

Metodología valor - riesgo y herramienta, proceso analítico jerárquico (AHP) para la selección de arquitecturas submarinas

Ing. Jesús Rodríguez Núñez

MI. Ana Bertha González Moreno

Especialistas en Sistemas Submarinos – Instituto Mexicano del Petróleo

Información del artículo: Recibido enero de 2012-aceptado junio de 2013

Resumen

La distribución y configuración de los equipos submarinos instalados sobre el lecho marino, responden a los factores de diseño para el desarrollo del campo, como son: número y localización de los pozos de producción e inyección, propiedades del fluido, características del yacimiento (tamaño y forma), crecimiento futuro, perforación y terminación de pozos, transporte y manejo de la producción desde el fondo del pozo hasta las instalaciones de procesamiento, por citar algunos; obteniendo diferentes escenarios de explotación.

Por lo tanto, en el contexto del desarrollo de campos de hidrocarburos en aguas profundas, donde se requiere evaluar y seleccionar la mejor arquitectura del arreglo del equipo submarino localizados sobre el lecho marino, es donde la metodología de valor – riesgo con apoyo de la herramienta AHP (*Analytic Hierarchy Process*) resultan de gran valía para la toma de decisión al seleccionar y jerarquizar las mejores opciones de arquitecturas submarinas basadas en atributos y sub-atributos de valor y riesgo, tanto económicos, técnicos, operación, seguridad e impacto ambiental.

Esta técnica AHP (Saaty, 1980) es un procedimiento sistemático, que permite evaluar los criterios establecidos tanto objetivos como subjetivos, que fueron tomados como base de la experiencia y conocimiento del grupo de especialistas que participan en los talleres para la aplicación de la metodología por medio de la comparación de pares en forma sistemática.

La metodología proporciona valores cualitativos y cuantitativos de los diferentes juicios, y realiza el análisis comparativo por pares, que expresan la importancia relativa de un criterio con respecto a otro. De esta manera se puede subdividir el problema general resolviéndolo por pares de manera consistente, donde la metodología valor – riesgo obliga a realizar y desarrollar las siguientes etapas:

1. Proceso General de Selección de Opciones de Solución.
2. Enfoque General para la Selección de Opciones.
3. Identificación de Opciones de Solución.
4. Metodología de Evaluación del Concepto Valor.
5. Metodología para Ponderar los Atributos de Valor (Técnica AHP).
6. Metodología de Evaluación del Concepto Riesgo.
7. Jerarquización y Selección de las Opciones de Solución.

Esta herramienta tiene una amplia aplicación en diversas áreas tecnológicas, y particularmente es muy aceptada en la industria petrolera sobre otras herramientas similares, como la teoría de los multi-atributos, (MAUT) y la técnica de jerarquizar multi-atributos simples, (SMART).

Palabras clave: Decisión, jerárquico, multicriterio, arquitectura, submarino, aguas, profundas, campos.

Value-Risk Methodology and Analytical Hierarchy Process (AHP) for Subsea Architectures selection

Abstract

The distribution and configuration of subsea equipment installed on the seabed, respond to the design factors for the development of the field, including: number and location of production and injection wells, fluid properties, reservoir characteristics (size and form), future growth, drilling and completion of wells, transportation and handling of production from the bottom of well to processing facilities, to name a few; obtaining different operating scenarios.

Therefore, in the context of the development of hydrocarbon fields in deep water, where it is required to evaluate and select the best arrangement of subsea equipment located on the seabed (*subsea architecture*), is where the Value - Risk Methodology and AHP (Analytic Hierarchy Process) tool are of great value to decision making to select and rank the best subsea options based on attributes and sub-attributes of value and risk, as well as financial, technical, operation, safety and environmental impact.

This AHP technique (Saaty, 1980) is a systematic procedure that allows evaluating the established criteria both objective and subjective, which were taken based on experience and knowledge of the group of specialists involved in the workshops, for the application of the methodology through comparison of pairs systematically.

The methodology provides qualitative and quantitative values of different judgments, and performs pairwise comparison analysis, expressing the relative importance of one criterion over another. This way, we can subdivide the general problem solving it by pairwise consistently, where the value – risk methodology undertakes to perform and carry out the following steps:

1. Option Selection Process
2. General Approach to Option Selection
3. Value / Attribute Weighting Methodology
4. Option Value Appraisal Methodology
5. Option Risk Appraisal Methodology
6. Preliminary Option Screening Methodology

This tool has a wide application in various technological areas, and in particular is widely accepted in the oil industry over other similar tools, such as the theory of multi-attributes (MAUT) and multi-rank technique simple attributes (SMART).

Keywords: Decision, hierarchical, multi-architecture, subsea, water, deep, fields.

Introducción

En el proceso de desarrollo de un campo de hidrocarburos en aguas someras y especialmente en aguas profundas, es normal evaluar la aplicación de equipos submarinos localizados sobre el lecho marino **Figura 1**, como parte del esquema integral de explotación. Dichos equipos submarinos como árboles, manifolds, PLEMs, PLETs, líneas de flujo, etc., se pueden configurar en diferentes esquemas o arreglos que responden a los criterios de diseño para el desarrollo del campo, número y localización de los pozos productores, propiedades del fluido, características del yacimiento (tamaño y forma), transporte y manejo de la producción hasta las instalaciones de procesamiento, crecimiento futuro, etc.

Para la evaluación y selección de la(s) mejores arquitecturas del arreglo del equipo submarino, es donde la metodología de valor – riesgo con apoyo de la herramienta AHP (*Analytic Hierarchy Process*) resultan de gran valía para la toma de decisión al seleccionar y jerarquizar las mejores opciones de arquitecturas submarinas basadas en atributos y sub-tributos de valor y riesgo, tanto económicos, técnicos y de operabilidad.

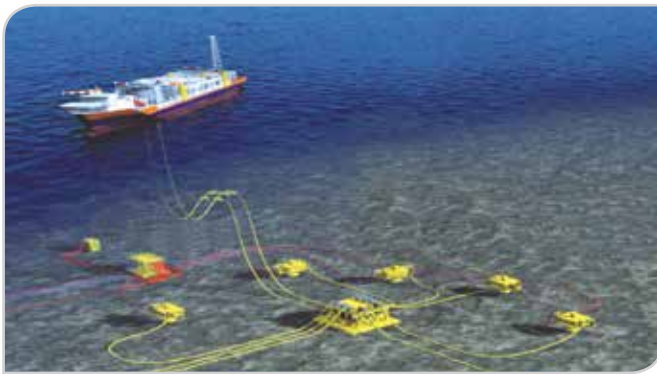


Figura 1. Arquitectura submarina en el desarrollo de un campo.

La metodología valor – riesgo en general requiere del desarrollo de las siguientes actividades:

1. Proceso general de selección de opciones de solución.
2. Enfoque general para la selección de opciones.
3. Identificación de opciones de solución.
4. Metodología de evaluación del concepto valor.

5. Metodología para ponderar los atributos de valor (Técnica AHP – Apéndice 1).
6. Metodología de Evaluación del Concepto Riesgo.
7. Jerarquización y Selección de las Opciones de Solución.

1. Proceso general de selección de opciones de solución.

El proceso en general de la metodología para la selección y jerarquización de las opciones de solución se representa en la **Figura 2**.



Figura 2. Diagrama de bloques de las actividades de la metodología V-R.

Es importante señalar que todas las etapas como establecer las bases de diseño, evaluar el plan de ejecución, capturar las incertidumbres del proyecto, identificar las acciones de mitigación y capturar las recomendaciones generales del proyecto son parte importante de la metodología valor– riesgo; sin embargo, no serán desarrolladas este trabajo por no ser el objetivo del mismo.

2. Enfoque general de la metodología para la selección de opciones

La metodología valor- riesgo permite evaluar las diferentes opciones de solución a un problema específico, por medio del establecimiento de **objetivos de valor** y **eventos de riesgo** inherentes a cada una de ellas, representándolas en un gráfico como el que se muestra en la **Figura 3**, en donde

las opciones o alternativas mejor clasificadas serán aquellas que agreguen mayor valor y conlleven un menor nivel de riesgo asociado, o en una posición muy conservadora aquellas que representen un balance entre el valor y riesgo una vez jerarquizadas.

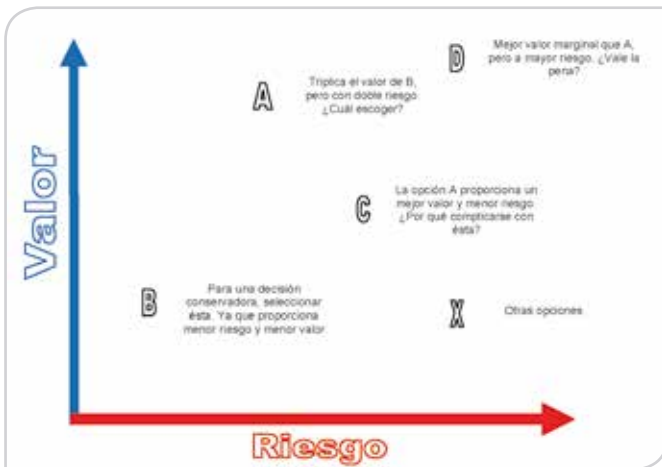


Figura 3. Enfoque general de la metodología valor - riesgo.

3. Identificación de opciones de desarrollo / solución

En el proceso de la identificación de las opciones de desarrollo se plantean todas aquellas posibles soluciones factibles de aplicarse de acuerdo con las premisas del proyecto y/o bases de diseño del mismo, las cuales son obtenidas de realizar un taller denominado marco de referencia.

Es precisamente en este taller, donde se vislumbran los diferentes escenarios factibles de aplicarse, y que proporcionan posibles soluciones en las diferentes arquitecturas submarinas, **Figura 4**, mostrando en forma esquemática cinco arreglos diferentes, como son:

- A. Loop de recolección con conexión a las dos líneas.
- B. Dos manifolds en Daisy Chain y dos líneas de exportación.
- C. Un manifold de ocho slots y dos líneas de exportación.
- D. Dos manifolds en paralelo y dos líneas de exportación.
- E. Dos pozos conectados a los ILS centrales

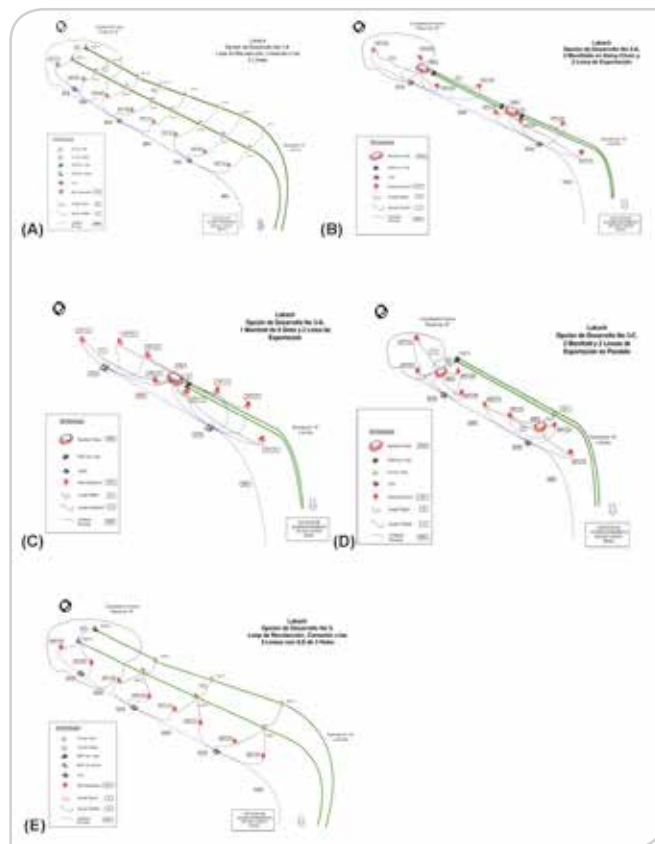


Figura 4. Identificación de opciones de solución (arquitecturas submarinas).

4. Metodología de evaluación del concepto valor

La metodología para evaluar el concepto de valor se resume en los cuatro pasos siguientes:

1. Establecer los objetivos de valor del proyecto (año de primera producción, producción por pozo, etc) y a partir de éstos definir los atributos principales y sub-atributos que clarifiquen los objetivos del proyecto y que puedan ser medibles.

Los atributos son aquellas características que permitirán que la arquitectura submarina a evaluar contribuya a los objetivos de valor, por ejemplo: "Operabilidad". Mientras, los sub-atributos son característicos del atributo principal que permiten definir de mejor forma los objetivos de valor, por ejemplo: Un sub-atributo de operabilidad es "facilidad de paro y arranque". En la **Tabla 1** se enlistan y describen brevemente los atributos y sub-atributos identificados.

Tabla 1. Atributos y sub-atributos para la determinación del concepto de valor.

Atributos principales y Sub-atributos	Descripción
1. Operabilidad	Factores que afectan la operación eficiente durante la etapa de producción del campo.
Control de líquidos	Factores que permitan reducir la acumulación de líquidos en las líneas de flujo y en los ductos.
Control de hidratos	Factores que prevengan o que faciliten la mitigación de los tapones de hidratos.
Capacidad de corrida de diablos	Arreglos estructurales que permitan el desplazamiento del diablo enviado desde la EAGL.
Facilidad de arranque y paro	Capacidad de respuesta de las válvulas, elementos de control e inyección de químicos, entre otros, para arrancar y parar, evitando sobrepresiones y taponamientos, entre otros y conlleven a un diferimiento de producción.
Flexibilidad para operar en alta y baja presión	Requerimiento inherente al yacimiento, debido a que en ciertas etapas de producción, los pozos podrían fluir a diferentes presiones, ocasionando que los pozos de mayor presión detengan el flujo de los de menor presión; reduciendo con ello la capacidad de recuperación de los hidrocarburos.
2. Constructabilidad	Factores que afectan la facilidad de fabricación e instalación de los equipos.
Modularidad/ Desarrollo en fases	Capacidad inherente desde el diseño que facilita la instalación, desinstalación y transporte de componentes pequeños para formar un sistema mayor. Mejorando con ello la construcción, pruebas, transporte, instalación, mantenimiento y crecimiento futuro, entre otros factores.
Operaciones simultáneas de perforación / instalación	Capacidad de poder evitar obstrucciones entre las embarcaciones de perforación y las de instalación, durante las etapas iniciales del campo. Para disminuir principalmente tiempos de espera de las embarcaciones.
Complejidad submarina y de ductos	Dificultad para instalar y mantener las líneas de flujo y los sistemas submarinos. Esta característica influye en la selección de las embarcaciones de instalación y actividades futuras de mantenimiento, entre otros.
Disponibilidad de recursos	Capacidad de poder contar con recursos tecnológicos y humanos, tanto nacional como internacional, para las actividades de fabricación, instalación y mantenimiento de la arquitectura. Generalmente los conceptos que hayan tenido un mayor desarrollo a nivel mundial (Mayor grado de la aplicación de la tecnología probada) se puede considerar que hay mayor disponibilidad de recursos, comparados con los conceptos de menor aplicación. También se incluye la disponibilidad de embarcaciones de instalación.

3. Costo y Programa	Factores que afecten el CAPEX, OPEX y el tiempo de producción del primer gas.
CAPEX	CAPital EXpenditure. Es el costo de la ingeniería, procura, construcción e instalación de los principales componentes submarinos: árboles submarinos, líneas de flujo, ductos, umbilical, sistemas de control y acumulador de líquidos (Slug Catcher) a la llegada a la estación en tierra. No Incluye la perforación, pozos, terminaciones ni la línea de llegada a la estación.
Fecha de primera producción de gas	Se refiere al tiempo en el cual por lo menos un pozo exitoso puede ser puesto a operar.
OPEX	OPerational EXpenditure. Se refiere a consumibles, dotación de personal, y costos relacionados a la corrida de diablos, inhibidores, cargos pagados, etc. No se consideraron mantenimiento o intervención a pozos (Workovers.)
Fecha para producción total	Se refiere al tiempo requerido para poner en producción todos los pozos. No toma en cuenta la disponibilidad de la estación de acondicionamiento de gas en tierra.
4. Potencial de Crecimiento Futuro	Se refiere a la conexión (tie in) y capacidad de expansión para aceptar pozos adicionales o producción adicional del mismo campo o de otro(s)
Capacidad de crecimiento futuro	Se refiere a la conexión (tie in) y capacidad de expansión para aceptar pozos adicionales o producción adicional del mismo campo o de otro(s).
5. Disponibilidad / Confiabilidad	Factores de los sistemas tales como confiabilidad y mantenibilidad que afecten la disponibilidad de la producción.
Confiabilidad del sistema	Experiencias previas de sistemas similares, conceptos probados en campo, nivel de madurez tecnológica, número de componentes, trayectoria de filtraciones, modos de control de falla, etc.
Producción diferida	Se refiere a la producción de gas que se tenga que reducir o detener completamente por actividades de inspección, reparación y/o mantenimiento.
Nivel de IMR	Capacidad de poder efectuar actividades de inspección, mantenimiento y/o reparación, con el empleo de menos recursos.
Capacidad de remediación del sistema	Facilidad con la que los equipos puedan ser restablecidos a su operación normal.

2. Ponderar los criterios de evaluación. Una vez identificados los atributos y sub-atributos se determina la importancia relativa que tiene cada uno dentro de cada categoría. Este paso constituye uno de las principales ventajas en la utilización del AHP para al cálculo de los pesos de los atributos principales y sub-atributos, debido a que por medio de una evaluación de pares de atributos, misma que se explica en el Apéndice 1, se obtiene el valor de peso de cada criterio. De forma similar se obtienen los valores de peso de cada sub-atributo. Los resultados que se obtuvieron de dichas matrices se muestran en la tabla de la **Figura 5**.

3. Evaluar el impacto de cada sub-atributo en cada opción de arquitectura submarina. En esta etapa se evalúa cualitativamente como cada arquitectura satisface cada sub-atributo. Para esto se emplea la siguiente métrica, en donde:

1	POBRE O MALO	3	BUENO
2	REGULAR	4	EXCELENTE

En la **Figura 5** se muestran los valores asignados y se puede apreciar como algunas arquitecturas favorecen o desfavorecen a cada sub-atributo, ej. Todas las arquitecturas submarinas fueron valoradas como buenas (3) para el manejo de líquidos, en el caso del control de hidratos las arquitecturas con manifolds obtuvieron mejor valor que las que no cuentan con estas estructuras y así sucesivamente en base al análisis de cada miembro del grupo se calificaron todas las opciones.

4. Calcular el valor en función del peso relativo de los atributos y sub-atributos. Este resultado se obtuvo

multiplicando la ponderación de cada atributo por la de cada sub-atributo y el resultado por el valor con que fue calificado el sub-atributo (del 1 al 4), los resultados se muestran en la tabla de la **Figura 5**, en la que se incluye la calificación final. La arquitectura submarina que obtuvo mejor valor fue la opción A con 3.082 puntos (Loop de recolección con ILS centrales) seguida por la opción B con 2.995 puntos (manifolds en daisy chain). Los sub-atributos en los que fue mejor calificada la opción A con respecto a la opción B son los siguientes: facilidad de arranque y paro, complejidad submarina y de ductos, CAPEX y finalmente fue mejor calificada en cuanto a producción diferida.

Atributos Principales	Peso	Sub - Atributos	Peso	Valor asignado a cada opción					Evaluación de las opciones					
				A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	
1. Operabilidad	0.35													
		Control de líquidos	0.13	3	3	3	3	3	0.136	0.136	0.136	0.136	0.136	0.136
		Control de hidratos	0.19	3	4	4	4	3	0.199	0.265	0.265	0.265	0.199	
		Capacidad de corrida de diablos	0.05	2	3	4	4	3	0.035	0.052	0.070	0.070	0.052	
		Facilidad de arranque y paro	0.28	4	2	3	3	4	0.391	0.195	0.293	0.293	0.391	
		Operación en alta y baja presión	0.35	4	4	4	4	2	0.489	0.489	0.489	0.489	0.244	
2. Constructabilidad	0.11													
		Modularidad/Desarrollo en fases	0.09	2	4	3	4	2	0.019	0.039	0.029	0.039	0.019	
		Operaciones simultáneas	0.1	1	3	1	3	1	0.011	0.032	0.011	0.032	0.011	
		Complejidad submarina y de ductos	0.38	4	2	3	2	3	0.163	0.081	0.122	0.081	0.122	
		Disponibilidad de recursos	0.43	4	3	2	3	4	0.184	0.138	0.092	0.138	0.184	
3. Costo y Programa	0.17													
		CAPEX	0.42	4	1	2	1	4	0.279	0.070	0.139	0.070	0.279	
		Fecha de primera producción de gas	0.13	2	3	2	3	2	0.043	0.065	0.043	0.065	0.043	
		OPEX	0.37	1	3	4	3	2	0.062	0.185	0.247	0.185	0.124	
		Fecha para producción total	0.08	3	2	2	2	3	0.040	0.027	0.027	0.027	0.040	
4. Potencial de Crecimiento	0.04													
		Capacidad de crecimiento futuro	1	2	4	3	4	2	0.084	0.168	0.126	0.168	0.084	
5. Disponibilidad/Confiabilidad	0.33													
		Confiabilidad del sistema	0.38	3	4	3	3	2	0.381	0.508	0.381	0.381	0.254	
		Producción diferida	0.23	4	2	1	2	3	0.307	0.154	0.077	0.154	0.230	
		Nivel de IMR	0.09	2	3	4	3	2	0.060	0.090	0.120	0.090	0.060	
		Capacidad de remediación del sistema	0.3	2	3	3	3	2	0.200	0.301	0.301	0.301	0.200	
CALIFICACIÓN									3.082	2.995	2.967	2.983	2.673	

Figura 5. Resultados de la evaluación del concepto valor.

5. Metodología de evaluación del concepto riesgo

Para la evaluación del riesgo se consideran eventos que pudieran afectar al personal, medio ambiente y al valor económico del proyecto. El principal enfoque de la evaluación es determinar la **probabilidad de ocurrencia** del evento y el **impacto o severidad** que tienen en cada opción

de arquitectura submarina. A continuación se describen los pasos a seguir:

1. Seleccionar los atributos de riesgo. Los atributos de riesgo se determinan en base a los objetivos del proyecto y son los siguientes:

Tabla 2. Atributos contextuales para evaluar el concepto de riesgo.

Atributo de Riesgo	Descripción
1. Valor del Activo	Impacto al valor del proyecto incluye CAPEX, OPEX, pérdida de ingresos, etc.
2. Programa Operacional	Tiempo de la primera producción
3. Salud y Seguridad	Daños a la salud y seguridad del personal, durante la fabricación, instalación y operación de los equipos.
4. Medio Ambiente	Afectación al medio ambiente, derivado principalmente de fugas de hidrocarburos u otros fluidos.

2. Ponderar los atributos de riesgo. Al determinar el nivel de importancia de cada atributo de riesgo, el grupo multidisciplinario de especialistas decide que

todos los atributos tendrán la misma ponderación, esto es 25% para cada uno, como se muestra en la **Figura 6.**

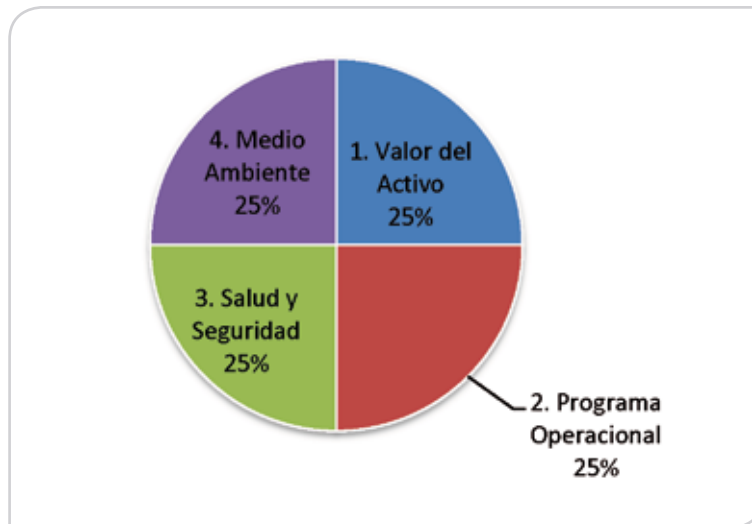


Figura 6. Ponderación de los atributos de riesgo.

3. Identificar eventos de riesgo que pudiesen afectar al proyecto. En esta etapa se identifican los eventos diferenciadores; es decir, aquellos eventos que pudieran afectar a cada arquitectura submarina tanto en probabilidad de ocurrencia como en severidad, evitando la selección de eventos genéricos que no

contribuyeran en la diferenciación. El número de eventos en esta etapa se limita a diez, ya que la intención no es la de establecer un plan de prevención o mitigación (esto se considera en otro tipo de análisis como el HAZID y el PRM). Los eventos identificados se muestran en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Eventos de riesgo.

1	Cambios en la composición del fluido, contenido de agua, contenido de condensados.	6	Operaciones simultaneas o interferencias.
2	Daños a los equipos submarinos, tuberías y umbilicales debido a las líneas de amarre o anclas.	7	Falla del sistema de control durante la operación.
3	Fallas del equipo submarino durante las pruebas SIT.	8	Formación de tapones de hidratos.
4	Fallas del equipo submarino y tuberías durante la instalación.	9	Producción de arena.
5	Retrasos en la entrega de equipos submarinos.	10	Incertidumbre en el número de pozos.

4. Valorar la probabilidad de ocurrencia de cada evento de riesgo en cada opción. Se utiliza una escala cualitativa del uno al cinco para evaluar la probabilidad de ocurrencia de cada evento en cada una de las arquitecturas submarinas, en donde:

1	MUY IMPROBABLE	2	IMPROBABLE
		3	POSIBLE
4	PROBABLE	5	MUY PROBABLE

Con base a esta métrica ya establecida por la metodología, se califica la probabilidad de ocurrencia de cada evento en las arquitecturas submarinas. En la **Tabla 4** se muestran los

resultados de la valoración de la probabilidad de ocurrencia de los eventos.

Tabla 4. Probabilidad de ocurrencia de los eventos de riesgo.

Evento o Mayor Incertidumbre	Probabilidad de ocurrencia del evento en cada arquitectura				
	A	B	C	D	E
1.- Cambios en la composición del fluido, contenido de agua, contenido de condensados.	4	4	4	4	4
2.- Daños a los equipos submarinos, tuberías y umbilicales debido a las líneas de amarre o anclas.	2	2	2	2	2
3.- Falla del equipo submarino durante las pruebas (SIT).	2	2	2	2	2
4.- Falla del equipo submarino y tuberías durante la instalación.	3	2	2	2	3
5.- Retrasos en la entrega de equipos submarinos.	5	5	5	5	5
6.- Operaciones simultáneas o interferencias.	4	4	4	4	4
7.- Falla del sistema de control durante la operación.	4	4	4	4	4
8.- Formación de tapones de hidratos.	3	4	4	4	3
9.- Producción de arena.	4	4	4	4	4
10.- Incertidumbre en el número y localización de pozos.	4	4	4	4	4

El evento que presenta la mayor probabilidad de ocurrencia es de retrasos en la entrega de los equipos submarinos, ya que es el único que se califica como muy probable (valor de 5). En general la probabilidad de los diferentes eventos es muy uniforme en todas las arquitecturas submarinas, los únicos eventos que se califican con una probabilidad diferente son dos: la falla del equipo submarino y tuberías durante la instalación (evento 4) en donde las arquitecturas con manifolds (B, C y D) obtienen un resultado menor a las de ILS centrales (A y E) debido a que estas estructuras se tienen que instalar acopladas al ducto durante el tendido del mismo. A diferencia de los manifolds que se instalan independientemente del ducto, y por lo tanto, tienen menor probabilidad de falla en la instalación.

Por el contrario, en lo referente a la formación de tapones de hidratos (evento 8) las arquitecturas submarinas con ILS centrales resultan ventajosas con relación a las opciones con manifolds, debido a que en los manifolds existen líneas de flujo muy largas y es más susceptible a que los hidratos se formen en estas secciones.

5. Determinar la severidad de cada evento en los aspectos contextuales del proyecto. Se utiliza una escala cualitativa similar a la empleada para la evaluación de la probabilidad en la que se define la siguiente métrica:

1	INSIGNIFICANTE	2	MODERADO
		3	SIGNIFICANTE
4	SUBSTANCIAL	5	EXCEPCIONAL

En la **Tabla 5** se muestran los resultados de la calificación del impacto de cada evento en cada arquitectura submarina en

función de los cuatro criterios o aspectos contextuales del proyecto.

Tabla 5. Evaluación de la severidad de los eventos de riesgo.

Evento o mayor incertidumbre	Salud y Seguridad					Medio Ambiente					Valor del Activo					Programa Operacional				
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
1.- Cambios en la composición del fluido, contenido de agua, contenido de condensados.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2.- Daños a los equipos submarinos, tuberías y umbilicales debido a las líneas de amarre o anclas.	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	5	4	4
3.- Falla del equipo submarino durante las pruebas (SIT).	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	3	2	3	3	2	3	2	3	2	3
4.- Falla del equipo submarino y tuberías durante la instalación.	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
5.- Retrasos en la entrega de equipos submarinos.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	3	2	3	2	1	2	1	2
6.- Operaciones simultáneas o interferencias.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	1	3	3	3	2	1	3	3
7.- Falla del sistema de control durante la operación.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0
8.- Formación de tapones de hidratos.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	2	2	2	3	0	0	0	0	0
9.- Producción de arena.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	2	2	2	3	0	0	0	0	0
10.- Incertidumbre en el número y localización de pozos.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	3	2	3	3	2	3	2	3

La severidad de los eventos en los criterios de salud y seguridad y medio ambiente se mantienen uniformes en cada arquitectura submarina, lo cual quiere decir que las cinco opciones tienen una afectación similar cuando se llegase a presentar alguno de los eventos de riesgo identificados. Los criterios que marcan la diferencia son valor del activo y programa operacional.

6. Obtener la valuación de riesgo para cada opción de arquitectura submarina. En principio esto se obtiene de la sumatoria del producto de la probabilidad de ocurrencia por la severidad de cada evento. La calificación final del riesgo por arquitectura submarina se resume en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Evaluación del parámetro de riesgo por opción de arquitectura submarina.

CALIFICACION DE RIESGO	ARQUITECTURAS SUBMARINAS				
	A	B	C	D	E
	26.92	24.09	25.74	24.86	26.78

En lo que corresponde a la evaluación de riesgo, la opción que obtiene menor calificación es la opción B (manifolds en daisy chain) seguido por la opción D (manifolds en paralelo). Los eventos que le otorgan esta ventaja a la opción B con respecto a la opción D son: fallas de equipo submarino

durante pruebas SIT y operaciones simultáneas, en la que la opción B resulta con menor calificación proporcionando menor riesgo en el programa operacional y valor al activo.

7. Jerarquización y selección de las opciones de solución (arquitecturas submarinas)

Para efectuar la selección de las arquitecturas submarinas se grafican los resultados de valor y riesgo con la finalidad de comparar las cinco opciones y estar en posibilidad de tomar una decisión balanceada en función de la jerarquización de las mismas, **Figura 7**. De ella se pueden inferir algunas conclusiones y resultados como son:

- 1.- La opción A resulta con la mejor relación de valor, pero con el más alto nivel de riesgo.
- 2.- Las opciones B, C y D prácticamente representan un empate técnico en la relación valor-riesgo; si bien, habrá que compararlas en el aspecto de costos.
- 3.- Por otro lado, si bien la opción E tiene la menor relación valor-riesgo, también representa la menor inversión de capital para el desarrollo del campo por tener menor nivel de equipamiento.

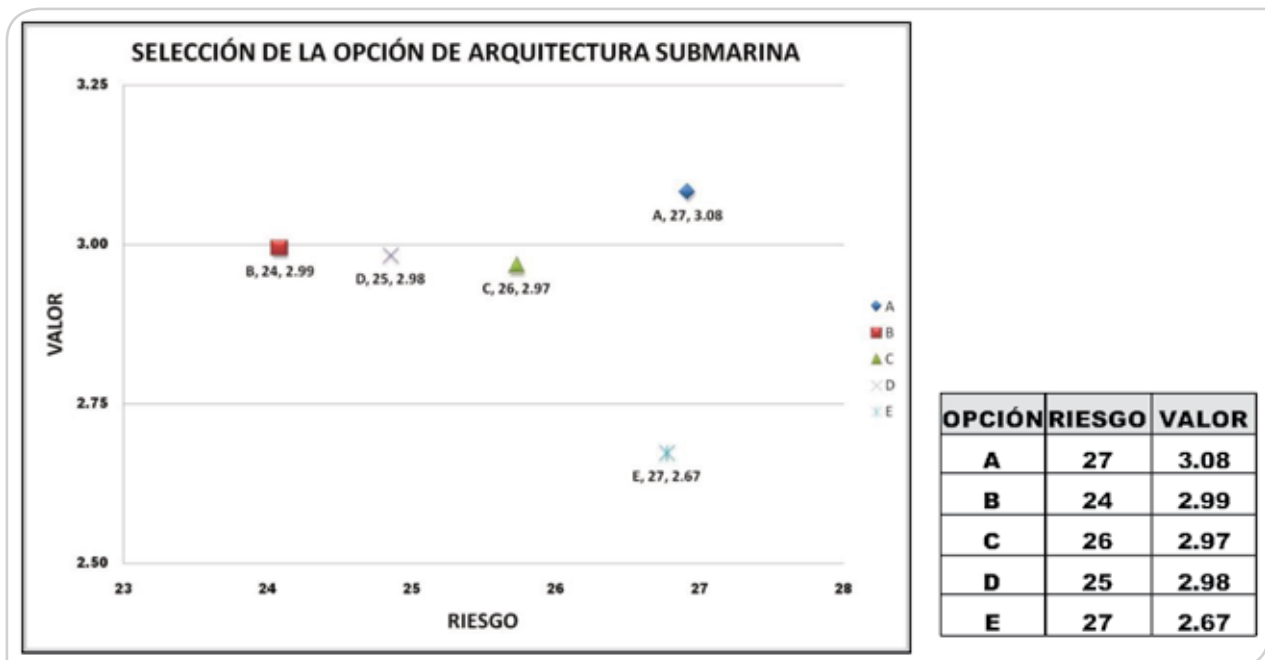


Figura 7. Valor y riesgo de las cinco opciones de arquitecturas submarinas.

4.- Finalmente, por la relación valor-riesgo, las opciones B, C y D se perfilan como las mejores o más atractivas arquitecturas submarinas, sin embargo, también se requiere de la evaluación económica de las alternativas.

Las principales fortalezas y debilidades de las tres mejores opciones de arquitecturas submarinas se presentan en la **Tabla 7**.

Tabla 7. Jerarquización de las mejores opciones de arquitectura submarina.

	ARQUITECTURAS SUBMARINAS MEJOR JERARQUIZADAS		
	B	C	D
Fortalezas	Confiabilidad del sistema	Facilidad de paro y arranque	Facilidad de paro y arranque
Debilidades	Menor facilidad de paro y arranque.	Mayor impacto a los equipos submarinos por causa de las líneas de amarre o anclas. Menor flexibilidad para adaptarse a los cambios en el número y localización de pozos.	Mayor área de influencia, lo que disminuye la capacidad de operaciones simultáneas.

Conclusiones

La aplicación de la metodología valor-riesgo considerando la técnica AHP en proyectos de explotación de campos de hidrocarburos en aguas profundas, permite cumplir con los requerimientos de seguridad marcados por el documento CNH.12.001/10 de enero de 2011, emitido por la Comisión Nacional de Hidrocarburos.

La consideración del concepto de valor incorporando otros elementos adicionales al factor económico (índices VPN, IU, TIR, etc.) tales como la seguridad, disponibilidad, tiempo para la primera producción, capacidad de crecimiento futuro, etc., son criterios que pueden cambiar la jerarquización y preferencia de las mejores arquitecturas submarinas para un campo, en comparación al considerar el valor sólo como un aspecto económico.

La metodología valor-riesgo permite involucrar equipos de trabajo multidisciplinarios, enriqueciendo la toma de decisiones en las diferentes etapas de desarrollo del proyecto acorde con la metodología FEL.

Los métodos MCDA (entre ellos el AHP), proporcionan una herramienta poderosa para los análisis de toma de decisión, en lugar de realizar éstas de forma intuitiva o heurísticas que con frecuencia conducen a errores

mentales predecibles (sesgos). Asimismo, mejora la evaluación de riesgo, ya que esta no se basa solo en equivalentes monetarios como comúnmente se realiza, ya que esta forma tiene serias limitaciones.

La principal ventaja de aplicar el método AHP es que no está dirigida en seleccionar la “mejor” alternativa, por el contrario proporciona las bases y herramientas para la toma de decisiones inteligentes por parte del administrador del proyecto.

Nomenclatura

- AHP.- Analytic Hierarchy Process – Proceso Analítico Jerárquico.
- CAPEX.- Capital Expenditures – Gastos de Capital.
- CI.- Consistency Index – Índice de Consistencia.
- Daisy-Chain.- Tipo de arquitectura submarina conectada en serie.
- FEL.- Front-End Loading. Metodología para el desarrollo de proyecto, basada en el cumplimiento de objetivos por etapas.

HAZID.-	Hazard Identification – Identificación de Riesgos.	Instituto Mexicano del Petróleo. 2010. Servicios y Asistencia Técnica en la Planeación y Desarrollo de Campos del Activo Integral Holok-Temoa, RMSO. Proyecto IMP F.33569, IMP, Ciudad del Carmen, Camp.
ILS.-	In-line Sled.	
IU.-	Índice de Utilidad.	
MCDA.-	Multicriteria Decision Analysis – Proceso de Toma de Decisiones.	Instituto Mexicano del Petróleo. 2010. Servicios de Asistencia Técnica para el Desarrollo de Infraestructura de los Proyectos de Aguas Profundas. Proyecto IMP F.33559, IMP, Ciudad del Carmen, Camp.
OPEX.-	Operational Expenditures – Gastos de Operación.	
PLEM.-	Pipeline End Manifold.	
PLET.-	Pipeline End Termination.	Instituto Mexicano del Petróleo. 2011. Desarrollo de Modelos Matemáticos para la Generación Optimizada de Perfiles de Producción y su Aplicación a la Evaluación de Estrategias de Explotación en Aguas Profundas. Proyecto IMP D.00487, IMP, México, D.F.
PRM.-	Project Risk Management – Administración de Riesgos del Proyecto.	
VPN.-	Valor Presente Neto.	

Agradecimientos

Agradecemos al personal del grupo de infraestructura del Activo Integral Holok Temoa de la Región Marina Suroeste de PEP y al Dr. J. Efraín Rodríguez Sánchez del IMP por el apoyo y críticas constructivas para lograr este trabajo y por permitirnos participar en proyectos tan importantes de la industria petrolera nacional.

Referencias

Grupo de Infraestructura. 2010. Selección de la Arquitectura Submarina del PIL. CEO-AIHT-PEP, Grupo de Infraestructura, Ciudad del Carmen, Camp. (julio 2010).

Saaty, T.L. 1980. *The Analytic Hierarchy Process: Planning Priority Setting, Resource Allocation*. New York: McGraw-Hill.

Saaty, T.L. 2001. The Seven Pillars of the Analytic Hierarchy Process. En *Multiple Criteria Decision Making in the New Millennium: Proceedings of the Fifteenth International Conference on Multiple Criteria Decision Making (MCDM) julio 10–14, Ankara, Turquía*, eds. M. Köksalan y S. Zionts, 15-37. Berlin: Springer Verlag.

Vargas, L.G. 1990. An Overview of the Analytic Hierarchy Process and its Applications. *Eur J Oper Res* **48** (1): 2-8. [http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90056-H](http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(90)90056-H).

Semblanza

Ing. Jesús Rodríguez Núñez

Ingeniero Civil egresado del Instituto Politécnico Nacional de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura en 1993.

Ha laborado en el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), por 23 años.

Inició su trayectoria profesional en la Gerencia de Ingeniería Civil, en el área de Plataformas Marinas de la Subdirección de Ingeniería de Proyectos de Explotación, en donde desarrolló proyectos para la Zona Marina de Petróleos Mexicanos, relacionados con el diseño de plataformas marinas, adecuaciones estructurales y estudios de comportamiento sísmico de las mismas.

En el año 2001 se incorpora al Departamento de Recipientes y Sistemas Flotantes de Producción, donde desarrolló capacidades y proyectos relacionados con la ingeniería de sistemas submarinos de producción y la planeación del desarrollo de campos.

Desde el 2006 y hasta la fecha, forma parte del grupo de trabajo del Programa de Explotación de Campos en Aguas Profundas, como Especialista del área técnica de Sistemas Submarinos de Producción.

En el 2007 participó en el Programa de Entrenamiento “Cameron Deepwater Development Program”, de marzo a julio 2007. – México D.F.; Houston, Tx; Berwick, LA; Aberdeen, Scotland; Leeds, England; Longford, Ireland, como parte de la capacitación del IMP en temas de Aguas Profundas.

Recibió el Premio institucional IMP-2009 de Categoría de Aplicación Industrial, como parte del equipo de trabajo del proyecto para el desarrollo de la ingeniería conceptual del Proyecto Lakach (Proyecto F.30780) siendo éste el primer campo de gas en aguas profundas en México.

Es miembro de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, A.C., desde 1997.

Ml. Ana Bertha González Moreno

Egresada de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, recibiendo el título en junio de 1989 y la Maestría en Ingeniería en febrero de 2001.

Desde 1989 hasta la fecha ha laborado en el Instituto Mexicano del Petróleo por 24 años.

Inició su trayectoria profesional en la Gerencia de Ingeniería de Producción, en el área de Instalaciones Superficiales de Producción de la Dirección de Exploración y Producción, en donde coordinó y desarrolló proyectos para la Zona Sur, Norte y Marina de Petróleos Mexicanos, relacionados con la operación, medición, estabilización, manejo y transporte de los hidrocarburos desde el fondo del pozo hasta la superficie.

En el 2000 se incorpora a la Gerencia de Atención a Clientes de Exploración y Producción de la Dirección Zona Centro, donde desarrolló capacidades para el manejo y control de proyectos, gestión de recursos, contratos de servicios y obra pública.

En el 2006 y 2007, fue seleccionada para recibir la capacitación en el “Programa de Entrenamiento de especialistas en Aguas Profundas de Pemex Exploración y Producción e IMP”, impartido por las compañías Cameron, FMC Technologies, Schlumberger, Technip, Pegasus, Framo, Intec, entre otras.

A finales del 2005 y hasta la fecha, forma parte del grupo de trabajo de la Coordinación de Explotación de Campos en Aguas Profundas, siendo líder técnico del Área técnica de Sistemas Submarinos de Producción.

Recibió el Premio institucional IMP-2009 de Categoría de Aplicación Industrial, como Líder del proyecto en el desarrollo de la ingeniería conceptual del Proyecto Lakach (Proyecto F.30780), siendo éste el primer campo de gas en aguas profundas en México.

Ha impartido clases como profesor de asignatura “A”, en el Instituto Politécnico Nacional de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, ESIA, Ticomán, impartiendo la materia de “Transporte y Medición de Hidrocarburos I”, en la carrera de Ingeniero Petrolero. Asimismo, he sido asesora de tesis de licenciatura, con temas asociados en la explotación de campos en aguas profundas y sistemas submarinos de producción.

Es miembro de la Asociación de Ingenieros Petroleros de México desde 1996, y actualmente es la Directora de la Comisión de Estudios de la AIPM–Delegación México, periodo 2013-2015.