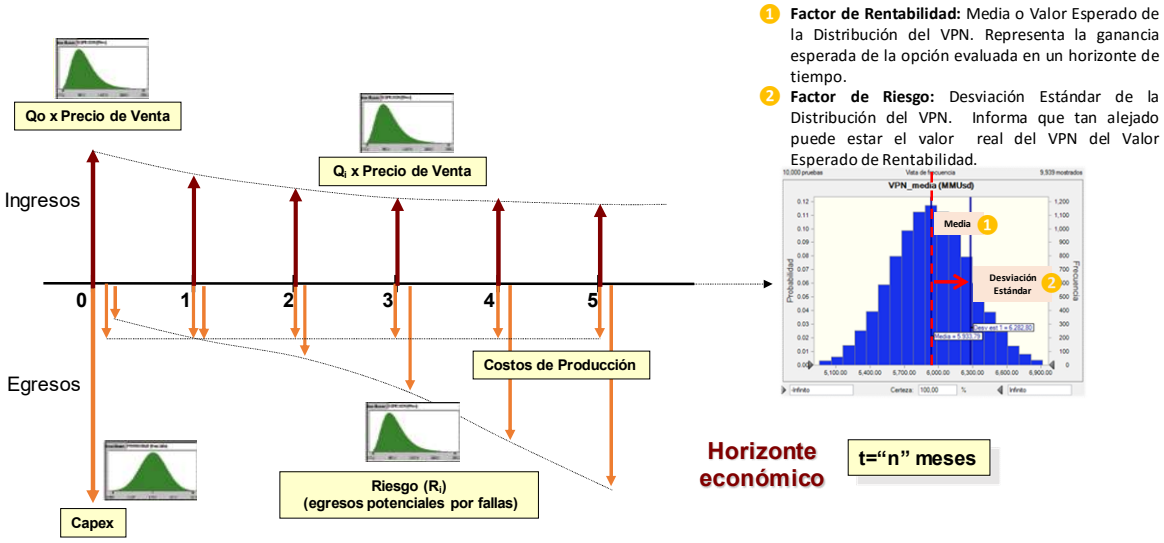

Figura 3. 132. Modelo de Estimación de la Rentabilidad de cada opción de redimensionamiento.

Para cada opción de redimensionamiento se realiza adicionalmente el análisis de sensibilidad que permitirá identificar las variables que más impactan al VPN y las que generan aumento de la incertidumbre en el mismo, para poder establecer un plan de acción para disminuir el riesgo asociado a cada opción de redimensionamiento.De esta manera se tiene una herramienta de análisis que permite apoyar el proceso de toma de decisión proactivamente, permitiendo establecer los planes de mitigación de riesgo que permitan maximizar la rentabilidad del negocio.

- Jerarquización del Portafolio de Opciones de Redimensionamiento: buscando la mejor combinación de riesgo y rentabilidad entre las opciones evaluadas. Esta jerarquización se realiza mediante una herramienta llamada "Jerarquización Rentabilidad-Riesgo"; ver figura 3.53

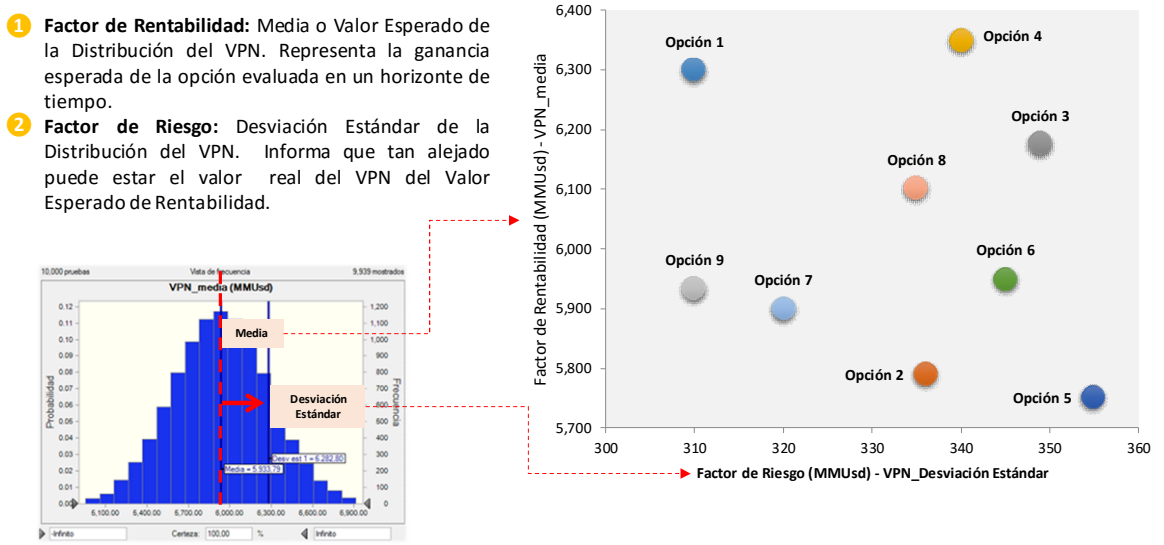

Figura 3. 53. Jerarquización Rentabilidad – Riesgo.

3.8. Definición de Planes de Acción.

Los planes de acción que se originar por la aplicación de la Metodología Estocástica de Optimización de Instalaciones de Producción deben indicar el alcance y ventajas de la misma, las actividades necesarias en cada etapa, los responsables de ejecutarlas y los mecanismos de control y de avance del proyecto, para la implantación de las recomendaciones emitidas.

Cabe destacar que el plan de acción puede estar constituido por recomendaciones que impacten de manera positiva al personal, las operaciones, el mantenimiento y en este sentido, se deben considerar todos los aspectos relacionados con la gerencia de seguridad de los procesos

La aplicación de la gerencia de seguridad de los procesos permite, además, evitar la generación de riesgos no considerados en los análisis de riesgo vigentes, y que los cambios se realicen con base en procedimientos que aseguren su análisis, evaluación, autorización, implantación, pruebas y aceptación de manera que los análisis de riesgo actuales continúen vigentes y en caso contrario, se realicen los nuevos análisis de riesgo.