

## Desarrollo de modelo probabilístico de fallas para el gerenciamiento del riesgo durante el ciclo de vida de válvulas de seguridad superficiales (MAV) y sub superficiales (SSSV) del aparejo de producción

*Erick William Rondero Daniel*

[erick.rondero@bveritas.mx](mailto:erick.rondero@bveritas.mx)

*Alberto Cárdenas Navas*

[albertocardenasnavas@gmail.com](mailto:albertocardenasnavas@gmail.com)

**Bureau Veritas Industry & Facilities Division, Cd. Del Carmen Campeche**

*Rafael Parrilha Spinelli*

[rafael.parrilha@mx.bureauveritas.com](mailto:rafael.parrilha@mx.bureauveritas.com)

**Bureau Veritas Industry & Facilities Division, México D.F.**

*José Cámara Anzures*

[jose.camara@mx.bureauveritas.com](mailto:jose.camara@mx.bureauveritas.com)

**Bureau Veritas Industry & Facilities Division, Villahermosa, Tabasco**

Información del artículo: recibido: marzo de 2016-aceptado: abril de 2016

### Resumen

Bureau Veritas México bajo la necesidad actual de planificar y establecer metodologías para el gerenciamiento de los activos en las empresas del sector energético, desarrolló y patentó un modelo de probabilidad de fallas que permite la administración de la integridad y el riesgo de los dispositivos de seguridad que forman parte del aparejo de producción y a su vez parte de los activos físicos integrales, con el objeto de lograr eficiencia en la producción, manteniendo el deseado equilibrio entre el riesgo, el desempeño y el costo beneficio.

En el contexto de la gestión de activos, la toma de decisiones basadas en el riesgo es la clave para el éxito del desarrollo optimizado de un plan estratégico, generando valor en el ciclo de vida, la adquisición de conocimientos apropiados y la toma de decisiones sólidas.

El funcionamiento del modelo está basado en una estructura estratégica que consiste en su primera etapa en la recopilación de información, específicamente todos los datos necesarios para la jerarquía funcional de los activos bajo el esquema de lo recomendado por la norma ISO 14224, seguido de datos del diseño, modelo e históricos de mantenimiento; finalmente toda la información requerida específica para la caracterización del fluido que interactúa directamente con el interior del dispositivo (PVT, cromatografías, análisis Stiff & Davis, aforos y análisis de crudo). En la segunda etapa el modelo con base en la información obtenida, realiza un análisis semicuantitativo que permite evaluar la susceptibilidad de mecanismos de falla específicos en aquellos componentes críticos identificados previamente, asignando ponderaciones interrelacionadas con la probabilidad de ocurrencia. En la etapa final y como resultado de una distribución Weibull, se determinan valores límite y se jerarquizan los niveles de riesgo de los dispositivos en función de su contexto operativo, sus características técnicas y las condiciones de corrosividad del fluido en cumplimiento con la normatividad aplicable y vigente. El nivel de detalle del modelo va hasta la evaluación de la severidad del proceso, (susceptibilidad de mecanismos de corrosión por dióxido de carbono, gas sulfhídrico, cloruros, agrietamiento por estrés y por difusión de hidrógeno, corrosión microbiológica, susceptibilidad a erosión y formación de incrustaciones inorgánicas y por asfaltenos) las condiciones operacionales (mantenimiento y operatividad) y las características metalúrgicas de los materiales y componentes críticos que son condición de sello.

El modelo probabilístico de fallas PROTEO presenta una interfaz amigable con el usuario y permite administrar la información como una base de datos que eventualmente pretende generar estadísticas que permitan asertivamente determinar las acciones e identificar oportunidades de mejora alineadas a los objetivos del negocio, convirtiéndose en una herramienta valiosa para la toma de decisiones a lo largo del ciclo de vida de estos activos.

**Palabras clave:** Gerenciamiento del riesgo, modelo de probabilidad de falla, gestión de activos, ciclo de vida, jerarquía funcional, susceptibilidad de mecanismos de falla, válvulas de seguridad superficial, (SSV) y válvulas de seguridad subsuperficial, (SSSV).

## Development of a probabilistic failure model for risk management during life cycle of surface safety valves (Christmas tree valves) & subsurface safety valves as part of well production equipment

### Abstract

Bureau Veritas Mexico under the current need to plan and establish methodologies for the management of assets in energy companies, developed and patented a model of probability of failure which allows integrity and risk management of safety devices that are part of gear production and these in turn part of comprehensive physical assets to achieve production efficiency, keeping the desired balance between risk, performance and cost benefits.

In the Anatomy of Asset Management decisions based on risk are the key to the success of the development of the strategic optimized plan to generate value in the life cycle, the acquisition of appropriate knowledge and sound decision making.

Functioning of model is based on a strategic structure consisting of a first stage in gathering information specifically all data necessary for the functional hierarchy of assets under the scheme recommended by the ISO 14224 standard, followed by data design, pattern and historical maintenance; finally all the specific information required for the characterization of fluid that interacts directly with the interior of the device (PVT, chromatography, analysis Stiff & Davis, production Gauging and Crude Analysis). In the second stage the model based on the information obtained performed a semi quantitative analysis which allows evaluating the susceptibility of specific damage mechanisms in those critical components previously identified, assigning interrelated weights with the probability of occurrence. In the final stage and as a result through a Weibull distribution limits and risk levels of the devices are determined according to their operational context, its technical characteristics and conditions of corrosiveness of fluid in compliance with applicable and in force regulations. The level of detail of the model covers from the evaluation of process severity (corrosion susceptibility mechanisms for carbon dioxide, hydrogen gas, chlorides, stress cracking and hydrogen diffusion, Microbiological corrosion, susceptibility to erosion and fouling inorganic and asphaltenes), to operational conditions (maintenance and operation) and metallurgical characteristics of the materials and components that are critical metal seal condition.

The probabilistic model named “PROTEO” presents a user friendly interface and allows you to manage information as a database that eventually aims to generate statistics to determine the actions assertively and identify improvement opportunities aligned to business objectives, becoming a tool valuable for decision making throughout the life cycle of these assets.

**Keywords:** Risk management, model of probability of failure, asset management, life cycle, functional hierarchy, Failure mechanisms susceptibility, surface safety valves (SSV), Subsurface safety valves (SSSV).

## Introducción

En el contexto de la gestión de activos la toma de decisiones basadas en el riesgo es la clave para el éxito del desarrollo optimizado de un plan estratégico generando valor en el ciclo de vida, la adquisición de conocimientos apropiados y la toma de decisiones sólidas en la utilización de los activos.

Haciendo una integración entre lo que las organizaciones buscan alrededor de los activos, se analizó que la pérdida de la función en los dispositivos de seguridad para el control de la producción de hidrocarburos en los pozos, asociada a los altos costos por cambios y reparaciones, afectaba las metas estratégicas poniendo en riesgo la integridad de las personas, el medio ambiente y los mismos activos.

En la búsqueda de soluciones se emplearon metodologías de ingeniería de mantenimiento y confiabilidad como fueron: RIM (Reliability Information Management) y FMECA (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis) por sus acrónimos en inglés, así como numerosos procesos de desensamble para comprobar la condición física de los componentes internos, acompañado de pruebas físico-químicas, microbiológicas, pruebas no destructivas e incluso

simulación de mecanismos y de ambientes corrosivos para la selección adecuada de materiales, además de una extensiva revisión documental; esto como principales entradas para la realización de múltiples talleres de Análisis Causa Raíz (ACR), que concluyeron en una serie de actividades de alta prioridad que nos permitieron plantear un panorama completo y definir a través del análisis de múltiples variables los aspectos críticos en el ciclo de vida de las válvulas con el propósito de cubrir la necesidad de identificar el intervalo P-F que consiste en determinar el mejor punto de referencia para establecer las frecuencias de monitoreo en los dispositivos instalados.

Bajo la premisa de la anterior necesidad, se pudo concluir que era necesario desarrollar una herramienta que permitiera analizar cuantitativamente los aspectos críticos del ciclo de vida de las válvulas y respondiera asertivamente la pregunta siguiente; ¿Cuánto es el tiempo aproximado antes de que ocurra una falla?

Las estadísticas de falla reportadas concretan que los activos de producción presentan un alto aumento en el índice de fallas para válvulas del medio árbol (MAV) y válvulas de seguridad sub superficial (SSSV) en los últimos años.

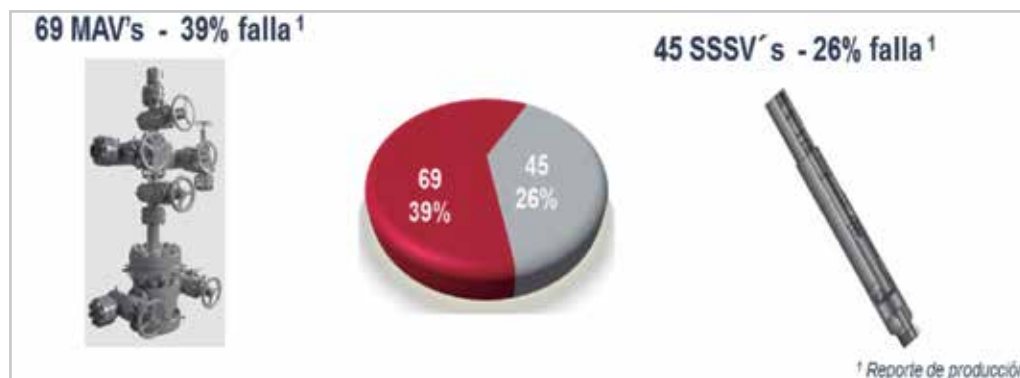


Figura 1. Situación actual.

### Enfoque estratégico del modelo

Un aspecto clave que soporta el desarrollo del modelo probabilístico es que tanto las válvulas del medio árbol (MAV) como las válvulas de seguridad subsuperficial (SSSV) poseen la característica de "falla oculta", y por lo tanto, es necesario realizar actividades programadas de búsqueda de falla (pruebas funcionales), existiendo una alta probabilidad de que precisamente durante la realización de estas

actividades de búsqueda de falla, ésta se produzca y se pierda parcial o totalmente su función.

Más allá de los beneficios que la implementación del modelo de probabilidad de falla supondría, es necesario identificar cuál es el valor generado dentro del plan estratégico organizacional y cuáles fueron los objetivos que se plantearon alrededor de su desarrollo:

- A partir de los requerimientos BSI ISO 55000, identificar el impacto que tiene el modelo dentro de las áreas de gestión de activos, **(enfoque hacia el plan estratégico organizacional)**.
- Interrelacionar todas las variables principales que afectan la función y el ciclo de vida **(enfoque hacia el análisis del contexto operacional y el diseño)**.
- A partir de metodologías y mejores prácticas basadas en confiabilidad y riesgo, identificar cuáles eran las causas de la pérdida de la función, **(enfoque hacia las mejores prácticas de mantenimiento)**.
- Definir una matriz de clasificación del riesgo y un cálculo aproximado del intervalo P-F, **(gestión hacia el gerenciamiento del riesgo)**.
- Valoración del costo operativo a partir del análisis de escenarios en el costo del ciclo de vida, usando métricas (VPN) o relaciones costo-beneficio dentro de un periodo, **(gestión financiera en Opex y Capex)**.

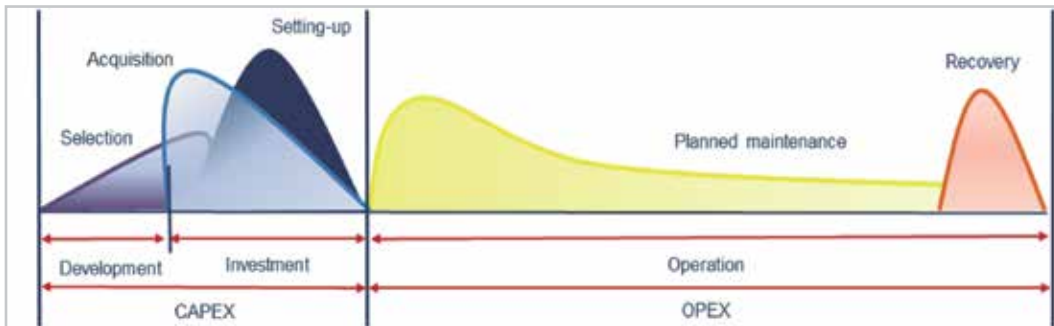


Figura 2. Costo de ciclo de vida en válvulas MAV y SSSV.

### Objetivos generales y específicos

La estructura técnica sobre la cual fue elaborado el modelo nos permitió desarrollar una herramienta cuyo modo de funcionamiento a partir de las condiciones históricas de operación y mantenimiento, características

técnico-mecánicas y evaluación del contexto físico químico y termodinámico del proceso al que se someten, nos permitan determinar, sustentado en la jerarquización del riesgo, las probabilidades de falla con respecto al tiempo de equipos estáticos en la industria petrolera y de refinación.



Figura 3. Estructura técnica.

De manera específica se buscó definir las variables críticas para equipos de seguridad (válvulas superficiales y sub superficiales) que afectan su condición a partir de la operación, nivel de calidad de los materiales y condiciones de severidad del pozo, dichas variables permitieron evaluar la susceptibilidad para el desarrollo de los diferentes mecanismos de falla soportado en la pericia del grupo multidisciplinario y en pleno cumplimiento con lo establecido en las normativas internacionales aplicables.

A partir del análisis probabilístico proporcionado por el modelo, se puede estimar un tiempo de vida antes de falla con base en la experiencia del contexto operativo nacional, la vida útil en servicio de la válvula según el fabricante (MTTF), análisis estadísticos (distribución de Weibull) e ingeniería de confiabilidad.

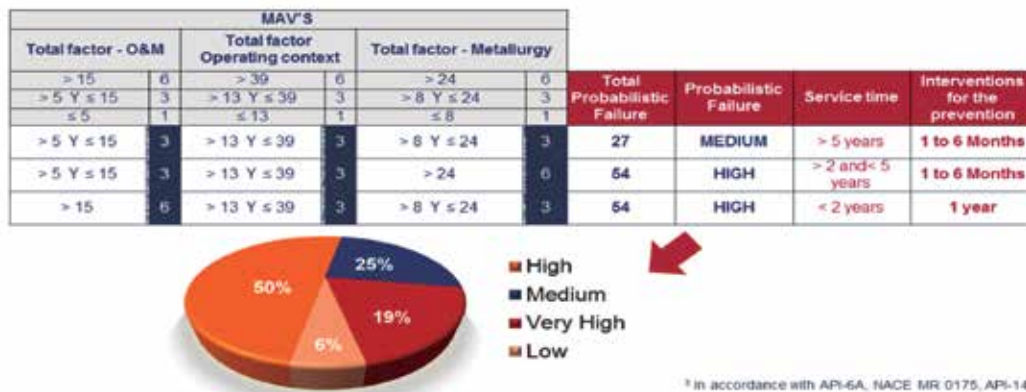


Figura 4. Modelo de probabilidad de falla, (MAV´s).

Consecuentemente, a manera de administrar la información arrojada por el modelo una vez alimentada la base de datos, se desarrolló una interfaz amigable con el usuario que permite gestionar permisos de acceso y realizar el análisis personalizado con la información técnica requerida sistemáticamente y sin complicaciones, cuyo análisis al final permite de manera visual e informativa identificar los factores que influyen en menor o mayor medida en la falla de la válvula en condiciones anteriores, presentes o futuras, en caso de contar con las bases de usuario e información completa requerida para el proceso de captura en el modelo.

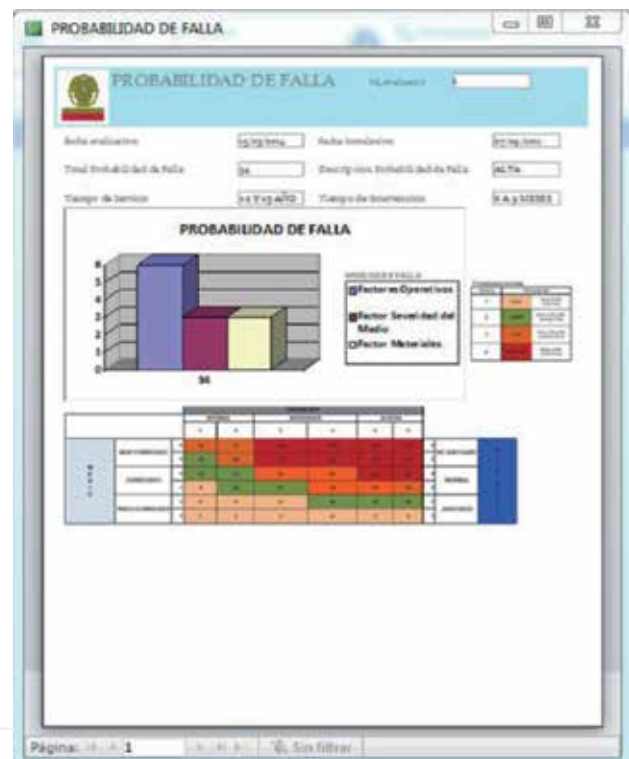


Figura 5. Interfaz de usuario modelo de fallas.

### Alcance, (nivel de detalle)

El nivel de detalle del modelo, a través de la evaluación de múltiples variables por la ponderación en la criticidad y susceptibilidad de los eventos, abarca procesos de corrosión por dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), gas sulfhídrico (H<sub>2</sub>S), cloruros (Cl<sup>-</sup>), agrietamiento por estrés y por difusión de hidrógeno (SSC, SCC y HIC) corrosión microbiológica (MIC), susceptibilidad a procesos de erosión y formación de incrustaciones inorgánicas y por asfáltenos; mantenimiento y operatividad (engrasado, pruebas de hermeticidad, pruebas funcionales y selección de presiones en línea hidráulica), selección adecuada y cumplimiento del nivel de calidad, (nivel de especificación del producto y requerimientos de desempeño) en el caso de válvulas del medio árbol y “clases API” para el caso de las válvulas de tormenta según NMX-L170-SCFI-2004, así como características propias del modelo y diseño de las válvulas.

### Beneficios y conclusiones

Entre los beneficios identificados se enlistan los siguientes:

- El modelo permite determinar cuantitativamente con base en una matriz de riesgo la probabilidad

de falla evitando las pérdidas de producción por la ejecución de un programa de búsqueda de fallas.

- Al ser una herramienta que jerarquiza el riesgo y asigna niveles de probabilidad, permite priorizar intervenciones e identificar oportunidades.
- Además de soportar el arreglo de mayor valor entre costo, riesgo y desempeño soporta el plan de gestión de activos en el gerenciamiento del riesgo.

Durante el desarrollo del proyecto, el modelo probabilístico fue aplicado en cuatro casos diferentes de falla en válvulas de seguridad para dos de los principales activos petroleros del país. La situación común para cada uno de los casos resultó ser la “mortalidad infantil”, es decir, la falla funcional anticipada con respecto a su ciclo de vida.

Ante la comparación de los tiempos de falla de las válvulas con la simulación respectiva en el modelo bajo las condiciones operativas, técnicas y de mantenimiento reales, se pudo observar que la matriz de intervenciones posterior a la fecha de instalación del modelo de probabilidad tenía una variación de +/- 3 meses con los tiempos reales de falla, en el menos certero de los casos, **Figura 6**.

Tiempo de intervención	Proyección a 15 años		
	1 año	3 años	5 años
LCC			
Adquisición	USD 194,442.19	USD 72,987.19	USD 84,157.49
Producción Diferida	USD 11,080,841.02	USD 3,620,716.54	USD 2,129,276.62
Manto. Preventivo	USD 0.00	USD 11,519.82	USD 12,446.47
Pruebas funcionales	USD 3,891.05	USD 2,619.66	USD 3,143.85
VPN	USD 11,279,433.494	USD 3,707,957.05	USD 2,229,154.37
VPN (anual)	USD 1,482,949.72	USD 487,499.09	USD 293,075.35
Oportunidad de negocio			USD 1,478,802.74
	USD 7,571,476.36		
	USD 9,050,279.12		

**Figura 6.** Proyección a 15 años considerando intervenciones oportunas según PROTEO.

El modelo para el análisis probabilístico de fallas aplicado a la industria petrolera, específicamente a las válvulas del medio árbol (MAV) y válvulas de tormenta (SSSV), representa una herramienta útil en la gestión administrativa, adaptable y en proceso de aplicación que soporta la toma de decisiones basadas en el riesgo y criticidad, obteniendo un costo beneficio y oportunidad de negocio tangible.

## Agradecimientos

Agradecemos infinitamente al grupo multidisciplinario, directivos, supervisores y personal en general que colaboró con el proyecto a través de la puesta a disposición de la información que garantizó el éxito del modelo y nos llevó a identificar variables críticas y hallazgos importantes para la mejora continua y atención a los retos que la industria nacional del petróleo y gas nos sugiere.

## Referencias

*API 571, Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry*, second edition. 2011. Washington, DC: API.

*API RP 14 E-2007, Recommended Practice for Design and Installation of Offshore Production Platform Piping Systems*, fifth edition. 2007. Washington, DC: API.

*API RP 581, Risk Based Inspection Technology*, second edition. 2008. Washington, DC: API.

*API SPEC 6A, Specification for Wellhead and Christmas Tree Equipment*, twentieth edition. 2013. Washington, DC: API.

*API SPEC 14A, Specification for Subsurface Safety Valve Equipment*, twelfth edition. 2015. Washington, DC: API.

*DNV-RP-F107. Risk Assessment of Pipeline Protection*. 2010. Bærum, Norway: Det Norske Veritas.

*DNV-RP-G-101, Recommended Practice for Risk Based Inspection of Topsides Static Mechanical Equipment*. 2010. Bærum, Norway: Det Norske Veritas.

*ISO 55001: 2014, Asset Management – Overview, Principles and Terminology*. 2014. Geneva, Switzerland: ISO.

*NACE MR0175, Materials Resistant to Sulfide Stress Cracking in Corrosive Petroleum Refining Environments*. 2002. Houston, Texas: NACE.

*Norsok ST-D010, Well Integrity in Drilling and Well Operations*, rev. 3. 2004. Lysaker, Norway: Standards Norway.

*PROY-NMX-L170-SCFI-2004, Selección, Instalación, Operación y Mantenimiento de Válvulas Subsuperficiales de Seguridad de Pozos Petroleros (Válvulas de Tormenta)*. 2004. México: Dirección General de Normas.

## Semblanza de los autores

### Erick William Rondero Daniel

Químico Industrial egresado de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Autónoma de Yucatán, mejor promedio de generación en especialidad de corrosión.

Experiencia en investigación como líder de línea para corrosión de catalizadores usados en la industria del biodiesel, Publicación internacional en conjunto con el Dr. Luis Díaz Ballote y el Dr. Luis Maldonado López del CENTRO DE INVESTIGACIONES AVANZADAS DEL IPN (CINVESTAV), en Revista Mexicana de Física con el tema "CORROSION OF ENGINEERING MATERIALS IN ALCOXIDES".

Participación como ponente en el XVII Congreso Internacional de Investigación de la Sociedad Mexicana de Materiales.

Participación como ponente en el XVI Congreso Internacional de Mantenimiento de la Asociación Colombiana de Ingenieros, (ACIEM).

Participación en el Seminario Internacional de Pipeline Integrity Management de la Asociación Nacional de Ingenieros en Corrosión (NACE).

Experiencia en análisis fisicoquímicos del crudo y lubricantes obtenidos de los pozos del Activo Cantarell en laboratorio de compresión y producción de Pemex Exploración y Producción.

Experiencia específica en la industria Oil & Gas como analista de integridad de ductos, recubrimientos anticorrosivos, operador N-I Equipo Wavemaker para inspección de línea con ondas guiadas calificado por Guided Ultrasonics Limited del Imperial London Collage, Inglaterra. Inspector N-II en ensayos no destructivos UT, PT, VT Y MT. Ingeniero Jr. de confiabilidad, miembro activo de NACE INTERNATIONAL e Inspector Certificador de BUREAU VERITAS en México.

### **Alberto Cárdenas Navas**

Reconocido especialista con una amplia experiencia en las áreas de Ingeniería de Mantenimiento y Confiabilidad adquirida durante más de 14 años de trabajo en las industrias petrolera, energética y minera, en empresas como Wood Group, AMS Group y Bureau Veritas.

Es Profesional certificado en mantenimiento y confiabilidad de la SMRP e instructor certificado en las áreas de gestión de activos, ingeniería de confiabilidad, mantenimiento predictivo y gestión de mantenimiento. Ha liderado la ejecución de diagnósticos de mantenimiento y gestión de activos y la implementación de programas de mejoramiento en importantes empresas de América Latina.

### **Rafael Spinelli Parrilha**

Director General Bureau Veritas México

Ingeniero Mecánico egresado de la Universidad Federal Fluminense, (Río de Janeiro, Brasil), Maestro en Ciencias con especialidad en cálculos de estructuras offshore por el método de los elementos finitos por la Universidad Federal Fluminense (Río de Janeiro, Brasil) y por la Université Pierre et Marie Curie, Paris VI (París, Francia) y MBA en Administración de Negocios por la Fundación Getúlio Vargas, (Río de Janeiro, Brasil).

Inició sus actividades laborales en 1998 en el "Instituto Nacional de Metrologia, Normalizacao e Qualidade Industrial – INMETRO" en Brasil y luego de un período de 2 años como Ingeniero de Mantenimiento de la Cervecería Schincariol en Brasil; ingresó en Bureau Veritas Brasil en 2002 como Ingeniero de Revisión de Proyectos de Embarcaciones y Unidades Flotantes Offshore. En su trayectoria en Bureau Veritas se ha desempeñado como Ingeniero estructurista y Especialista en sistemas de producción y ductos submarinos. Ha ocupado las gerencias del Centro Técnico de Río de Janeiro para Embarcaciones y Unidades Flotantes Offshore y del Departamento de SURF (Subsea, Umbilicals, Risers and Flowlines). Desde el 2011 es Director General de Bureau Veritas en México.



## **José Cámara Anzures**

Ingeniero Metalúrgico egresado del IPN

Diplomado Dirección y Desarrollo de Negocios– ITAM

Miembro de la comunidad de Alta Dirección de Empresa–IPADE

De 1985 a 1987 como académico de la ECCC, (Escuela Comercial Cámara de Comercio), de 1989 a 1996 Ingeniero especialista y Coordinador de supervisión de construcción de instalaciones marinas en el Instituto Mexicano del Petróleo; de 1996 a la fecha como Gerente de proyectos, Gerente de operaciones y actualmente Director de operaciones del área Industria de Bureau Veritas Mexicana, donde como actividades principales realiza el desarrollo estratégico de negocios, gerenciamiento de proyectos, control de costos, administración de personal, actividades comerciales y asistencia técnica.

Líder del equipo técnico en la construcción la planta de GNL en la terminal de Manzanillo, Perito independiente en la resolución de controversias técnicas en proyectos IPP con Comisión Federal de Electricidad (CFE), y sus proveedores, Gerente técnico de la UV de gas natural, Gerente técnico en certificación en servicios de la industria petrolera.

De 2009 a 2012 como Gerente de operaciones del área de comercio internacional en Bureau Veritas Mexicana.