

UNIVERSIDAD  
PANAMERICANA®

**UNIVERSIDAD PANAMERICANA**

---

---

ESCUELA DE GOBIERNO Y ECONOMÍA

*ANÁLISIS DE RIESGOS: FRECUENCIA DE FALLA  
EN DUCTOS DE TRANSPORTE DE GAS NATURAL  
MEDIANTE REDES BAYESIANAS, UN CASO DE  
APLICACIÓN*

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**MAESTRÍA EN ECONOMÍA Y  
REGULACIÓN ENERGÉTICA**

**P R E S E N T A:**

**ALEJANDRO RÍOS RODRÍGUEZ**

DIRECTOR DE TESIS:  
DRA. GRISELDA DÁVILA ARAGÓN

CIUDAD DE MÉXICO, 2022

## RESUMEN

A partir de la Reforma Energética de 2013, México ha atravesado una profunda serie de cambios en el sector energético tanto a nivel económico, tecnológico y social. A pesar de las diferencias y controversias a nivel político e ideológico, los gobiernos en México han perseguido un mismo objetivo: el establecimiento de una industria energética eficiente, segura y sustentable para promover el desarrollo nacional.

De acuerdo con el *BP Statistical Review of World Energy* de 2020, el gas natural constituye el 24.2% de la matriz energética primaria global, siendo el tercer recurso energético de mayor uso, además que se prevé que dicha tendencia se mantenga para convertirse en el recurso energético principal a nivel mundial. En este contexto, el transporte de gas natural como actividad establece el enlace entre los productores y los usuarios finales (principalmente centrales eléctricas), lo que se realiza principalmente mediante el uso de ductos de alta presión. Por lo anterior, la preservación de la integridad de la infraestructura de transporte de gas natural es crítica para mantener la estabilidad de la matriz energética.

La ASEA como regulador del sector energético nacional en materia de seguridad industrial, operativa y protección al medio ambiente establece en su **NOM-009-ASEA-2017**, *Administración de la integridad de ductos de recolección, transporte y distribución de hidrocarburos, petrolíferos y petroquímicos*, la necesidad de contar con un análisis de riesgos para identificar, analizar, evaluar y generar alternativas de mitigación y control de los riesgos significativos asociados al transporte de gas natural.

En ese sentido, dicha norma establece que es posible utilizar métodos cuantitativos que igualen o mejoren los métodos de Análisis de Riesgos básicos establecidos en la norma. Para esto, se propone la elaboración de una Red Bayesiana a partir de la elaboración de un Árbol de Fallas para analizar la frecuencia de falla de un segmento de ducto de transporte de gas natural real incorporando los factores operativos, materiales y ambientales que podrían propiciar dicha falla. Esto incorporando evidencia estadística disponible en la literatura para calcular las distribuciones a posteriori de los eventos.

Los resultados obtenidos indican que dicho enfoque es factible y razonable, además de útil gracias a las ventajas que presentan las Redes Bayesianas frente a otros métodos, lo cual puede aportar a identificar factores críticos de seguridad para contribuir a preservar la seguridad y confiabilidad de dicha infraestructura.

## DEDICATORIA

*A la memoria de mis abuelos, que fueron responsables en gran medida de la persona que hoy escribe estas palabras.*

*A mi madre, que siempre procuró darme todo lo necesario para alcanzar mis metas.*

*A mis compañeros y excelentes profesionistas que compartieron conmigo su valiosa experiencia y conocimientos en este recorrido: Aidé, Blanca, Diego, Francisco, José Luis, Lucero, Lupita, Paty y Roberto.*

*A mis compañeros y jefes que estuvieron conmigo tanto en la Comisión Reguladora de Energía como en la Agencia de Seguridad, Energía y Ambiente que me permitieron iniciarme en el servicio público y que me apoyaron en mi formación dentro del sector energético.*

*A Natalia, que siempre ha estado ahí para levantarme con cada caída y que nunca ha soltado mi mano.*

*Gracias por todo...*

## RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS

Ante todo, gracias a Dios por haberme puesto en este camino y por la oportunidad para continuar mi formación como profesionista comprometido con el bienestar este país.

Al CONACYT por su valiosa contribución en el desarrollo de más y mejores profesionistas mediante el fomento a la investigación e innovación científica y tecnológica en México. En particular, gracias al Fondo Sectorial CONACYT-SENER-Hidrocarburos, que depositó su confianza en mis compañeros y en mí para dotarnos de herramientas que contribuyan en esta nueva realidad en beneficio de la sociedad.

A la Universidad Panamericana y a todo el personal que conforma esta excelente institución por abrirme las puertas para formar parte de esta comunidad y gracias al Centro de Regulación Energética y Economía del Desarrollo y a la Escuela de Gobierno y Economía de la Universidad Panamericana por empujarnos a los más altos estándares de calidad académica y de investigación.

A la Comisión Reguladora de Energía (CRE) y a la Agencia Nacional de Seguridad, Energía y Ambiente (ASEA) por su comprensión y las facilidades otorgadas para permitirme continuar con mis estudios en este programa durante mi periodo laboral.

Muchas gracias a todos los excelentes maestros, investigadores y profesionales que fueron parte de este camino compartiendo su amplia experiencia, valores y compromiso con el país en este programa de maestría.

Gracias a la Dra. Griselda Dávila y al Dr. Francisco Ortiz por su valioso apoyo, conocimiento y consejos que me permitieron culminar el desarrollo del presente trabajo con éxito.

Finalmente, gracias al jurado que fue asignado para la revisión y discusión del presente trabajo por su tiempo y sus consejos que han permitido enriquecer esta tesis y agregarle valor a esta última etapa.

# ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	ii
<b>DEDICATORIA</b> .....	iii
<b>RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS</b> .....	iv
<b>ÍNDICE</b> .....	v
<b>Lista de Tablas</b> .....	vii
<b>Lista de Figuras</b> .....	ix
<b>Lista de Ecuaciones</b> .....	xiv
<b>Introducción</b> .....	1
I. Motivación .....	1
II. Estructura del Trabajo .....	3
<b>Capítulo 1. Estado del Arte</b> .....	4
1.1 Definición de Riesgo .....	5
1.2 Análisis de Riesgo .....	6
1.3 Identificación de Peligros .....	6
1.4 Análisis de Consecuencias .....	8
1.5 Análisis de Frecuencia .....	9
1.6 Evaluación de Riesgos .....	10
1.7 Otros métodos convencionales para el Análisis de Riesgo .....	14
1.8 Métodos no convencionales para el Análisis de Riesgo .....	17
1.9 Regulación del Riesgo Industrial .....	18
<b>Capítulo 2. Redes Bayesianas</b> .....	24
2.1 Riesgo e Incertidumbre .....	24
2.2 Fuentes de Incertidumbre .....	25
2.3 Probabilidad Clásica .....	26
2.4 Probabilidad Bayesiana .....	30
2.5 Inferencia usando el Teorema de Bayes .....	33
2.6 Definición de Redes Bayesianas .....	37
2.7 Teoría de Dempster-Shafer .....	46
2.8 Construcción de una Red Bayesiana .....	48
2.9 Ventajas de las Redes Bayesianas .....	49

<b>Capítulo 3. El Gas Natural y su Infraestructura en México</b> .....	51
3.1 El Gas Natural.....	51
3.2 Economía del Gas Natural .....	61
3.3 Marco Regulatorio del Gas Natural en México.....	74
3.4 Infraestructura de Transporte de Gas Natural por Ducto en México .....	87
3.5 Revisión de accidentes relacionados con Gas Natural relevantes para el caso de estudio .....	94
<b>Capítulo 4. Construcción de una Red Bayesiana para la Identificación y Cuantificación de Riesgos en un segmento de ducto de transporte de gas natural</b> .....	97
4.1 Recopilación, revisión, integración y análisis de datos relativos al segmento de ducto .....	98
4.2 Identificación de Peligros .....	103
4.3 Segmentación .....	111
4.4 Selección del método de Análisis de Riesgo .....	116
<b>Capítulo 5. Cuantificación y Análisis de la Red Bayesiana para el Análisis de Riesgo en el caso de aplicación</b> .....	135
5.1 Identificación de los nodos.....	135
5.2 Obtención de datos y probabilidades a priori para los nodos padre.....	141
5.3 Probabilidades a posteriori.....	143
<b>Conclusiones</b> .....	155
<b>Bibliografía</b> .....	157

## Lista de Tablas

Tabla 1. Algunos accidentes en el sector hidrocarburos en México en años recientes .....	2
Tabla 2. Ejemplo de Criterios de Frecuencia de Falla.....	11
Tabla 3. Ejemplo de Criterios de Consecuencia de Falla .....	12
Tabla 4. Matriz de Riesgo. Fuente: Elaboración propia a partir de información la NOM-009-ASEA-2017.....	12
Tabla 5. Regiones de Riesgo. Fuente: Elaboración propia a partir de información la NOM-009-ASEA-2017.....	13
Tabla 6. Metodologías para el Análisis de Riesgo. Fuente: Elaboración propia a partir de información del Seminario Web Guía para la Elaboración del Riesgo del Sector Hidrocarburos. ....	14
Tabla 7. Cuadro comparativo Riesgo e Incertidumbre .....	25
Tabla 8. Propiedades Generales del Gas Natural. Fuente: Elaboración propia a partir de información de Hojas de Datos de Seguridad del Gas Natural tomada de <a href="https://www.linde.mx/-/media/corporate/praxair-mexico/documents/safety-data-sheets/gas-natural-hds-p4627e-2009.pdf">https://www.linde.mx/-/media/corporate/praxair-mexico/documents/safety-data-sheets/gas-natural-hds-p4627e-2009.pdf</a> .....	56
Tabla 9. Especificaciones del Gas Natural. Fuente: Elaboración propia a partir de la información de la NOM-003-SECRE-2010.....	56
Tabla 10. Funciones del CENAGAS.....	78
Tabla 11. Puntos de Inyección del SNG.....	91
Tabla 12. Sectores operativos y longitud de ductos del SNG que recorren dichos ductos (Kilómetros) .....	92
Tabla 13. Algunos accidentes importantes en el Transporte o Distribución de Gas Natural por medio de ductos. ....	94
Tabla 14. Información mínima para el Análisis de Riesgo e integridad del Ducto, Segmento o sección hasta la etapa de Diseño. Fuente: Tomada de la NOM-009-ASEA-2017.....	99

Tabla 15. Información para el Análisis de Riesgo del caso de estudio. Fuente: Elaboración propia. ....	102
Tabla 16. Categorías de Peligros. Fuente: Tomada de la NOM-009-ASEA-2017. ....	103
Tabla 17. Criterios mínimos para la Segmentación. Fuente: Tomada de la NOM-009-ASEA-2017 .....	111
Tabla 18. Características del segmento de ducto seleccionado. Fuente: Elaboración propia. ....	111
Tabla 19. Simbología común utilizada para la construcción de Árbol de Fallas. Tomada de “Análisis: Árbol de Fallas, qué es y cómo se utiliza” <a href="https://laedu.digital/2020/03/08/analisis-arbol-de-fallas-que-es-y-como-se-utiliza/">https://laedu.digital/2020/03/08/analisis-arbol-de-fallas-que-es-y-como-se-utiliza/</a> .....	118
Tabla 20. Puertas usadas para describir relaciones en el Árbol de Fallas. Tomada de “Análisis: Árbol de Fallas, qué es y cómo se utiliza” <a href="https://laedu.digital/2020/03/08/analisis-arbol-de-fallas-que-es-y-como-se-utiliza/">https://laedu.digital/2020/03/08/analisis-arbol-de-fallas-que-es-y-como-se-utiliza/</a> .....	119
Tabla 21. Eventos considerados para el Análisis de Riesgos general en un ducto de transporte de gas natural. ....	121
Tabla 22. Eventos considerados para el Análisis de Riesgos en el caso de estudio propuesto. ....	128
Tabla 23. Probabilidad Condicional de la Puerta “O”. ....	132
Tabla 24. Probabilidad Condicional de la Puerta “Y”. ....	133
Tabla 25. Descripción de los nodos para el Análisis de Riesgos. ....	136
Tabla 26. Probabilidad de ocurrencia de los nodos para el Análisis de Riesgos. ....	142
Tabla 27. Probabilidad de ocurrencia de los nodos principales.....	153

## Lista de Figuras

Figura 1.1 Diagrama ALARP. Fuente: Elaboración propia a partir de la información de <a href="https://www.ioshmagazine.com/2016/01/10/alarp">https://www.ioshmagazine.com/2016/01/10/alarp</a> .....	11
Figura 1.2 Resumen del Proceso de Análisis de Riesgo. Fuente: Elaboración propia .....	13
Figura 1.3 Estructura institucional del sector energético en México, posterior a la Reforma Energética de 2013. Fuente: Tomada de ASEA: Un Nuevo Modelo de Institución del Estado Mexicano .....	20
Figura 1.4 Logotipo institucional de PEMEX. ....	22
Figura 1.5 Logotipo institucional de CFE.....	22
Figura 2.1 Grafo Dirigido de 5 nodos      Figura 2.2 Grafo Cíclico de 4 nodos ...	38
Figura 2.3 Ejemplos de Grafos Dirigidos Acíclicos (GDA).....	38
Figura 2.4 Grafo Dirigido Acíclico Básico .....	39
Figura 2.5 Grafo Dirigido Acíclico de 4 nodos (Dávila Aragón, 2014). ....	40
Figura 2.6 Ejemplo de una Red Bayesiana (Dávila Aragón, 2014). ....	41
Figura 2.7 Ejemplo de Moralización .....	43
Figura 2.8 Ejemplo de Triangulación.....	44
Figura 2.9 Ejemplo de Construcción del Árbol de Derivación.....	45
Figura 3.1 Clasificación del Gas Natural según la Ley de Hidrocarburos. Fuente: Elaboración propia a partir del contenido de la Ley de Hidrocarburos .....	54
Figura 3.2 Componentes del Gas Natural. Fuente: Secretaría de Energía. ....	55
Figura 3.3 Subproductos petroquímicos del Gas Natural. Fuente: Elaboración Propia.....	58
Figura 3.4 Distribución de reservas probadas de gas natural en el mundo en 1999, 2009 y 2019. Fuente: Tomada del BP Statistical Review of World Energy 2020. .	60
Figura 3.5 Gasoducto Topolobampo en Sinaloa. Fuente: Tomada de <a href="https://centrourbano.com/2018/07/19/construyen-gasoducto-chihuahua-sinaloa/">https://centrourbano.com/2018/07/19/construyen-gasoducto-chihuahua-sinaloa/</a> .	62
Figura 3.6 Buque metanero “LNG Akwa Ibom”. ....	63

Figura 3.7 Producción mundial de gas natural por región en billones de metros cúbicos a partir de 1994. Fuente: Tomada del BP Statistical Review of World Energy 2020. ....	65
Figura 3.8 Consumo mundial de gas natural por región en billones de metros cúbicos a partir de 1994. Fuente: Tomada del BP Statistical Review of World Energy 2020. ....	66
Figura 3.9 Consumo per cápita de gas natural en 2019. Fuente: Tomada del BP Statistical Review of World Energy 2020.....	67
Figura 3.10 Intercambios comerciales de gas natural en 2019. (Billones de metros cúbicos) Fuente: BP Statistical Review of World Energy 2020.....	69
Figura 3.11 Demanda Nacional Histórica de Gas Natural (MMPCD) Fuente: Tomada de la Secretaría de Energía: Prospectiva de Gas Natural 2018-2032.....	70
Figura 3.12 Producción Nacional Histórica de Gas Natural (MMPCD) Fuente: Tomada de la Secretaría de Energía: Prospectiva de Gas Natural 2018-2032.....	72
Figura 3.13 Producción Nacional Histórica de Gas Natural (MMPCD) Fuente: Tomada de la Secretaría de Energía: Prospectiva de Gas Natural 2018-2032.....	73
Figura 3.14 Actividades principales del Sector Hidrocarburos. Fuente: Elaboración propia .....	74
Figura 3.15 Logotipo institucional de la SENER.....	75
Figura 3.16 Logotipo institucional de la CNH .....	75
Figura 3.17 Logotipo institucional de la CRE.....	76
Figura 3.18 Logotipo institucional de la ASEA.....	76
Figura 3.19 Regulación actual en la cadena de valor del sector hidrocarburos. Fuente: Tomada del material expuesto en Economía y Derecho de la Regulación y Contratos Energéticos impartida en septiembre de 2019.....	77
Figura 3.20 Logotipo institucional del CENAGAS.....	77
Figura 3.21 Cadena de Valor del Sector Hidrocarburos (Parte 1/2) Fuente: Seminario Web: Guía para la Elaboración del Análisis de Riesgo de la ASEA.....	81
Figura 3.22 Cadena de Valor del Sector Hidrocarburos (Parte 2/2) Fuente: Seminario Web: Guía para la Elaboración del Análisis de Riesgo de la ASEA.....	82

Figura 3.23 Marco Regulatorio Vigente para el Transporte por Ducto de Gas Natural. Fuente: Elaboración propia. ....	83
Figura 3.24 Alcance de la norma (ductos terrestres). Fuente: Tomada de la NOM-009-ASEA-2017. ....	85
Figura 3.25 Diagrama de flujo para la Administración de la integridad de ductos. Fuente: Tomada de la NOM-009-ASEA-2017. ....	86
Figura 3.26 Ductos del Sistema de Transporte y Almacenamiento Nacional Integrado de Gas Natural (SISTRANGAS) Fuente: Tomada de SISTRANGAS del sitio web de CENAGAS en <a href="https://boletin-gestor.cenagas.gob.mx/">https://boletin-gestor.cenagas.gob.mx/</a> .....	89
Figura 3.27 Ductos del Sistema Nacional de Gasoductos (SNG). Fuente: Tomada de Descripción General del Sistema Nacional de Gasoductos en <a href="https://www.gob.mx/cenagas/acciones-y-programas/descripcion-general">https://www.gob.mx/cenagas/acciones-y-programas/descripcion-general</a> .....	93
Figura 4.1 Proceso de Análisis de Riesgo para ductos de transporte de gas natural. Fuente: Tomada de la NOM-009-ASEA-2017 .....	97
Figura 4.2 Ruta aproximada de los ductos del Sistema Nacional de Gasoductos (SNG). Tomada de: <a href="https://cartocritica.giscloud.com/">https://cartocritica.giscloud.com/</a> .....	101
Figura 4.3 Error de diseño en la colocación de las bridas bajo un ducto. Fuente: <a href="https://www.steeljrv.com/pipeline-design-errors-and-poor-live-pictures.html">https://www.steeljrv.com/pipeline-design-errors-and-poor-live-pictures.html</a> .....	105
Figura 4.4 Defecto de fábrica de la tubería durante pruebas de presión. Fuente: Tomada de Seminario ROSEN SEMINAR México octubre 2019 Gerencia del Riesgo impartido por P. Guillen.....	106
Figura 4.5 Defecto de construcción en la soldadura de la tubería. Fuente: Tomada de Pictures of Pipeline Material and Construction Quality Issues, PHMSA. Junio 15, 2012. ....	107
Figura 4.6 Tomas ilegales en ductos. Fuente: Tomada de Hot Tapping and Product Theft from Pipelines. A Way to Detect and locate these Spots during Normal operation, Pipeline Technology Journal. Issue 1. P. 26. 2017 <a href="http://www.legaloil.com/Images.asp">www.legaloil.com/Images.asp</a> .....	108
Figura 4.7 Tubería doblada debido a las características del terreno. Fuente: Lee & Fookes QJEG 2016.....	109

Figura 4.8 Tubería expuesta y doblada debido a inundaciones. Fuente: Enbridge Incorporated. Hazardous Liquid Pipeline Rupture and Release. Julio, 2012.....	109
Figura 4.9 Doblez en tubería expuesta a altas presiones y temperaturas Fuente: Tomada de H Saadawi, Upheaval Buckling of Gas Injection Pipelines Onshore Abu Dhabi - A Case Study, Society of Petroleum Engineers Marzo 2001 .....	110
Figura 4.10 Tubería deteriorada por corrosión Fuente: Tomada de <a href="https://www.infocorrosion.com/index.php/infocorrosion-vip/infocorrosion-recomienda/item/1247-la-importancia-de-la-ingenieria-en-corrosion">https://www.infocorrosion.com/index.php/infocorrosion-vip/infocorrosion-recomienda/item/1247-la-importancia-de-la-ingenieria-en-corrosion</a> .....	110
Figura 4.11 Segmento de ducto San Fernando – Los Ramones. Fuente: Elaborado usando Google Maps® a partir de información de <a href="https://www.gob.mx/sener/es/articulos/infraestructura-de-gas-natural-en-mexico">https://www.gob.mx/sener/es/articulos/infraestructura-de-gas-natural-en-mexico</a> .....	113
Figura 4.12 Segmento de ducto San Fernando – Los Ramones (Detalle). Fuente: Elaborado usando Google Maps® a partir de información de <a href="https://www.gob.mx/sener/es/articulos/infraestructura-de-gas-natural-en-mexico">https://www.gob.mx/sener/es/articulos/infraestructura-de-gas-natural-en-mexico</a> .....	114
Figura 4.13 Segmento de ducto San Fernando – Los Ramones (Detalle en Terra Metrics). Fuente: Elaborado usando Google Maps® a partir de información de <a href="https://www.gob.mx/sener/es/articulos/infraestructura-de-gas-natural-en-mexico">https://www.gob.mx/sener/es/articulos/infraestructura-de-gas-natural-en-mexico</a> .....	115
Figura 4.14 Ejemplo de Fuga (Izq.) y Ruptura (Der.). .....	117
Figura 4.15 Inicio del Árbol de Fallas. Fuente: Elaboración propia en <a href="https://www.diagrameditor.com/">https://www.diagrameditor.com/</a> .....	120
Figura 4.16 Árbol de Fallas general para el Análisis de Riesgos. ....	124
Figura 4.17 Densidad poblacional en el caso de estudio en los estados de Tamaulipas y Nuevo León. Fuente: Elaboración propia usando mapas del INEGI en <a href="https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/default.aspx">https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/default.aspx</a> .....	127
Figura 4.18 Árbol de Fallas para el Análisis de Riesgos en el caso de estudio propuesto. ....	130
Figura 4.19 Conversión estructural para el Árbol de Fallas.....	132

Figura 4.20 Red Bayesiana para el Análisis de Riesgos en ductos de transporte de gas natural.....	134
Figura 5.1 Logotipo de BayesFusion, LLC ®.....	143
Figura 5.2 Diagrama para el Nodo A1: “Defectos de Tubería”.....	144
Figura 5.3 Diagrama para el Nodo A2: “Daños por Terceros”.....	145
Figura 5.4 Diagrama para el Nodo A3: “Peligros Naturales”.....	146
Figura 5.5 Mapa de riesgo sísmico en México.....	147
Figura 5.6 Índice de Peligro por Inundación en México.....	148
Figura 5.7 Diagrama para el Nodo A4: “Operaciones Incorrectas”.....	149
Figura 5.8 Diagrama para el Nodo A5: “Corrosión, Erosión y Agrietamiento”.....	150
Figura 5.9 Red Bayesiana para la Frecuencia de Falla para el caso de estudio.	152

## Lista de Ecuaciones

Ecuación 1.1 .....	5
Ecuación 2.1 .....	27
Ecuación 2.2 .....	27
Ecuación 2.3 .....	28
Ecuación 2.4 .....	28
Ecuación 2.5 .....	29
Ecuación 2.6 .....	31
Ecuación 2.7 .....	32
Ecuación 2.8 .....	32
Ecuación 2.9 .....	32
Ecuación 2.10 .....	33
Ecuación 2.11 .....	34
Ecuación 2.12 .....	35
Ecuación 2.13 .....	35
Ecuación 2.14 .....	36
Ecuación 2.15 .....	36
Ecuación 2.16 .....	39
Ecuación 2.17 .....	40
Ecuación 2.18 .....	41
Ecuación 2.19 .....	41
Ecuación 2.20 .....	42
Ecuación 2.21 .....	42
Ecuación 2.22 .....	46
Ecuación 2.23 .....	47
Ecuación 2.24 .....	47
Ecuación 2.25 .....	47
Ecuación 4.1 .....	132
Ecuación 4.2 .....	133

# Introducción

## I. Motivación

A partir de la Reforma Energética de 2013, México ha atravesado una profunda serie de cambios en el sector energético tanto a nivel económico, tecnológico y social. A pesar de las diferencias y controversias a nivel político e ideológico, los gobiernos en México han perseguido un mismo objetivo: el establecimiento de una industria energética eficiente, segura y sustentable para promover el desarrollo nacional.

Para llegar a este objetivo, se ha llevado a cabo una expansión considerable de la infraestructura relacionada con el gas natural en México, principalmente debido a la disminución de producción nacional y al creciente volumen de importaciones realizadas (Balance Nacional de Energía, 2017, pág. 83). Además, dicho estudio indica: “Para poder abastecer las necesidades energéticas internas, se tuvo que recurrir a las importaciones de insumos energéticos, principalmente de gas seco” (Balance Nacional de Energía, 2017, pág. 13). Por esta razón, la infraestructura de transporte de gas natural por medio de ductos es crítica para el funcionamiento y desarrollo del país.

Los ductos de transporte de gas natural trasladan la mayor parte de la energía primaria que se consume en el país, el cual es el principal combustible usado en los centros de transformación, registrando el 81.5% del total utilizado en centrales eléctricas públicas y privadas (Balance Nacional de Energía, 2017, pág. 28).

Sin embargo, México nunca ha tenido la suerte de mantenerse ajeno en el tema de accidentes industriales. A continuación, en la Tabla 1 se enlistan algunos eventos representativos de esta problemática:

Tabla 1. Algunos accidentes en el sector hidrocarburos en México en años recientes<sup>1</sup>

Fecha	Locación	Evento	Consecuencias
<b>19 de noviembre de 1984</b>	San Juan Ixhuatepec, Estado de México	Explosión en cadena en terminal de almacenamiento de Gas L.P.	Entre 500 y 600 muertos, además de 2000 heridos
<b>22 de abril de 1992</b>	Guadalajara, Jalisco	Explosión de gas natural en redes de distribución de la ciudad.	Más de 500 muertos y 7000 heridos
<b>19 de diciembre de 2010</b>	San Martín Texmelucan, Puebla	Explosión por tomas clandestinas de combustible en ductos de petrolíferos.	29 muertos y 52 heridos.
<b>18 de enero de 2019</b>	Tlahuelilpan, Hidalgo	Explosión por tomas clandestinas de combustible en ductos de petrolíferos.	Alrededor de 137 muertos.

Debido a esta creciente demanda por gas natural en el país y a los numerosos accidentes ocurridos, ha sido necesario establecer mecanismos y obligaciones para mantener y asegurar las condiciones de seguridad industrial, operativa y protección al medio ambiente para la prevención de accidentes en ductos, de modo que la industria tenga un desarrollo eficiente y seguro. Una parte fundamental en la prevención de accidentes es el análisis de riesgos, el cual nos indica tanto los peligros potenciales en una instalación como el impacto esperado que pudieran tener dichos peligros. Por esta razón, se plantea realizar para el presente trabajo un análisis de riesgos en una instalación de transporte de gas natural por ducto.

Para el desarrollo de estos análisis de riesgos existen varios métodos convencionales como Árbol de Fallas, Árbol de Eventos, Análisis “Bow-Tie” o Corbata de Moño o Teoría de Conjuntos Difusos. Además, existen algunos métodos relativamente nuevos como Redes de Petri o Redes Bayesianas. (Wu, Zhou, Xu, & Wu, 2017).

<sup>1</sup> Fuente: Elaboración propia a partir de la información de la nota periodística tomada de EFE. (19 de enero de 2019). México recuerda las principales tragedias por explosión. Obtenido de Telemundo Washington: <https://www.telemundowashingtondc.com/noticias/local/principales-tragedias-por-explosion-ocurridas-en-mexico-recuento-gas-pirotecnica-gasolina/471/>

La propuesta de este trabajo tiene como hipótesis central el demostrar la importancia, utilidad y eficiencia del método de redes bayesianas para el análisis cuantitativo de accidentes en la actividad de transporte de gas natural por ductos asociados a la falla de una red o de un tramo de red de ducto de gas natural utilizando la información disponible. Lo anterior debido a la practicidad del método en condiciones de poca información, la flexibilidad del modelo para ser actualizado a medida que nueva información se va incorporando y por el nivel de detalle que brinda sobre la dependencia condicional de los eventos en la evolución de un accidente.

El presente trabajo tiene como objetivo principal realizar un análisis cualitativo y cuantitativo de los riesgos, peligros e impactos asociados a la actividad de transporte de gas natural por ducto mediante el método de redes bayesianas para un caso específico de aplicación. Como objetivos específicos se plantean:

- Identificar los peligros, riesgos e impactos asociados a la actividad de transporte de gas natural por ducto.
- Implementar y demostrar la utilidad del método de Redes Bayesianas para el análisis de riesgos.

## **II. Estructura del Trabajo**

El presente trabajo se divide en 5 capítulos organizados de la siguiente forma. El primer capítulo presenta el estado del arte relativo a los análisis de riesgos, metodologías de análisis e identificación de peligros que se utilizan actualmente, así como el marco teórico bajo el cual se rige la filosofía de seguridad industrial y operativa en el sector hidrocarburos en México. Para el segundo capítulo se realizará una revisión extensiva de los fundamentos teóricos por los cuales se construyen y son aplicables las redes bayesianas al problema en cuestión, así como las ventajas y consideraciones que se deben tener en cuenta para desarrollar correctamente el método. En el tercer capítulo se abordará una introducción al gas natural como recurso energético, su importancia en México, la infraestructura existente en el país para el transporte de este hidrocarburo y la regulación vigente aplicable en materia de seguridad industrial. En el cuarto capítulo se desarrollará un Árbol de Fallas y posteriormente, la Red Bayesiana para el análisis de riesgos en un caso específico de aplicación de un tramo representativo de la red de transporte de gas natural. En el quinto capítulo se cuantificará, analizará y discutirá los resultados de la Red Bayesiana propuesta, así como las consideraciones e impactos esperados. Finalmente, se desarrollarán las conclusiones de este trabajo.

## Capítulo 1. Estado del Arte

El avance de la tecnología y la industria a lo largo de la historia de la humanidad ha significado un gran progreso para la calidad de vida del hombre. Sin embargo, no ha sido un camino sencillo de recorrer, ya que con el desarrollo de instalaciones industriales cada vez más complejas y elaboradas, se ha propiciado la aparición de nuevos riesgos, así como el aumento de los riesgos y peligros ya existentes asociados al desarrollo de cada actividad.

De acuerdo con el informe *100 Largest Losses in the Hydrocarbon Industry 1974-2019*, a partir de 1974, se han reportado pérdidas de más de \$43 mil millones de dólares por accidentes tan solo en la industria de hidrocarburos. Estos accidentes involucran la operación de refinerías, procesamiento de gas, extracción, petroquímicos y distribución. Los factores que llevaron a dichos accidentes son variados, pero en general, existe un consenso sobre una reducción generalizada de los estándares de ingeniería en favor de una regulación más ligera para las empresas y el declive progresivo de la infraestructura e instalaciones del sector, muchas de las cuales ya llegan a los 30 años de existencia. (Marsh & McLennan Companies, 2020)

En México, la autoridad en materia de seguridad industrial y operativa para el sector hidrocarburos es la Agencia Nacional de Seguridad Industrial y de Protección al Medio Ambiente del Sector Hidrocarburos, también conocida como Agencia de Seguridad, Energía y Ambiente (ASEA), es un órgano desconcentrado de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

Por estas razones, la prevención de accidentes sigue siendo un tema de gran importancia dentro del sector industrial y en específico del sector hidrocarburos, por lo que en este capítulo se abordará sobre el conocimiento actual relativo a los análisis de riesgos, así como las herramientas que nos permiten conocer estos riesgos y apoyar en la toma de decisiones.

## 1.1 Definición de Riesgo

Las definiciones de riesgo para el sector industrial son variadas: “situación que puede conducir a una consecuencia negativa no deseada en un acontecimiento”, “probabilidad de que suceda un determinado peligro potencial”, o “consecuencias no deseadas de una actividad dada, en relación con la probabilidad de que ocurra” (Casal, Montiel, Planas, & Vélchez, 1998).

Otra definición más detallada para el riesgo es la siguiente: El riesgo es un conjunto de escenarios a los cuales se les asocia una probabilidad de ocurrencia y una consecuencia asociada. Además, llaman frecuencia a la probabilidad de que suceda un evento en específico. (Kaplan & Garrick, 1981).

En general, el consenso es que el riesgo es la frecuencia prevista de un determinado suceso multiplicado por el impacto de las consecuencias probables (Arendt & Lorenzo, 2000), es decir:

$$\text{Riesgo} = (\text{Frecuencia})(\text{Consecuencia}) \quad (1.1)$$

Esta definición resulta útil para poder realizar un análisis cuantitativo a partir de una medición probabilística de la frecuencia de un suceso y el impacto, ya sea en vidas, accidentes o pérdidas monetarias esperadas de dicho evento indeseable.

Además, de esta definición se desprende la noción de que el riesgo se incrementa cuando aumenta la frecuencia de la actividad o cuando la magnitud del impacto potencial (las consecuencias del evento) aumentan.

De acuerdo con la normativa mexicana el riesgo se define como: “La probabilidad de ocurrencia de un evento indeseable medido en términos de sus consecuencias en las personas, instalaciones, medio ambiente o la comunidad”.<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> Agencia Nacional de Seguridad Industrial y de Protección al Medio Ambiente del Sector Hidrocarburos. (13 de mayo de 2016). DISPOSICIONES administrativas de carácter general que establecen los Lineamientos para la conformación, implementación y autorización de los Sistemas de Administración de Seguridad Industrial, Seguridad Operativa y Protección al Medio Ambiente aplicables. Ciudad de México, México. Publicado en el Diario Oficial de la Federación.

## 1.2 Análisis de Riesgo

Se le llama Análisis de Riesgo al proceso formal de incrementar el conocimiento del riesgo asociado a una actividad. (Arendt & Lorenzo, 2000)

Adicionalmente el Análisis de Riesgo busca responder las siguientes preguntas:

- I. ¿Qué puede salir mal?
- II. ¿Qué tan probable es que salga mal?
- III. ¿Cuáles son los impactos de que salga mal?

Aunado a esto, existe un proceso subsecuente llamado Evaluación de Riesgo en la cual se responde la siguiente pregunta:

- IV. ¿Son estos riesgos tolerables?

Todo análisis de riesgo se compone de, por lo menos, las siguientes etapas:

- Identificación de Peligros
- Análisis de consecuencias
- Análisis de frecuencia
- Evaluación de riesgos

## 1.3 Identificación de Peligros

### 1.3.1 Definición de Peligro

Arendt & Lorenzo (2000) señalan que el peligro está definido generalmente como “las características inherentes de una sustancia o aquella situación o condición física que tienen potencial para provocar daños a las personas, a las instalaciones o al medio ambiente”. Es importante puntualizar que, contrario al uso popular, riesgo y peligro no hacen referencia a los mismos conceptos. El peligro, al ser inherente a la situación, existe sin importar el contexto; a diferencia del riesgo, el cual es sujeto a ser modificado dependiendo de las decisiones que se tomen para abordarlo, esto es lo que se conoce como Administración del Riesgo.

También es importante destacar que el concepto de peligro no contiene una noción de la probabilidad de ocurrencia ni la medida en la cual puede impactar en las personas, patrimonio o ambiente, simplemente existe la incertidumbre de que un

peligro en específico pueda llevar a consecuencias negativas en caso de suceder (Bedford & Cooke, 2001).

De acuerdo con la normativa mexicana el peligro se define como: “Fuente o situación potencial de daño en términos de lesiones o efectos nocivos para la salud de las personas, daños a la propiedad, daños al entorno del lugar de trabajo, al medio ambiente o una combinación de éstos”.<sup>3</sup>

### **1.3.2 Tipos de peligro**

De acuerdo con la Guía para Elaboración del Análisis de Riesgo (Agencia Nacional de Seguridad Industrial y de Protección al Medio Ambiente del Sector Hidrocarburos, 2018), los peligros se pueden dividir en:

- a) Fenómenos de tipo geológico (terremotos, maremotos, erupciones volcánicas, deslizamientos de tierra, fallas geológicas, derrumbes, entre otros);
- b) Fenómenos de tipo hidrometeorológico (frentes fríos, ciclones tropicales, tormentas tropicales, depresiones tropicales, ondas tropicales, inundaciones pluviales, inundaciones fluviales, marea de tormenta, tormenta de nieve, tormenta de granizo, tormenta eléctrica, sequías, erosión pluvial, mangas de agua, ondas cálidas y heladas, entre otros);
- c) Fenómenos sanitarios (vectores de transmisión de patógenos y parásitos a personal y población; presencia de plagas nocivas en la Instalación, afectación a aire, agua, suelo y alimentos contaminados; entre otros);
- d) Fenómenos socio-organizativos y sus principales manifestaciones (concentración masiva de población, demostraciones de inconformidad social, terrorismo, sabotaje, vandalismo, actos en contra de la seguridad del transporte aéreo, marítimo o terrestre, interrupción o afectación de servicios básicos o de infraestructura estratégica, entre otros), y

---

<sup>3</sup> Agencia Nacional de Seguridad Industrial y de Protección al Medio Ambiente del Sector Hidrocarburos. (13 de mayo de 2016). DISPOSICIONES administrativas de carácter general que establecen los Lineamientos para la conformación, implementación y autorización de los Sistemas de Administración de Seguridad Industrial, Seguridad Operativa y Protección al Medio Ambiente aplicables. Ciudad de México, México. Publicado en el Diario Oficial de la Federación.

- e) Siniestros externos de incidencia directa o indirecta a la Instalación (choque de vehículo con Instalación, choque entre vehículos, choque entre instalaciones móviles, hundimiento de Instalación, choque de Carro tanque, entre otros).

### **1.3.3 Metodología para la Identificación de Peligros**

La identificación de peligros es fundamental para la elaboración del Análisis de Riesgo ya que de ahí parte la estimación cuantitativa de la frecuencia y de las consecuencias de un evento determinado. Algunos de los métodos para identificar los peligros son: Revisiones en la literatura, ¿Qué pasa si?, Listas de Verificación, Auditorías, Análisis de Peligros y Operatividad (*Hazard and Operability Study - HAZOP*), Análisis de Modos de Falla y Efecto (*Failure Modes and Effectivity Analysis - FMEA*), entre otros. (Arendt & Lorenzo, 2000)

Estos métodos requieren en general de la participación de expertos en el tema, así como del personal involucrado en todas las áreas del proyecto lo que resulta en una lista de peligros reales con un potencial significativo de consecuencias para la instalación de la que se trate. Cada método tiene distintos niveles de detalle, así como distintos costos en tiempo y dinero. Dependiendo del proyecto, los requisitos del análisis de riesgo y el tipo de instalación será la selección del método a seguir. El método por utilizar será discutido posteriormente en el presente trabajo.

## **1.4 Análisis de Consecuencias**

Para esta etapa se deben pronosticar, estimar o medir los posibles impactos o consecuencias de los peligros considerados para la instalación o proyecto determinado. De acuerdo con Arendt y Lorenzo (2000), este análisis debe involucrar las siguientes actividades:

- Caracterizar la fuente de liberación de material o energía asociado con el peligro a analizar.
- Medición (a través de experimentación) o estimación (mediante modelos y correlaciones) del acarreo de material o propagación de energía en el ambiente a los sectores de interés del análisis.
- Identificar los efectos del acarreo de material o de la propagación de energía en el sector de interés.

- Cuantificar los daños en la salud, ambientales, de seguridad, o impacto económico en el sector de interés.

Por cuestiones de costos, la experimentación no siempre es un método viable para cuantificar las consecuencias de un evento de falla. Pero existe información histórica sobre las consecuencias de eventos, así como modelos para simular estos eventos.

Los resultados de estos análisis nos brindan información cuantitativa sobre el peligro analizado, por ejemplo, el número de fatalidades en un evento de explosión, la cantidad de contaminantes liberados al medio ambiente, o el número de personas expuestas a un material específico.

## **1.5 Análisis de Frecuencia**

El análisis de frecuencia involucra estimar la probabilidad de ocurrencia de cada uno de los peligros identificados previamente. En general este tipo de estimaciones proviene de comparaciones directas con eventos pasados o extrapolaciones de bases de datos históricas de accidentes (Arendt & Lorenzo, 2000).

Para realizar las estimaciones de eventos poco frecuentes como son los accidentes se deben tomar en cuenta lo siguiente:

- 1) Determinar la combinación de circunstancias y fallos que pueden desencadenar un evento indeseado
- 2) Conocer la información de eventos de falla comunes de acuerdo con la información disponible de la industria.
- 3) Utilizar modelos probabilísticos apropiados para determinar los estimados de frecuencias.

Para realizar estos análisis de frecuencias comúnmente se utilizan métodos como el Árbol de Fallas o el árbol de eventos, los cuales serán abordados posteriormente.

Muchos de estos métodos de análisis y estimaciones de datos tienen un nivel de incertidumbre asociado debido al carácter probabilístico de las suposiciones y consideraciones en el modelo, por lo que es conveniente realizar un análisis de incertidumbre de acuerdo con el modelo seleccionado. Por esta razón, una buena parte de la confiabilidad del método depende del criterio e intuición de los encargados y expertos consultados para realizar el análisis.

Además de esto, es importante mencionar que el nivel de esfuerzo del análisis de frecuencias deberá corresponder a la complejidad del sistema o proceso a ser analizado y el nivel de detalle requerido por el análisis de riesgo.

## 1.6 Evaluación de Riesgos

Una vez que se tienen los estimados de frecuencia y consecuencias, el riesgo puede ser evaluado de diversas formas, de acuerdo con las necesidades respectivas de cada proyecto. La manera más sencilla de saber el nivel de riesgo de cada peligro identificado simplemente resulta de la multiplicación de la frecuencia por las consecuencias de cada evento determinado.

Como resultado de esta evaluación se obtiene un perfil del riesgo o una representación conjunta del riesgo total de la instalación. Este perfil de riesgos nos permite obtener lo siguiente:

- La probabilidad de ocurrencia para cada uno de los peligros individuales y combinados, así como las consecuencias asociadas;
- La jerarquización y priorización de los niveles de riesgo;
- Los métodos de administración del riesgo (Prevención, mitigación, transferencia, control o aceptación del riesgo), y
- El o los eventos que producen mayor impacto potencial y su mayor radio de afectación.

De acuerdo con la Guía para la Elaboración del Análisis de Riesgo (ASEA, 2017) para realizar la jerarquización y priorización de riesgos se aconseja utilizar una matriz de riesgo en conjunto con el criterio *ALARP* (del acrónimo en inglés “As Low As Reasonably Practicable”), el cual es un concepto que significa que el riesgo debe ser reducido a niveles tan bajos como razonablemente posibles. Este principio fue introducido en la *Health and Safety Act* del Reino Unido en 1974 y busca ponderar los niveles de riesgos para que los recursos dedicados a mitigar, prevenir o controlar un determinado riesgo sean utilizados de la manera más eficiente posible.<sup>4</sup> En la siguiente figura se presenta el criterio *ALARP* de manera gráfica:

---

<sup>4</sup> Health and Safety Executive. (s. f.). Recuperado 24 de mayo de 2020, de <https://www.hse.gov.uk/risk/theory/alarplance.htm>

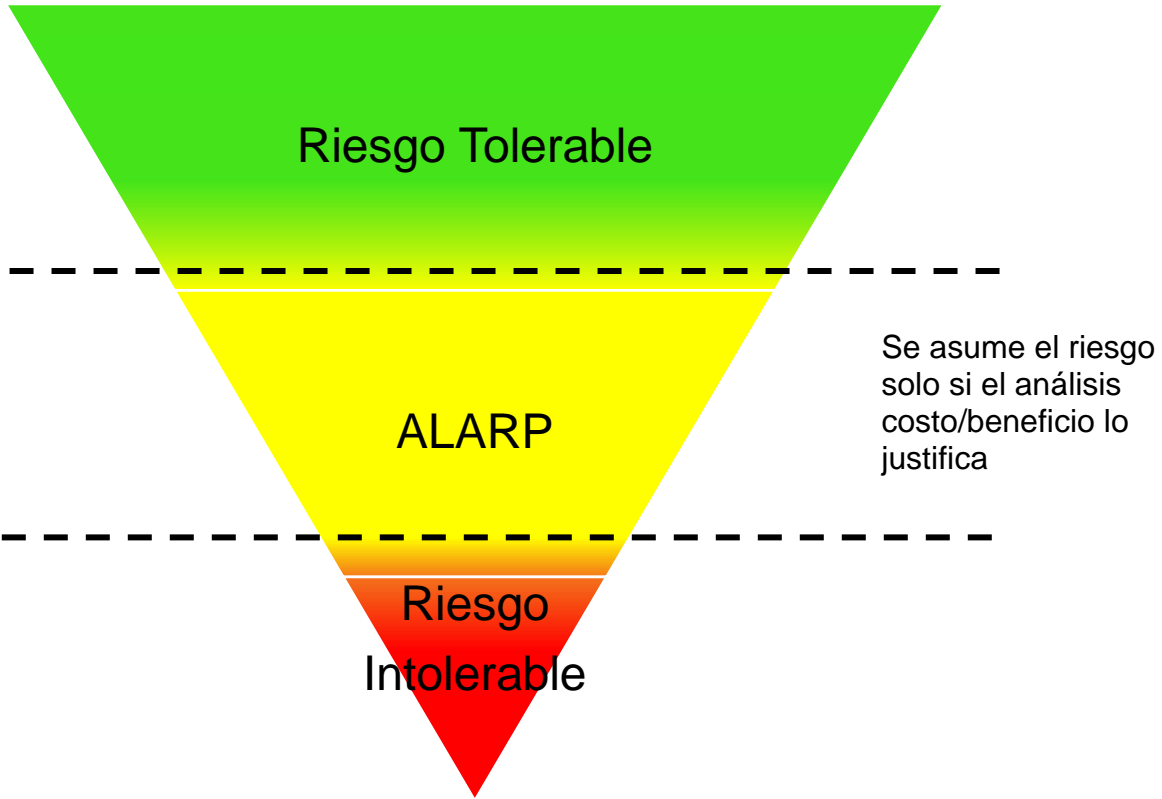


Figura 1.1 Diagrama ALARP. Fuente: Elaboración propia a partir de la información de <https://www.ioshmagazine.com/2016/01/10/alarp>

Una vez que se conoce este criterio, se trasladan los riesgos identificados a una matriz de riesgos dependiendo de la frecuencia y consecuencias identificadas del escenario de riesgo. Por lo que se pondera una calificación tanto para la frecuencia del evento como para las consecuencias de dicho evento, como se muestra en las Tablas 2 y 3:

Tabla 2. Ejemplo de Criterios de Frecuencia de Falla<sup>5</sup>

Descripción de la Probabilidad de falla		Categoría
Probabilidad de falla	Descripción	
Muy Alto	La falla ocurre una vez al año	5
Alto	La falla ocurre en un periodo de 1 a 3 años	4
Medio	La falla ocurre en un periodo de 3 a 5 años	3
Bajo	La falla ocurre en un periodo de 5 a 10 años	2
Muy bajo	La falla no ha ocurrido o se espera que falle > 10 años	1

<sup>5</sup> Fuente: Tabla tomada del Apéndice B de la Norma Oficial Mexicana, NOM-009-ASEA-2017, Administración de la integridad de ductos de recolección, transporte y distribución de hidrocarburos, petrolíferos y petroquímicos.

Tabla 3. Ejemplo de Criterios de Consecuencia de Falla<sup>6</sup>

Categoría de las consecuencias de falla	Aumento de las consecuencias de falla				
	A	B	C	D	E
Personas	Sin lesiones	Lesión grave, con incapacidad médica	De 1 a 2 fatalidades	De 3 a 9 fatalidades	> 10 fatalidades
Medio Ambiente	Insignificante (No hay fuga o derrame)	Leve / Efecto menor (Fuga o derrame que se puede controlar en algunas horas)	Efecto local (Fuga o derrame que se puede controlar en un día)	Efecto significativo (Fuga o derrame que se puede controlar en una semana)	Efecto masivo (Fuga o derrame que no se puede controlar en una semana)
Financiero (millones de dólares)	< 0.01	0.01 a 0.1	0.1 a 1	1 a 10	> 10

Una vez que se han definido estos criterios, se identifican en la matriz de riesgo para ubicarlos respecto al criterio ALARP de la siguiente manera, relacionando la frecuencia de cada evento con sus consecuencias esperadas de acuerdo con la Tabla 4:

Tabla 4. Matriz de Riesgo. Fuente: Elaboración propia a partir de información la NOM-009-ASEA-2017.

Consecuencias de falla	Frecuencia de falla				
	1	2	3	4	5
E	A	A	A	A	A
D	B	B	A	A	A
C	B	B	B	A	A
B	C	C	C	A	A
A	C	C	C	A	A

Finalmente se clasifica cada escenario de riesgo de acuerdo con lo indicado en la Tabla 5:

<sup>6</sup> Fuente: Tabla tomada del Apéndice B de la Norma Oficial Mexicana, NOM-009-ASEA-2017, Administración de la integridad de ductos de recolección, transporte y distribución de hidrocarburos, petrolíferos y petroquímicos

Tabla 5. Regiones de Riesgo. Fuente: Elaboración propia a partir de información la NOM-009-ASEA-2017.

Categoría	Nivel de Riesgo	Acciones requeridas
<b>A</b>	<b>Alto</b>	Ejecución de acciones de prevención y/o Mitigación inmediatas
<b>B</b>	<b>Medio</b>	Aceptable, siempre y cuando éste cuente con las acciones para la prevención y/o mitigación.
<b>C</b>	<b>Bajo</b>	Asegurar las acciones de prevención y/o mitigación de aquellos factores que pueden incrementar el nivel de Riesgo.

Para concluir este apartado, se presenta un diagrama resumen sobre el método general para realizar Análisis de Riesgo.

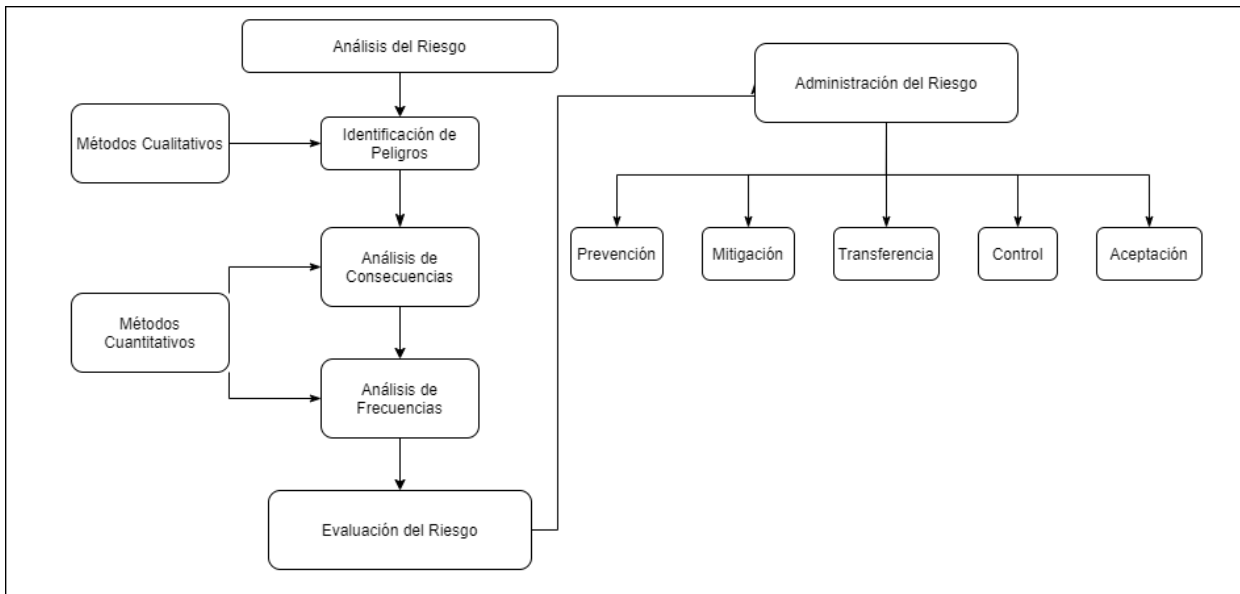


Figura 1.2 Resumen del Proceso de Análisis de Riesgo. Fuente: Elaboración propia

Actualmente esta es una perspectiva general de la metodología básica recomendada por la ASEA para realizar un Análisis de Riesgos; sin embargo, existen varios métodos alternativos con sus propias ventajas y desventajas que serán presentados a continuación.

## 1.7 Otros métodos convencionales para el Análisis de Riesgo

Las metodologías para el Análisis de Riesgo varían por una multitud de factores, desde el tipo y tamaño de la industria hasta las sustancias que se utilizan en cada una. Debido a esto, el grado de complejidad del análisis es tan grande como las necesidades lo requieran, por lo que existen análisis muy sencillos y superficiales, hasta análisis cuantitativos con extensa documentación.

Incluso cada peligro identificado puede requerir un método distinto dependiendo del tipo de instalación que se trata, por ejemplo, un equipo industrial o una estación de trabajo en una oficina.

Por esta razón se han desarrollado una amplia variedad de métodos, de los cuales se puede seleccionar de acuerdo con su alcance, naturaleza y tamaño del proyecto que se adapte a las necesidades en cuanto a costos, tiempo y disponibilidad de datos.

Estos métodos pueden ser cualitativos si solo se enfocan en la identificación de escenarios de riesgo sin involucrar aproximaciones numéricas de su frecuencia o de sus consecuencias. Por otro lado, pueden ser cuantitativos cuando a cada escenario de riesgo se modela con una frecuencia y consecuencia estimada para obtener datos sobre sus niveles de riesgo.

A continuación, se muestra en la Tabla 6 algunos métodos comunes en la industria, su ámbito de aplicación y ejemplos de aplicación para determinar el riesgo:

*Tabla 6. Metodologías para el Análisis de Riesgo. Fuente: Elaboración propia a partir de información del Seminario Web Guía para la Elaboración del Riesgo del Sector Hidrocarburos.*

	<b>Método</b>	<b>Ámbito de Aplicación</b>	<b>Ejemplos</b>
1	<b>Actividad Predicción Peligro (APP)</b>	Actividades rutinarias de bajo o nulo riesgo (Mantenimiento, Operación, Seguridad, entre otros)	•Cualquier actividad que no sea parte de un procedimiento crítico o esté involucrado en la preservación de la vida
2	<b>Inspección Preventiva de Riesgos (IPR)</b>		
3	<b>Análisis de Seguridad en el Trabajo (AST)</b>	Actividades críticas, especiales o no rutinarias.	•Trabajos en espacios confinados •Trabajos en caliente

Método	Ámbito de Aplicación	Ejemplos
4 <b>Lista de Verificación (Checklist)</b>	<p>Actividades que no cuentan con procedimientos específicos.</p> <hr/> <p>Inspección de autotanques y carrotanques.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Trabajos en alturas</li> <li>•Apertura y cierre de bridas</li> <li>•Libranzas eléctricas</li> <li>•Intervenciones de líneas de desfogue de fluidos peligrosos</li> <li>•Trabajos en áreas compartidas</li> <li>•Trabajos multidisciplinarios</li> </ul>
5 <b>¿Qué pasa si? (What If?)</b>	<p>Nuevos equipos</p> <p>Procesos por lotes o continuos con monitoreo o instrumentación local</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Sistemas que integran al proceso principal y que no cuentan con una instrumentación de control</li> <li>•Sistemas de servicios auxiliares (agua, aire, vapor, nitrógeno, etc.)</li> <li>•Equipos de proceso sin instrumentación a través de control distribuido</li> </ul>
6 <b>Análisis de Peligros y Operatividad (HAZOP)</b>	<p>Nuevos equipos</p> <p>Procesos continuos o intermitentes con instrumentación a través de control distribuido</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Secciones de proceso o equipos de proceso con instrumentación de control distribuido</li> <li>•Cambios a las condiciones o parámetros de diseño originales de un proceso</li> <li>•Adición de equipos principales</li> <li>•Cambios en las especificaciones de materiales</li> <li>•Cambios de puntos de ajuste del proceso</li> <li>•Cambios en los sistemas de control distribuido</li> <li>•Cambios de materias primas</li> </ul>
7 <b>Análisis de Árbol de Fallas (AAF)</b>	<p>Modificaciones o instalación de nuevos sistemas o plantas con instrumentación compleja</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Sistemas o equipos de proceso altamente instrumentados</li> <li>•Sistemas de válvulas de aislamiento de actuación remota</li> <li>•Sistemas de regeneración con sistemas de válvulas automáticas e instrumentación secuencial.</li> </ul>

	<b>Método</b>	<b>Ámbito de Aplicación</b>	<b>Ejemplos</b>
8	<b>Análisis de Árbol de Eventos (AAE)</b>	Procesos extremadamente peligrosos con una alta probabilidad de falla ( $10^{-2}$ - $10^{-3}$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Sistemas o plantas de alquilación</li> <li>•Sistemas de almacenamiento de materiales y sustancias peligrosas</li> </ul>
9	<b>Análisis de Modos de Falla y Efecto (FMEA)</b>	Equipo crítico que requiere alta confiabilidad en donde las fallas del sistema son inaceptables	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Sistemas de control distribuido nuevos</li> <li>•Instalaciones aledañas a asentamientos humanos</li> </ul>
10	<b>Análisis de Capas de Protección (LOPA)</b>	Decisión sobre las capas de protección que se instalaran durante el diseño del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Diseño de procesos, control básico, alarmas, intervención del operador, protecciones físicas, barreras contra incendios, protocolos de respuesta a emergencias, etc.</li> </ul>

Gracias a estas metodologías existe una gran variedad de opciones adaptables a diversas situaciones e instalaciones. Sin embargo, el procedimiento y resultados generales están enfocados al mismo objetivo, la identificación cualitativa y cuantitativa de riesgos y peligros para la prevención de accidentes.

A pesar de la gran variedad de métodos existentes, en general estas técnicas convencionales presentan varias desventajas (Martins, Schleder, & Droguett, 2014):

- Solo permite utilizar variables discretas o binarias.
- No permite modelar variables continuas o de estados múltiples.
- No permite representar la dependencia condicional entre los eventos y variables.
- Son modelos estáticos.
- No permiten incorporar incertidumbres en el modelo

Por esta razón, se han tenido que modernizar dichos métodos, lo que se presentará a continuación.

## 1.8 Métodos no convencionales para el Análisis de Riesgo

Entre los métodos que se han implementado recientemente para el Análisis de Riesgo se encuentran los siguientes:

- Análisis de Riesgo a partir de Conjuntos Difusos (Fuzzy Set Risk Analysis):

La lógica difusa es un tipo de lógica usada en sistemas expertos y otras aplicaciones de inteligencia artificial en los cuales las variables tienen grados de verdad o falsedad representados por un rango de valores entre 0 y 1. Con la lógica difusa, el resultado de un evento puede ser expresado como una probabilidad en lugar de una certeza. Por ejemplo, en lugar de tener valores de verdadero o falso, se tienen resultados como: probablemente verdadero, posiblemente verdadero, posiblemente falso y probablemente falso. (Zadeh, 2009)

Este método permite utilizar variables continuas, además de poderse implementar un modelo dinámico, pero tiene algunas restricciones. No es sencillo de plantear y depende en gran parte de la experiencia profesional e ingenieril del investigador, además de que puede llevar a errores importantes en algunos casos específicos. (Wu, Zhou, Xu, & Wu, 2017)

- Análisis de Riesgo a partir de Redes Bayesianas:

Una red bayesiana, también llamada Red de Creencias, es una representación gráfica para modelar las dependencias condicionales en las variables aleatorias de un proceso. Es una combinación del método gráfico y de la probabilidad bayesiana. Se conforma por varios nodos y vértices los cuales reflejan la información de las relaciones causa y efecto de un evento específico en un diagrama acíclico.

Este método presenta varias ventajas debido a que puede integrar cualitativa y cuantitativamente toda la información de distintas fuentes, además se puede integrar el concepto de incertidumbre utilizando variables continuas o multi estado por lo que se ha convertido en una herramienta popular para este tipo de Análisis de Riesgos. (Wu, Zhou, Xu, & Wu, 2017)

## 1.9 Regulación del Riesgo Industrial

### 1.9.1 ¿Por qué realizar Análisis de Riesgo?

La necesidad de realizar análisis de riesgo surge a partir de la necesidad humana de prevenir desastres causados por la actividad humana en todo tipo de instalaciones de la industria dedicada al almacenamiento, transformación y transporte de productos con alto potencial peligroso.

Entre algunos desastres importantes en el sector industrial se encuentran los siguientes (Contreras, 2020):

- Flixbourogh (Inglaterra, 1974): Una explosión en la planta de Nypro UK de producción de caprolactama (Compuesto requerido para la producción de Nylon) deja a 28 personas muertas, 36 heridos graves y daños por 639,000 dólares además de 2,000 casas y comercios en un radio de 12 km.
- Seveso (Italia, 1976): Fuga de sustancias tóxicas (TCP, sosa caustica, etilenglicol, xileno, etc.) por la apertura incorrecta de un disco de ruptura en un reactor, lo que expuso a más de 17,000 habitantes de la región de Lombardía produciendo lesiones dérmicas, daños a la agricultura y ganadería. Más de 300 millones de francos suizos ha pagado Roche por compensaciones.
- Three Mile Island (Estados Unidos, 1979) Accidente en la planta nuclear por una fusión parcial del reactor, lo que expuso a unas 25,000 personas a 8 km de la central, de forma inmediata no existieron daños inmediatos, pero existen estudios que muestran un aumento en caso de cáncer y leucemia en las personas involucradas.
- Bhopal (India, 1984): Liberación de una nube altamente tóxica de isocianato de metilo (MIC) por una válvula de alivio al exterior de aproximadamente 26 toneladas. Dicha nube produjo entre 2,500 y 4,000 muertos más 180,000 heridos con síntomas como ceguera, cáncer, tuberculosis, insuficiencia en vías respiratorias, problemas articulares, etc.

Debido a estos y otros accidentes, los Análisis de Riesgos se han constituido en una herramienta de suma importancia a nivel mundial para preservar la integridad de las personas, instalaciones y activos.

### **1.9.2 Regulación del Riesgo Industrial, Operativo y Ambiental en el sector hidrocarburos en México**

La regulación del riesgo industrial en México ha pasado a través de distintas etapas e instituciones y su evolución se ha enfocado tanto en cuestiones de prevención de accidentes como del cuidado del medio ambiente. Si bien este tipo de regulación en México aún se encuentra en desarrollo, ha logrado aprender y adoptar las mejores prácticas internacionales a partir de las experiencias que otros países han tenido a través de la globalización.

En este proceso, se han refinado las normas existentes a medida que el sector se ha vuelto más complejo, convirtiéndose en un trabajo multidisciplinario que involucra un número importante de instituciones del gobierno en materia de salud, higiene laboral, seguridad industrial, seguridad operativa y protección al ambiente

Sin embargo, este largo proceso comenzó en la década de los años sesenta, época en la que se da un importante desarrollo industrial consecuencia de las políticas adoptadas por el gobierno. Dicha situación llevó a la Secretaría de Salubridad y Asistencia a encargarse de regular esta intensa actividad industrial. Esta incipiente regulación consistía en incentivos y multas con el objetivo de generar conciencia en las empresas de las consecuencias de actividades poco seguras o contaminantes. Durante los años setenta iniciarían las labores gubernamentales en regulación y supervisión a cargo también de las Secretarías de Asentamientos Humanos y Obras Públicas y de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.

A partir de 1980 los problemas económicos tanto internos como externos llevaron al país a ignorar en buena parte las regulaciones tanto ambientales como industriales con el pretexto de ser indispensables para la economía nacional, además de esto tanto el sector de hidrocarburos como el eléctrico estaban controlados por Petróleos Mexicanos (Pemex) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE), empresas en poder del Estado y cuya fuerza política menguaba cualquier esfuerzo regulatorio.

Dos accidentes muy importantes fueron consecuencia de lo anterior, las llamadas “Explosiones de San Juanico”, que sucedieron en la terminal de almacenamiento y distribución de gas licuado de petróleo a cargo de Pemex en San Juan Ixhuatepec, Estado de México en 1984 y, la explosión de la red de ductos de distribución en la ciudad de Guadalajara, Jalisco en 1992 con un alto número de fatalidades en ambas y cuantiosas pérdidas económicas.

Estos hechos revelaron la negligencia en el cumplimiento regulatorio y la ausencia de protocolos mínimos de seguridad industrial en el sector hidrocarburos, un sector importante tanto a nivel económico como cultural para el país. A partir de estos eventos, la regulación fue adquiriendo cada vez mayor importancia y las empresas fueron sujetas a mayor escrutinio público.

Para 2006 Pemex había implementado el Sistema Para la Administración Integral de la Seguridad, Salud y Protección Ambiental (SSPA) con el objetivo de establecer protocolos de seguridad de procesos, salud y cuidado del ambiente.

Posteriormente y como consecuencia de la Reforma Energética de 2013, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), la Secretaría de Energía (SENER) y la Comisión Reguladora de Energía (CRE) transferirían sus facultades a una nueva institución, la ASEA para regular todos los aspectos de seguridad industrial, operativa y de protección ambiental del sector hidrocarburos.

A partir de esta Reforma, la estructura institucional del sector energético en la Administración Pública Federal (APF) quedó de la siguiente forma:

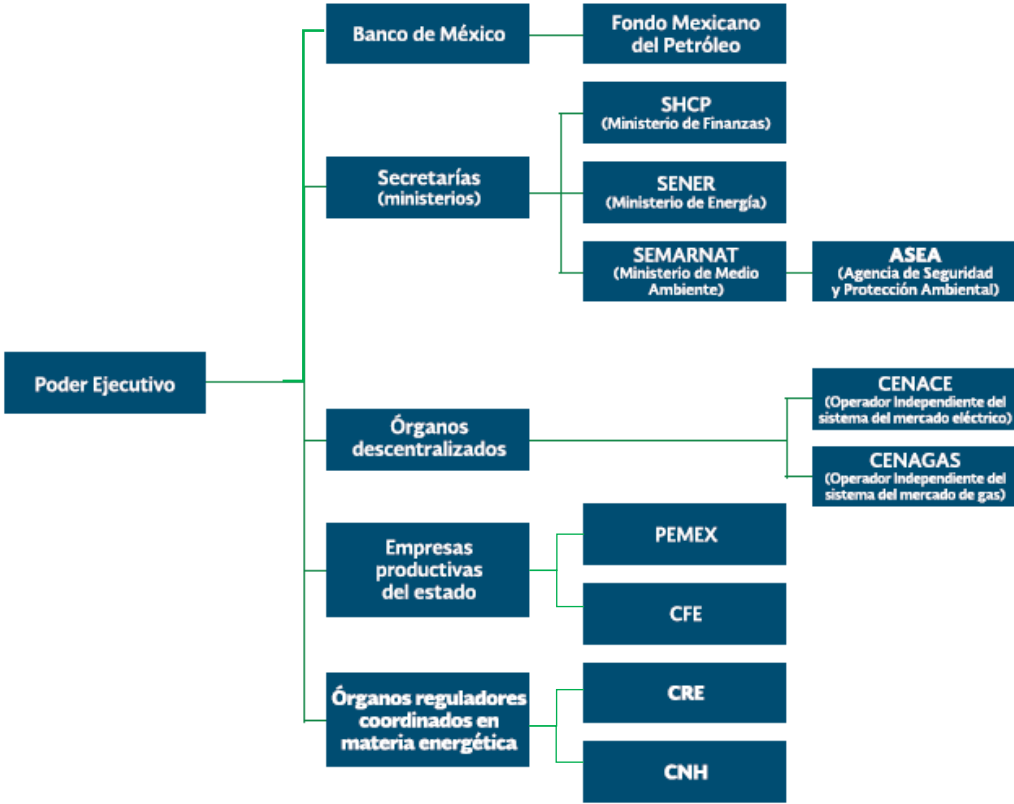


Figura 1.3 Estructura institucional del sector energético en México, posterior a la Reforma Energética de 2013. Fuente: Tomada de ASEA: Un Nuevo Modelo de Institución del Estado Mexicano

De este arreglo institucional, es conveniente definir los siguientes conceptos según lo mencionado en la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal (1976, (Última reforma DOF 20-10-2021)):

- Órganos descentralizados

Los “organismos descentralizados” son entidades paraestatales cuya responsabilidad es hacerse cargo de un área estratégica, un área prioritaria, proporcionar un servicio público o social. Los organismos descentralizados están normados en el artículo 45, donde se establece lo siguiente:

**Artículo 45.-** *Son organismos descentralizados las entidades creadas por ley o decreto del Congreso de la Unión o por decreto del Ejecutivo Federal, con personalidad jurídica y patrimonio propios, cualquiera que sea la estructura legal que adopten.*

En el sector energético estas figuras corresponden al Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), quien se encarga de la operación de los sistemas que conforman el mercado eléctrico, y el Centro Nacional de Control de Gas Natural (CENAGAS), quien se encarga de la operación de la infraestructura de transporte por medio de ductos de gas natural, está última de mayor relevancia para el caso de estudio de este trabajo que será abordado más adelante.

- Órganos desconcentrados

Los “órganos desconcentrados” son entes públicos cuya responsabilidad es aplicar una regulación. Los órganos desconcentrados están normados en el artículo 17, donde se establece lo siguiente:

**Artículo 17.-** *Para la más eficaz atención y eficiente despacho de los asuntos de su competencia, las Secretarías de Estado y los Departamentos Administrativos podrán contar con órganos administrativos desconcentrados que les estarán jerárquicamente subordinados y tendrán facultades específicas para resolver sobre la materia y dentro del ámbito territorial que se determine en cada caso, de conformidad con las disposiciones legales aplicables.*

Además de estos actores, tenemos a las Empresas Productivas del Estado, como Petróleos Mexicanos (PEMEX) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE) que son entidades propiedades del Estado con fines productivos, personalidad jurídica y patrimonio propios y que cuentan con su propio marco jurídico definido en sus respectivas leyes.



*Figura 1.4 Logotipo institucional de PEMEX.*



**Comisión Federal de Electricidad**

*Figura 1.5 Logotipo institucional de CFE*

También en la Ley de los Órganos Reguladores Coordinados en Materia Energética, se definen estos organismos, los cuales gozan de una personalidad jurídica propia y que poseen autonomía técnica y operativa para emitir regulación específica del sector energético, desde contratos de exploración y extracción de hidrocarburos hasta la determinación de precios máximos de venta de combustibles y de energía eléctrica. Estos son la Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH) y la Comisión Reguladora de Energía (CRE). Dichos organismos serán presentados posteriormente en el Capítulo 3 de este trabajo.

Finalmente, existen muchos órganos desconcentrados en la APF; sin embargo y para efectos del presente trabajo, solo se abordarán las atribuciones y obligaciones concernientes a la ASEA en el siguiente apartado por su relevancia en el tema de riesgos en el sector hidrocarburos.

### **1.9.3 Agencia Nacional de Seguridad Industrial y de Protección al Medio Ambiente del Sector Hidrocarburos**

La ASEA es un órgano dependiente de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), bajo la figura de órgano desconcentrado. Por este motivo, encuentra subordinado al sector ambiental del Poder Ejecutivo, a diferencia de los Órganos Reguladores Coordinados en Materia Energética (CRE y CNH), los cuales poseen mayor autonomía técnica y de gestión.

La ASEA es el organismo encargado de supervisar y emitir la regulación en materia de seguridad industrial, operativa y protección ambiental del sector hidrocarburos. Entre sus atribuciones en materia de seguridad industrial y operativa, se encuentra la gestión de los riesgos derivados de las actividades de exploración y producción de petróleo y gas natural, así como las actividades de transporte, distribución y expendio dentro de la misma cadena de valor en el territorio nacional.

Esta entidad tiene a su cargo supervisar y emitir regulación en temas de seguridad industrial y operativa, así como de protección ambiental para alrededor de 9 mil pozos petroleros en tierra, 250 plataformas en el mar, 60 mil kilómetros de ductos, 100 terminales de almacenamiento, 12 mil gasolineras y 4 mil instalaciones de distribución y expendio de gas licuado petróleo. (Elizondo & Dussauge, 2018)

Por estos antecedentes, la regulación que emite la ASEA está basada en la gestión de riesgos, es decir, proveer de las herramientas regulatorias para que cada uno de los regulados (empresas del sector) puedan implementar sus propios mecanismos y metodologías basados en los análisis de riesgos para la prevención de accidentes, cada uno de ellos en sus problemáticas particulares.

Es por esta razón, que el tema abordado en el presente trabajo es de suma relevancia para el sector, al buscar introducir un método relativamente reciente como lo son las Redes Bayesianas y cuyas características le brindan ventajas sobre otros métodos presentados previamente, las cuales serán presentadas en el próximo capítulo.

## Capítulo 2. Redes Bayesianas

Las redes bayesianas constituyen un método relativamente nuevo para la realización de análisis de riesgos, por lo que en el presente capítulo se plantean abordar los antecedentes de las redes bayesianas a partir de la revisión de la probabilidad, como un método para el tratamiento de la incertidumbre, además de hacer un reconocimiento sobre las fuentes de incertidumbre del caso de estudio.

Posteriormente, en el mismo capítulo, se aborda el fundamento teórico de las Redes Bayesianas como un método cualitativo y cuantitativo para el tratamiento de la incertidumbre, partiendo desde las definiciones de probabilidad clásica, hasta la inferencia bayesiana propuesta por Thomas Bayes.

Para finalizar, se revisará la metodología para construir una red bayesiana, así como las ventajas y desventajas que pueden tener frente a la problemática propuesta como un método relevante para realizar Análisis de Riesgos en instalaciones de transporte de gas natural mediante ductos.

### 2.1 Riesgo e Incertidumbre

A lo largo de este trabajo se ha hablado del riesgo y sus características; sin embargo, para continuar, es importante hacer una distinción del significado de incertidumbre, la cual es un concepto central para la metodología que se presentará a lo largo de este capítulo.

Comúnmente no se realizan distinciones entre los términos riesgo e incertidumbre; no obstante, existen diferencias que deben ser entendidas para poder conocer el origen que dio lugar al surgimiento de los distintos métodos para abordar la incertidumbre.

De acuerdo con lo expuesto previamente, el riesgo puede entenderse como una potencial pérdida derivada de la probabilidad de ocurrencia de un evento; por otro lado, la incertidumbre implica la ausencia de certeza sobre las consecuencias de un evento en una situación particular. La incertidumbre se presenta en una variedad de ámbitos y no es posible erradicarla por completo de ninguna situación. A continuación, se presenta en la Tabla 7 un cuadro comparativo sobre las diferentes características del riesgo e incertidumbre.

Tabla 7. Cuadro comparativo Riesgo e Incertidumbre<sup>7</sup>

<b>Característica</b>	<b>Riesgo</b>	<b>Incertidumbre</b>
<b>Significado</b>	Potencial pérdida derivada de la probabilidad de ocurrencia de un evento.	Situación en la que se desconocen los eventos futuros.
<b>Medible</b>	Se puede medir	No se puede medir
<b>Resultados</b>	Conocidos	Desconocidos
<b>Control</b>	Controlable	Incontrolable
<b>Reducible</b>	Reducible	No reducible
<b>Frecuencia</b>	Asignada	No asignada

Como se ha mostrado hasta este punto, existen muchas estrategias para aproximarse, conocer, y gestionar el riesgo; sin embargo, la incertidumbre es un aspecto prevalente para lo cual nunca es claro cómo prepararse por sus características inherentes. Por esta razón, la industria lo que busca es minimizar en la medida de lo posible la incertidumbre relativa a sus actividades y administrar los riesgos que sí puede conocer.

## 2.2 Fuentes de Incertidumbre

Una vez hecha esta distinción, es conveniente saber a qué tipos de incertidumbre se enfrenta la industria de transporte de gas natural por medio de ductos para saber cómo abordarla, qué acciones llevar a cabo para tratarla y de qué forma la metodología propuesta puede ayudar a minimizar esta incertidumbre.

En cuanto a causas se refiere y convenientemente para este caso de estudio, el campo de la seguridad industrial y operativa del transporte de materiales peligrosos, como el gas natural, está rodeado de fuentes de incertidumbre de distintos tipos, algunos ejemplos serían los siguientes:

- Información incompleta: Es común que las bases de datos de accidentes o fallas en el sector de transporte de gas natural no sean de carácter público o sean vagas en la información que reportan, ya sea por motivos de reputación empresarial o por motivos de seguridad nacional. Además de que las bases de datos existentes se enfocan principalmente en accidentes de gran escala,

---

<sup>7</sup> Fuente: Tomado de Surbhi, S. (27 de enero de 2016). *Key Differences: Difference Between Risk and Uncertainty*. Obtenido de Key Differences: <https://keydifferences.com/difference-between-risk-and-uncertainty.html>

abarcan varios países y no solo se dedican a un único sector de la industria química, como la MHIDAS (*Major Hazard Incident Data Service*).

- Información errónea: Otra cuestión importante a considerar son los errores que estas bases de datos presentan, ya que muchas veces los accidentes son cadenas complicadas de eventos, lo cual dificulta hacer una distinción clara entre las causas y efectos del evento.
- Información vaga: Estas bases de datos suelen tener un importante porcentaje de información relativa a las causas que no puede ser clasificada adecuadamente, como las fallas mecánicas, errores humanos, impactos externos o fenómenos naturales que pudieron causar el evento, además de que un evento puede tener múltiples causas que lo ocasionen.
- Eventos no deterministas: En ocasiones, una misma causa puede producir efectos diferentes en sistemas similares sin una explicación aparente, por lo que se debe estar abierto a admitir los efectos de la aleatoriedad y las excepciones.
- Modelos incompletos: Muchos modelos ingenieriles tienen componentes y supuestos subjetivos en su aplicación que no necesariamente toman en cuenta todas las variables externas del ambiente.
- Modelos inexactos: En la modelación de un evento, no siempre es posible tomar en cuenta todos y cada uno de los parámetros existentes en el fenómeno y que el modelo pueda seguir siendo pragmáticamente funcional, lo que nos lleva a que cada modelo tenga una inexactitud asociada.

Por estos motivos podemos afirmar que, para el caso de los accidentes en el sector de transporte de gas natural, no se está exento de estas incertidumbres que dificultan que dicha actividad sea completamente segura. También es importante mencionar que estas incertidumbres no están limitadas a este sector, sino que son aplicables a una gran variedad de campos como la medicina, el derecho, las finanzas, etc.

## **2.3 Probabilidad Clásica**

Para el tratamiento de la incertidumbre mediante métodos cuantitativos, la primera aproximación fue el método probabilista clásico, el cual, a grandes rasgos, busca analizar los posibles resultados de un evento aleatorio y repetible a partir de un conjunto de alternativas relacionadas con dicho evento.

Formalmente, el concepto de probabilidad nos dice que la probabilidad es una medida normalizada positiva en un campo de “mundos posibles” o “posibles estados de la naturaleza” (Bedford & Cooke, 2001). En términos más simples es la asignación de un valor numérico entre 0 y 1 a un evento posible. Estos eventos posibles se representan en lo que se le llama sigma campo ( $\sigma$ ).

El sigma-campo ( $\sigma$ ) es la colección de subconjuntos de un espacio muestral ( $S$ ) que sirve para definir formalmente a la probabilidad. Cada subconjunto en el sigma-campo constituyen los eventos del espacio muestral.

Por ejemplo, siendo el espacio muestral del evento lanzar una moneda.

El sigma-campo es:

$$S = \{cara, cruz\} \tag{2.1}$$

Donde  $S$  es el espacio muestral y los subconjuntos describen los resultados posibles del evento probabilístico.

Para cualquier sigma-campo se deben cumplir las siguientes propiedades:

- a) Si  $E_1, E_2, E_3, \dots, E_n$  es una sucesión de elementos del sigma-campo, entonces la intersección de todos ellos es el conjunto vacío  $\emptyset$ .
- b) Si  $E_1, E_2, E_3, \dots, E_n$  es una sucesión de elementos del sigma-campo, entonces la unión de todos ellos es el conjunto  $S$ , el cual contiene todos los eventos del espacio muestral.
- c) Si existe  $E$  como subconjunto del espacio muestral, también existe el conjunto complemento  $E^c$  como parte del conjunto.

Además, se requiere también de una medida de probabilidad ( $P$ ) la cual es el valor numérico que se asigna a cada subconjunto del espacio muestral definido en el intervalo de  $[0, 1]$ . Hace referencia a la frecuencia promedio con la que aparece un suceso de una selección de eventos aleatorios del espacio muestral.

$$P(A) = \frac{\#(A)}{\#(S)} \tag{2.2}$$

Donde:

$P(A)$ : Probabilidad de ocurrencia del evento  $A$ .

$\#(A)$ : Número de veces que sucede el evento  $A$ .

$\#(S)$ : Número total de eventos del espacio muestral.

Si la medida de probabilidad de un evento es igual a 0, quiere decir que es imposible que ese resultado sea producto del experimento aleatorio; mientras que, si la medida de probabilidad es igual a 1, se dice que es un resultado que sucederá seguramente en el experimento aleatorio.

Los axiomas de Kolmogórov o axiomas básicos de probabilidad fueron formulados por el matemático ruso Andrei Nikolaevich Kolmogórov en 1933 y describen las condiciones mínimas a verificar para que se pueda determinar consistentemente la probabilidad de un conjunto de eventos. Para todo espacio muestral  $S$ ,  $\sigma$  de subconjuntos de  $S$  y una función de probabilidad  $P$  se cumplen los siguientes axiomas:

a) Axioma 1:

$$P(A) \geq 0 \quad \forall A \in S \quad (2.3)$$

Donde:

$P(A)$ : Probabilidad de ocurrencia del evento  $A$ .

$A$ : Evento  $A$ .

$S$ : Espacio muestral.

*La probabilidad del evento  $A$  es mayor o igual a 0 para todo evento  $A$  contenido en el Espacio muestral  $S$ .*

Este axioma indica que la probabilidad de cualquier evento es un número real no negativo y elimina la posibilidad de obtener probabilidades negativas. Refleja el hecho de que la probabilidad más pequeña de un evento tiende a 0.

b) Axioma 2:

$$P(S) = 1 \quad P(\emptyset) = 0 \quad (2.4)$$

Donde:

$P(S)$ : Probabilidad de ocurrencia de los eventos del espacio muestral.

$P(\emptyset)$ : Probabilidad de ocurrencia de los eventos del conjunto vacío.

*La probabilidad del espacio muestral completo es igual a 1 y la probabilidad del conjunto vacío es igual a 0.*

Este axioma representa que la probabilidad de todos los eventos del espacio muestral es igual a la unidad. Se considera que en el espacio muestral están contenidos todos los eventos que tienen una probabilidad de suceder. De forma análoga si se trata de un evento que no está contenido en el espacio muestral, se dice que el evento tiene una probabilidad de 0 de suceder, es decir, un evento imposible.

c) Axioma 3:

$$\text{Si } A_1 \cap A_2 \cap A_3 \cap \dots \cap A_n = \emptyset \rightarrow P(A_1 \cup A_2 \cup A_3 \cup \dots \cup A_n) = \sum_{i=1}^n P(A_i) \quad (2.5)$$

Donde:

$A_1, A_2, A_3 \dots A_n$ : Eventos del espacio muestral.

$\emptyset$ : Conjunto vacío.

$P(A_i)$ : Probabilidad de un evento determinado  $A_i$ .

*Para eventos disjuntos (eventos cuya intersección entre ellos es el vacío), la probabilidad de la unión de esos eventos es la sumatoria de la probabilidad de los eventos individuales.*

Este axioma menciona que para eventos mutuamente excluyentes (que no pueden suceder de forma simultánea) la unión de todos esos eventos es igual a la suma aritmética de la probabilidad asociada de ellos.

Respecto al enfoque clásico Dávila Aragón (2014) afirma:

“Se asume que las estadísticas de la muestra pertenecen a cierta población con una distribución específica, la cual es definida por el conjunto de parámetros con un valor fijo. La tarea para el estadístico es estimar los parámetros lo mejor posible basado en los datos disponibles, y cuando es posible, realizar experimentos varias veces y obtener así una muestra suficientemente grande para asignar valores a estos parámetros.”

La probabilidad clásica, a nivel conceptual, es simple de entender y útil en términos didácticos; sin embargo, tiene considerables limitaciones como la necesidad de realizar experimentos un gran número de veces o la imposibilidad para analizar efectos los cuales no son equitativamente probables de resultar. Estas razones han hecho que esta metodología no sea aplicable para el estudio de eventos más complejos o con mayores consideraciones como el presente caso de estudio.

## **2.4 Probabilidad Bayesiana**

### **2.4.1 Thomas Bayes**

Thomas Bayes, fue un matemático, ministro presbiterano y teólogo nacido en 1702 en Londres, Inglaterra. Es conocido por sus aportaciones a la teoría de la probabilidad, donde investigó el problema de la determinación de la probabilidad de las causas a través de los efectos observados, lo que después sería conocido como el Teorema de Bayes. También es conocido por haber realizado extensos trabajos en matemáticas, incluyendo trigonometría, geometría, series numéricas y cálculo diferencial.

Fue elegido miembro de la *Royal Society* de Londres en 1742, a pesar de no contar con trabajos publicados debido al respeto que ostentaba como un matemático destacado de su época. Murió en 1761 en Kent, Inglaterra retirado de su puesto como ministro.

Fue hasta 1764 cuando un amigo suyo, Richard Price, envió póstumamente el trabajo titulado *Essay Towards Solving a Problem in the Doctrine of Chances* a la *Royal Society* de Londres donde Bayes aborda el problema de las causas a través de los efectos observados, y donde se nombra el teorema que lleva su nombre. Este trabajo es la base de la probabilidad bayesiana, la cual busca calcular la validez de una proposición mediante la estimación de una probabilidad previa y la evidencia en torno a esta proposición.

Bayes fue el primero en utilizar la probabilidad inductivamente y establecer una base matemática para la inferencia probabilística. Por estas razones y en reconocimiento al importante trabajo que realizó en el campo de la probabilidad, su tumba fue restaurada en 2007.

### 2.4.2 Teorema de Bayes

Como se explicó anteriormente, el enfoque clásico de la probabilidad establece sentencias como la siguiente: “la probabilidad de que suceda el evento  $A$  es  $x$ ” denotada por  $P(A) = x$ . Esto significa que, no importa en qué contexto ni qué otros eventos sucedan en torno a que se desarrolle el evento  $A$ , la probabilidad de que suceda dicho evento siempre es igual a  $x$ , es decir, una *probabilidad incondicional*.

En aplicaciones distintas a los juegos de azar u otras situaciones esto no sucede, intuitivamente sabemos que una gran cantidad de fenómenos suceden como consecuencia de algún otro evento o eventos externos que influyen o propician la ocurrencia de estos. Thomas Bayes abordó esta problemática mediante el teorema de Bayes, en el cual se establece la probabilidad condicional de un evento como consecuencia de otro.

De acuerdo con Dávila, Ortiz y Cruz (2016), para poder manipular las probabilidades de estos eventos, conviene tratarlas como funciones de variables mediante las reglas del cálculo de probabilidades. La regla fundamental del cálculo de probabilidades y piedra angular en la estadística bayesiana es el teorema de probabilidad condicional de los eventos  $A$  y  $B$ :

$$P(A \cap B) = P(A|B) P(B) \quad (2.6)$$

Donde:

$P(A \cap B)$ : Probabilidad de ocurrencia de los eventos  $A$  y  $B$ .

$P(A|B)$ : Probabilidad de ocurrencia del evento  $A$  dado que el evento  $B$  sucedió.

$P(B)$ : Probabilidad de ocurrencia del evento  $B$ .

La probabilidad condicional se interpreta como una situación particular dentro de la probabilidad, entendiéndose que “si  $B$  es verdadero, entonces  $A$  tiene una probabilidad de ser verdadero dado que el evento  $B$  sucedió.

Dado que la función  $P(A \cap B)$  es simétrica, el teorema se puede expresar de la siguiente manera:

$$P(A \cap B) = P(B|A) P(A) \quad (2.7)$$

Donde:

$P(A \cap B)$ : Probabilidad de ocurrencia de los eventos A y B.

$P(B|A)$ : Probabilidad de ocurrencia del evento B dado que el evento A sucedió.

$P(A)$ : Probabilidad de ocurrencia del evento A.

Igualando ambas ecuaciones y despejando  $P(B|A)$ , se obtiene el teorema de Bayes:

$$P(B|A) = \frac{P(A|B)P(B)}{P(A)} \quad (2.8)$$

El teorema anterior denota lo siguiente: la probabilidad *a posteriori*  $P(B|A)$  es igual a la probabilidad *a priori*  $P(B)$  multiplicada por la razón  $\frac{P(A|B)}{P(A)}$ ; es decir, la información previa acerca de B puede ser utilizada para revisar la probabilidad de B.

En otras palabras, este teorema nos ayuda a extraer información sobre la probabilidad de ciertos eventos previos (causas) al observar otros eventos (consecuencias). La explicación es la siguiente:

Suponiendo que  $E_1, E_2, E_3 \dots E_n$  son una colección completamente de eventos mutuamente excluyentes que pertenecen al espacio muestral S, entonces:

$$E_i \cap E_j = \emptyset \text{ para } i \neq j \quad \bigcup_{i=1}^n E = S \quad (2.9)$$

Donde:

$E_i$ : Evento subíndice i.

$E_j$ : Evento subíndice j.

E: Conjunto de eventos de E.

S: Espacio muestral.

Se conocen las probabilidades de  $P(E_i)$ , pero no tenemos información directa sobre otros eventos. Sin embargo, existe otra familia completa de eventos mutuamente excluyentes  $A_1, A_2, A_3 \dots A_n$  relacionada con los eventos  $E_i$ . Conocemos las

probabilidades condicionales  $P(A_j|E_i)$ , además podemos observar cuando ocurren los eventos  $A_j$ . Entonces el teorema de Bayes nos permite conocer las probabilidades inversas de ocurrencia:

$$P(E_i|A_j) = \frac{P(A_j|E_i)P(E_i)}{\sum_{k=1}^m P(A_j|E_k)P(E_k)} \quad (2.10)$$

Donde:

$P(E_i|A_j)$ : Probabilidad de ocurrencia del evento  $E_i$  dado que el evento  $A_j$  sucedió.

$P(A_j|E_i)$ : Probabilidad de ocurrencia del evento  $A_j$  dado que el evento  $E_i$  sucedió.

$P(E_i)$ : Probabilidad de ocurrencia del evento  $E_i$ .

$P(A_j|E_k)$ : Probabilidad de ocurrencia del evento  $A_j$  dado que el evento  $E_k$  sucedió.

La Ecuación 2.10 es una generalización para el teorema de Bayes.

La utilidad de esto radica en que los estadísticos bayesianos permiten a los parámetros ser variables aleatorias. Las afirmaciones hechas sobre las características de una población son necesariamente dependientes no sólo de las observaciones empíricas de los datos (información objetiva), sino de también cualquier conocimiento disponible para el estadístico previo al inicio de las observaciones (información subjetiva). Este conocimiento puede venir en forma de datos de un lugar diferente y se considera que tiene un cierto grado de relevancia para la población observada. También puede venir de información obtenida de partes interesadas y expertos, es decir, cuya familiaridad con el tema los hace una fuente creíble. (Dávila Aragón, Uso de Redes Bayesianas para medir el Riesgo Operacional, un caso de aplicación (Tesis Doctoral), 2014).

## 2.5 Inferencia usando el Teorema de Bayes

La inferencia, entendida como el proceso por el cual se obtienen conclusiones a partir de una serie de premisas, es uno de los puntos centrales de aplicación en la estadística cuyo problema central es encontrar la distribución de probabilidad de un fenómeno observado.

El fundamento principal de la inferencia estadística reside en el principio de verosimilitud. Para comprender el principio de verosimilitud, se debe entender primero la noción de *suficiencia*. De forma intuitiva, dada una distribución

probabilística con parámetro  $\theta$ , un estadístico *suficiente* contiene toda la información que los datos pueden decir sobre  $\theta$ .

Si  $X$  está distribuido con una función de densidad  $f(x|\theta)$ , una función  $P$  de  $X$  (llamado estadístico) es suficiente si la distribución de  $X$  condicional en  $P(X)$  no depende de  $\theta$ . (Bedford & Cooke, 2001) En otras palabras, el principio de suficiencia indica que cuando dos observaciones llevan al mismo valor de un estadístico suficiente, entonces estos deben llevar a la misma inferencia en  $\theta$ .

Otro aspecto para tomar en cuenta es el principio de condicionalidad. Este dice que si dos experimentos  $E_1$  y  $E_2$  están disponibles para aportar información sobre el parámetro  $\theta$ , y si el experimento se escoge de manera aleatoria, la inferencia sobre  $\theta$  dependerá solo del experimento seleccionado y no de aquel que no fue seleccionado.

Birnbaum demostró que el principio de suficiencia y el principio de condicionalidad juntos implican el principio de verosimilitud. (Birnbaum, 1962)

El principio de verosimilitud establece que la información obtenida de una distribución de probabilidad  $\theta$  a partir de una observación  $X$  está contenida por completo en una función de verosimilitud  $L(\theta|X)$ , además si  $X_1$  y  $X_2$  son dos observaciones dependientes del parámetro  $\theta$  y existe una constante  $c$  tal que:

$$L(\theta|X_1) = cL(\theta|X_2) \quad (2.11)$$

Donde:

$L(\theta|X_1)$ : Función de verosimilitud de  $\theta$  tal que  $X_1$ .

$L(\theta|X_2)$ : Función de verosimilitud de  $\theta$  tal que  $X_2$ .

$c$ : Constante.

Entonces para todo parámetro  $\theta$  las variables  $X_1$  y  $X_2$  proporcionan la misma información sobre  $\theta$  y resultan en las mismas inferencias.

Una vez que se conoce el tipo de incertidumbre a modelar para el caso de estudio se puede seleccionar una distribución de probabilidad  $\theta$ . Esta distribución *a priori* contiene toda la información y conocimiento sobre el fenómeno o caso de estudio propuesto. Posteriormente, al usar el teorema de Bayes se puede combinar la distribución *a priori* con los resultados de experimentos y una función de verosimilitud para obtener la distribución *a posteriori*. El teorema de Bayes es la forma matemática correcta para realizar deducciones con base en este enfoque.

De acuerdo con Dávila Aragón (2014), para poder realizar inferencias, el teorema de Bayes se aplica de la siguiente forma:

Suponiendo que se toman unas observaciones  $\underline{x}$  de una muestra de la población con una distribución de probabilidad definida por el parámetro  $\theta$ , se denota lo siguiente:

$$P(\theta|\underline{x}) = \frac{P(\underline{x}|\theta) P(\theta)}{P(\underline{x})} \quad (2.12)$$

Donde:

$P(\theta|\underline{x})$ : Probabilidad de la distribución  $\theta$  tal que se han sucedido observaciones de la variable  $\underline{x}$ .

$P(\underline{x}|\theta)$ : Verosimilitud del conjunto de datos  $\underline{x}$ .

$P(\theta)$ : Probabilidad de  $\theta$ .

$P(\underline{x})$ : Probabilidad de  $\underline{x}$ .

$P(\theta)$  representa a la información *a priori* de la población y tiene un carácter subjetivo. Esta probabilidad es incondicional y representa la incertidumbre del parámetro  $\theta$ . La función  $P(\underline{x}|\theta)$  se le llama verosimilitud del conjunto de datos  $\underline{x}$  y se interpreta como la probabilidad de observar un conjunto de ciertos datos  $\underline{x}$  dado que ciertas características de la población  $\theta$  son verdaderas.

Después, al combinar esta información subjetiva con observaciones empíricas del fenómeno, (la información *a priori* y las verosimilitudes), se obtiene la probabilidad *a posteriori*. Esta probabilidad nos proporciona información sobre el parámetro  $\theta$  para que tome ciertos valores dado que se han realizado observaciones  $\underline{x}$  sobre el fenómeno, lo cual se identifica como  $P(\theta|\underline{x})$ . Al sumar  $P(\underline{x}|\theta) P(\theta)$  se obtiene la probabilidad marginal de  $\underline{x}$ :

$$P(\underline{x}) = \sum P(\underline{x}|\theta) P(\theta) \quad ^8 \quad (2.13)$$

---

<sup>8</sup> Este caso aplica solo para distribuciones discontinuas, para distribuciones continuas la suma cambia por integral respecto al parámetro.

Esta probabilidad incondicional de  $P(\underline{x})$  funciona como una constante de escala y se puede expresar como:

$$P(\underline{x}, \theta) = P(\underline{x}|\theta) P(\theta) = L(\underline{x}|\theta) P(\theta) \quad (2.14)$$

Donde:

$P(\underline{x}, \theta)$ : Distribución conjunta de los datos observados  $\underline{x}$  y sus parámetros.

$P(\underline{x}|\theta)$ : Verosimilitud del conjunto de datos  $\underline{x}$ .

$P(\theta)$ : Probabilidad de  $\theta$ .

$L(\underline{x}|\theta)$ : Función de distribución *a posteriori*.

“La distribución conjunta de los datos observados y los parámetros es igual a la densidad de las observaciones dados los parámetros por la densidad de los parámetros que equivale a la distribución *a posteriori* de los parámetros dados los datos observados por la densidad marginal de los datos” (Dávila Aragón, 2014).

Esta relación nos permite expresar la distribución *a posteriori* como:

$$P(\theta|\underline{x}) \propto L(\underline{x}|\theta) P(\theta) \quad (2.15)$$

Esto quiere decir que la probabilidad *a posteriori* es proporcional al producto de la función de verosimilitud de la muestra observada, dados los parámetros por la distribución marginal del parámetro  $\theta$ , que es el conocimiento *a priori*.

El enfoque Bayesiano es popular en la comunidad que se dedica a los análisis de riesgos. Esto debido que los datos de muchas fuentes distintas pueden ser combinados para producir datos genéricos, mayoritariamente en forma de una razón de fallo genérica (promedio) de un sistema o componente de un sistema. Este parámetro se le considera estocástico para poder representar todas las fuentes de incertidumbre que tenemos al especificar dicha razón de fallo (Bedford & Cooke, 2001).

Además de esto, la ventaja de poder actualizar una distribución *a priori* para obtener una distribución *a posteriori* de un fenómeno es de suma importancia a nivel ingenieril, ya que implica la posibilidad de poder realizar experimentos y actualizar criterios utilizando el juicio de expertos. La combinación de evidencia científica, así como la ponderación subjetiva de expertos basada en la experiencia, otorga al método Bayesiano de una alta confiabilidad para ser utilizado en los análisis de riesgos.

## 2.6 Definición de Redes Bayesianas

En términos simples, las Redes Bayesianas son una representación gráfica de la probabilidad entre variables aleatorias y se utilizan para manejar la incertidumbre de un sistema. Esto quiere decir que son una herramienta útil para los Análisis de Riesgos, cuya función principal es el tratamiento de la incertidumbre en una instalación industrial específica. Formalmente, una red bayesiana, también llamada “red de creencias”, es una combinación de un Grafo Dirigido Acíclico (GDA) y el uso de probabilidad bayesiana.

En teoría de grafos, se le denomina grafo al conjunto de objetos o nodos unidos por aristas o arcos que simbolizan relaciones entre dichos objetos. De acuerdo con Robles Forcada (2003), matemáticamente conviene considerar las siguientes nociones básicas para comprender las redes bayesianas:

- Un grafo  $G$  se compone por un par ordenado  $(N, A)$  donde  $N$  representa los nodos que lo forman y  $A$  representa a las aristas o arcos que existen en dicho grafo.
- Si las aristas tienen una dirección se le llaman aristas o arcos dirigidos ( $\rightarrow$ ).
- Un grafo dirigido es un par  $(N, A)$  cuyas aristas son dirigidas en su totalidad.
- Un nodo padre  $X$  es aquel nodo para el cual existe un nodo  $Y$  con un arco dirigido de  $X$  a  $Y$ ,  $X \rightarrow Y$ .
- Un nodo hijo  $Y$  es aquel nodo para el cual existe un nodo  $X$  con un arco dirigido de  $X$  a  $Y$ ,  $X \rightarrow Y$ .
- Un nodo sin nodos padres se le denomina nodo raíz y su probabilidad es independiente.
- Un ciclo es una sucesión de nodos que inicia y termina en el mismo nodo.

En las siguientes figuras se muestra un ejemplo para ilustrar estos conceptos:

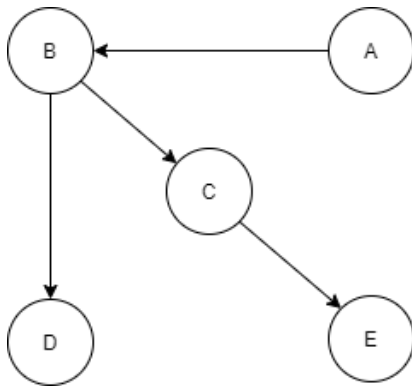


Figura 2.1 Grafo Dirigido de 5 nodos

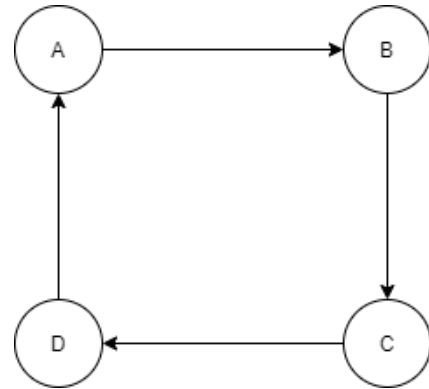


Figura 2.2 Grafo Cíclico de 4 nodos

Una vez entendidos estos conceptos, regresaremos al concepto principal de las Redes Bayesianas, los Grafos Dirigidos Acíclicos o GDA. Para que un grafo cumpla la condición de ser dirigido solo debe contener en su estructura aristas o arcos dirigidos, y para que cumpla la condición de ser acíclico, no debe presentar en su estructura ningún ciclo. Por lo que, a manera de ejemplo de dichos grafos, se presentan los siguientes:

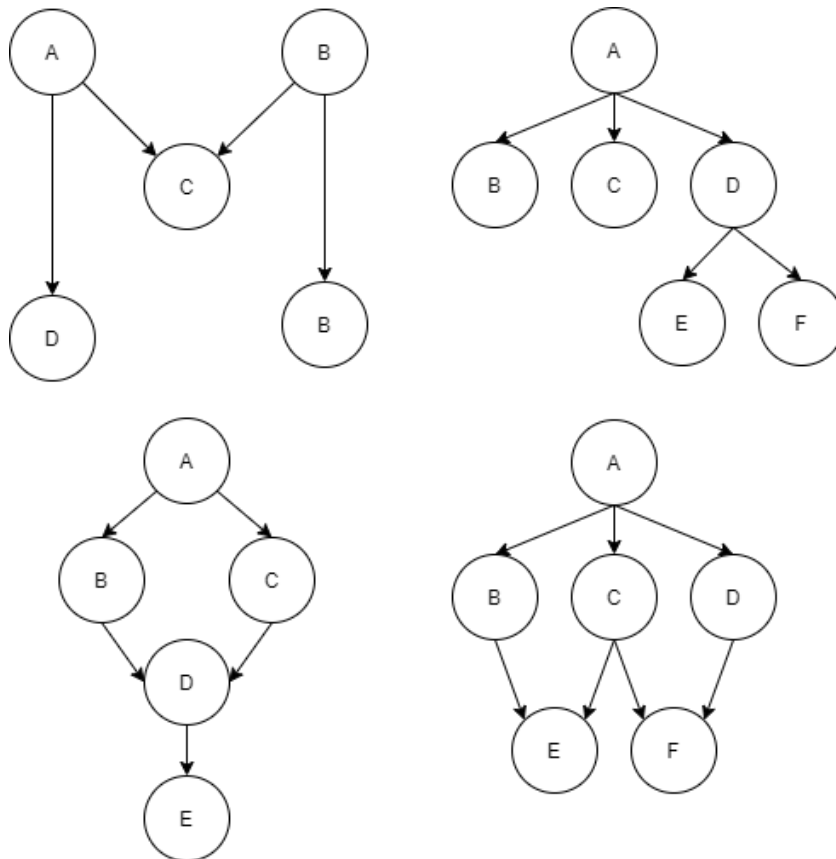
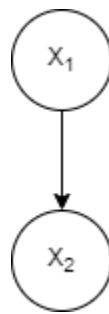


Figura 2.3 Ejemplos de Grafos Dirigidos Acíclicos (GDA)

En resumen, gráficamente una red bayesiana está compuesta por nodos, los cuales representan variables estocásticas de los eventos de interés, y arcos o aristas dirigidas, que simbolizan los enlaces causales que determinan la relación causa-efecto entre dichos eventos. Además de esto, se debe elaborar una tabla de probabilidades condicionales asociada a cada nodo que representa la transición matemática que modela el comportamiento de cada variable aleatoria hacia otra variable. Dicha tabla modela la relación incierta entre el nodo hijo y sus nodos padres junto con cualquier incertidumbre presente en la relación.

Matemáticamente, esta incertidumbre se puede modelar mediante una red bayesiana simple como la siguiente:



*Figura 2.4 Grafo Dirigido Acíclico Básico<sup>9</sup>*

En este caso se observa que  $x_1$  y  $x_2$  son variables del modelo. Además, existe una relación de causalidad de  $x_1$  a  $x_2$  representada por el arco dirigido entre ambas. Es decir, un cambio en  $x_1$ , el nodo padre, produce un cambio en  $x_2$ , el nodo hijo. Por esta razón, la información que tenemos sobre  $x_1$  determina lo que sabemos sobre  $x_2$ , a esta información se le llama evidencia.

Considerando que la relación entre  $x_1$  y  $x_2$  es una distribución conjunta de probabilidad, la relación entre nodos se puede expresar de la siguiente manera:

$$P(x_1) P(x_2|x_1) \tag{2.16}$$

Donde:

$P(x_1)$ : Probabilidad de ocurrencia del evento  $x_1$ .

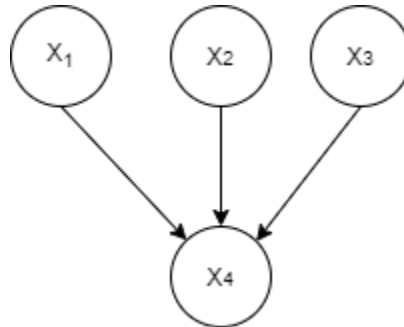
$P(x_2|x_1)$ : Probabilidad de ocurrencia del evento  $x_2$  dado que el evento  $x_1$  sucedió.

---

<sup>9</sup> Fuente: Tomado de Dávila Aragón, G. (2014). Uso de Redes Bayesianas para medir el Riesgo Operacional, un caso de aplicación (Tesis Doctoral). México: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.

La relación entre cada nodo de una red bayesiana es el producto de la probabilidad de  $x_1$  por la probabilidad condicional de  $x_2$  dado que  $x_1$  sucedió. Con esta relación básica se agregan bloques a la red bayesiana que aumentan la complejidad de la red, siempre y cuando se respete la estructura básica del GDA, es decir, no incluir estructuras cíclicas (para no caer en lógica circular) ni arcos no dirigidos (para conocer exactamente la dirección de la evolución del evento).

Para contar con otro ejemplo, se muestra la siguiente figura:



*Figura 2.5 Grafo Dirigido Acíclico de 4 nodos (Dávila Aragón, 2014).*

En este caso, se observa un nodo hijo  $x_4$  con tres nodos padre  $x_1, x_2$  y  $x_3$ , entonces la probabilidad está definida por  $P(x_4|x_1, x_2, x_3)$ . Como generalización se obtiene lo siguiente:

Sea  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  una variable aleatoria, su función de distribución conjunta está definida por:

$$P(X) = P(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.17)$$

Donde:

$P(X)$ : Función conjunta de probabilidad de  $x_1, x_2, \dots$  hasta  $x_n$

La función  $P(X)$  incrementa exponencialmente a mayor número de variables. Por esta razón, una red bayesiana es una forma de representación gráfica compacta de la distribución de probabilidad de  $X$ . Posteriormente, la distribución conjunta total se puede generalizar como:

$$P(X) = P(x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_1^k (x_i | p(x_i)) \quad (i = 1, 2, \dots, k) \quad (2.18)$$

Donde:

$\prod_1^k (x_i | p(x_i))$ : Producto de las probabilidades condicionales de  $x_i$ .

Donde  $p(x_i)$  hace referencia a los nodos padre de la variable  $x_i$ .

Una vez descrita la generalización de la distribución conjunta total en una red bayesiana, se introduce la siguiente figura:

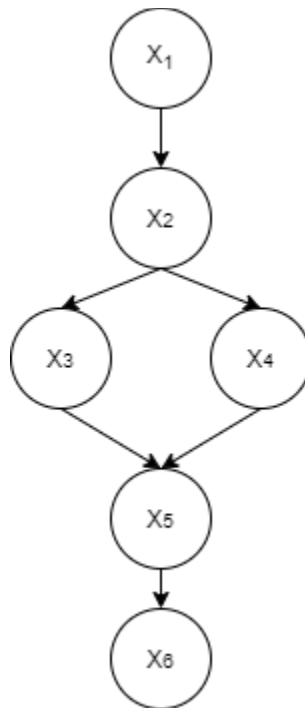


Figura 2.6 Ejemplo de una Red Bayesiana (Dávila Aragón, 2014).

Partiendo de lo anterior la probabilidad conjunta total del modelo anterior sería:

$$P(X) = P(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) = P(x_1)P(x_2|x_1)P(x_3|x_2)P(x_4|x_2)P(x_5|x_3, x_4)P(x_6|x_5) \quad (2.19)$$

Si se requiriera conocer la distribución de conjunta de este modelo para el nodo  $x_5$ , se obtiene la siguiente expresión:

$$P(x_5|x_4, x_3, x_2, x_1) \quad (2.20)$$

Donde:

$P(x_5|x_4, x_3, x_2, x_1)$ : Probabilidad de ocurrencia del evento  $x_5$ , dado que  $x_4, x_3, x_2$  y  $x_1$  han sucedido.

Pero dado que los nodos anteriores a los nodos padres mantienen una condición de independencia respecto a los nodos hijos, se simplifica de la siguiente forma:

$$P(x_5|x_4, x_3) \quad (2.21)$$

Donde:

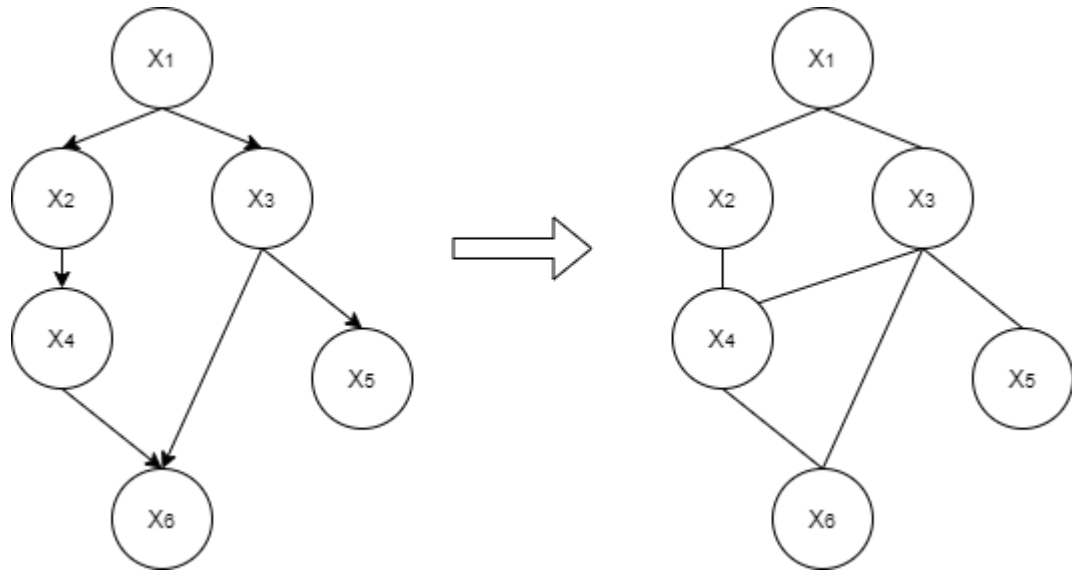
$P(x_5|x_4, x_3)$ : Probabilidad de ocurrencia del evento  $x_5$ , dado que  $x_4$  y  $x_3$  han sucedido.

Por lo que las probabilidades condicionales a evaluar se reducen considerablemente analizándolo de esta forma. No obstante, existen modelos tan complejos que, a pesar de poder ser simplificados, realizar inferencias se vuelve complicado, sobre todo cuando los nodos presentan variables de múltiples estados. Un método para analizar las redes bayesianas complejas es la metodología llamada "Árboles de Derivación" (*Junction Tree Algorithm*) el cual es un marco de trabajo algorítmico mediante el cual se pueden simplificar los conceptos que subyacen en el proceso inferencial. (Jordan, 2004) El problema principal radica en calcular la probabilidad condicional de un nodo o conjunto de nodos, dados los valores observados de otro conjunto de nodos. Lo que se busca es descomponer un cálculo global en una probabilidad conjunta enlazada con un conjunto de cálculos modulares localizados. Dicha forma de trabajo permite realizar inferencias probabilísticas de manera eficiente.

Los "Árboles de Derivación" son gráficas no direccionales y consisten en una colección de gráficos también llamados universos de creencias; son grupos de nodos en el que cada nodo del grupo está conectado con cada otro nodo del grupo.

Para convertir un GDA a un árbol de derivación se realizan los siguientes pasos.

1. Moralización: En este paso un grafo dirigido se convierte en un grafo no dirigido. Esto se realiza al enlazar los nodos padres con cada nodo hijo que tienen en común y eliminando la direccionalidad de los arcos del GDA. Se muestra este paso en la próxima figura:



*Figura 2.7 Ejemplo de Moralización*

Se puede observar que se trazó una línea del nodo  $x_3$  al nodo  $x_4$ , esto es debido a que, para establecer la totalidad de relaciones entre los nodos padre y los nodos hijo, se deben unir los nodos padres que tienen un nodo hijo en común (de ahí el término “moralización”, unir a los padres). En este caso  $x_3$  y  $x_4$  son nodos padres del nodo  $x_6$ .

Este paso es importante para eliminar las relaciones de independencia de información de cada nodo, es decir, entender quiénes son los nodos padres de cada nodo hijo, y también para simplificar el análisis posterior.

2. Triangulación: Se procede a la eliminación del orden del grafo. Partiendo de un grafo moralizado, se agregan arcos no dirigidos de manera que se formen ciclos de longitud no mayor a tres, es decir unidos por tres arcos. A continuación, se ejemplifica esto:

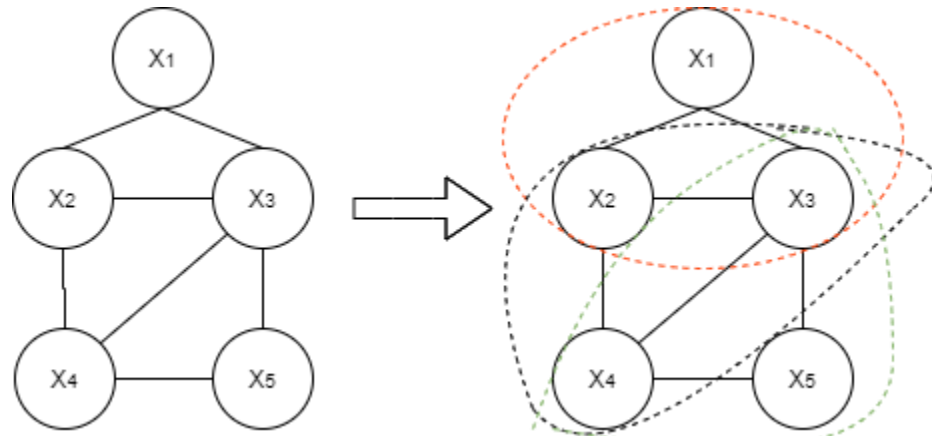


Figura 2.8 Ejemplo de Triangulación

Aquí se agruparon los nodos en tercias de acuerdo con los arcos que se ven en la red, de esta forma podemos obtener los siguientes ciclos los cuales son:

- $x_1, x_2$  y  $x_3$ ;
- $x_2, x_3$  y  $x_4$ , y
- $x_3, x_4$  y  $x_5$

Con estas tercias, se puede elaborar el árbol de derivación para realizar las inferencias que se requieren. Realizar la triangulación del grafo moralizado es importante para poder agrupar los ciclos de relevancia, de acuerdo con este método.

3. Construcción del árbol de derivación: con el grafo triangulado, se crea la representación gráfica del árbol de derivación al unir los triángulos definidos anteriormente con rectángulos, estos rectángulos representan los nodos que cada triángulo tiene en común con el siguiente, resultando en esta figura:

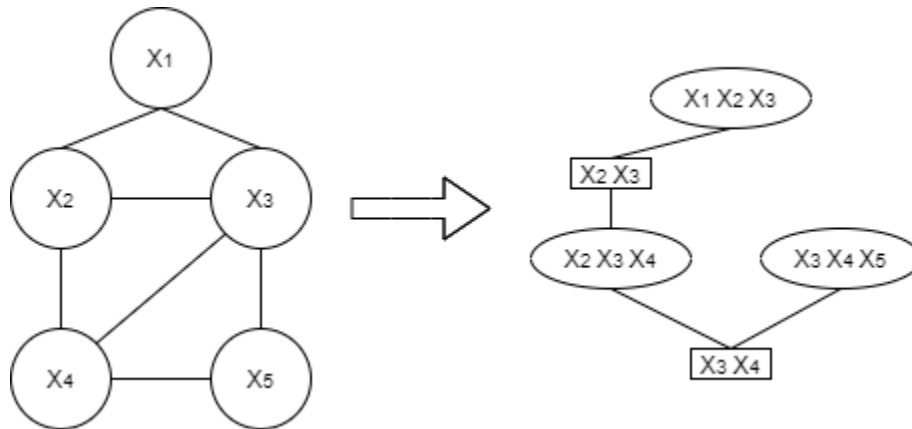


Figura 2.9 Ejemplo de Construcción del Árbol de Derivación

Se puede observar que el triángulo  $x_1, x_2$  y  $x_3$  está unido al triángulo  $x_2, x_3$  y  $x_4$  mediante el rectángulo  $x_2, x_3$ , esto nos habla que dichos triángulos tienen en común a los nodos  $x_2$  y  $x_3$ .

Dicha transformación nos permite incorporar la evidencia localmente en cada nodo para realizar cálculos, esta información a su vez se propaga en todos los nodos del árbol, de acuerdo con la representación mostrada. Entonces la probabilidad conjunta se puede calcular a nivel local y no global, facilitando los cálculos.

Una vez construido el árbol de derivación se procede a lo siguiente:

1. Definir de distribuciones *a priori*.
2. Incorporar la evidencia en cada nodo.
3. Propagar los mensajes en los nodos de la red.

Las distribuciones *a priori* se establecen para todos los nodos raíz, es decir, aquellos nodos sin nodos padre y, además, se establece la distribución condicional de los nodos hijo. Esta distribución *a priori* representa la probabilidad de múltiples estados asignados a un nodo y puede ser obtenida mediante la opinión de expertos; en el cual los parámetros están sujetos al juicio de una persona o de un grupo de personas, o estimaciones por máxima verosimilitud; en el cual los parámetros de la red parten de una base de datos estadísticos asumiendo que la información es relevante y completa. En la práctica, se pueden aplicar en conjunto ambas aproximaciones lo que le otorga amplia flexibilidad al método descrito.

En primera instancia, los cálculos y los procedimientos presentados resultan complejos e inviables de realizar para aplicaciones prácticas; sin embargo, como se verá más adelante, el avance en el desarrollo de algoritmos basados en estructuras gráficas ha posibilitado y extendido su uso mediante las tecnologías de la información actuales.

## 2.7 Teoría de Dempster-Shafer

Una de las principales diferencias respecto al uso de probabilidad Bayesiana y otros métodos, es que el método Bayesiano requiere de la especificación de una distribución de probabilidad *a priori*. En la práctica, esta cuestión es abordada mediante la especificación de una probabilidad *a priori* basada en un consenso general y racional. Formas populares de llegar a este consenso es mediante la opinión de expertos e información genérica a partir de bases de datos confiables (Bedford & Cooke, 2001).

Para este trabajo se plantea la posibilidad de contar con el juicio de expertos en la materia para la definición de las probabilidades *a priori*, por lo que es conveniente utilizar la teoría de evidencia de Dempster-Shafer, el cual es un marco de trabajo para relacionar y agrupar los distintos grados de creencia de diferentes perspectivas.

Un grado de creencia, en términos sencillos, es la certeza que puede tener una persona en la verdad o falsedad de una proposición. Se le suele dar un tratamiento similar al de la probabilidad clásica, con algunas particularidades. Por ejemplo: Supongamos que se tiene un dado de 6 caras, de acuerdo con la ecuación 2.2 se puede decir que la probabilidad de que salga un 6 en el dado es de:

$$P(6) = \frac{1}{6} \quad (2.22)$$

Considerando esto, una persona podría decir que el grado de creencia de que en el mismo dado salga un 6, sería igual a lo que nos dice la probabilidad clásica. Sin embargo, si la persona tuviera evidencia que es un dado modificado para que saliera el doble de veces el número 6, intuitivamente el grado de creencia sería mucho mayor a  $1/6$ . Por este motivo, los grados de creencia son dependientes del observador y de la evidencia presentada y no son por completo objetivos. Sin embargo, las Redes Bayesianas funcionan estableciendo un marco de trabajo lógico para poder calcular y concluir a partir de los grados de creencia subjetivos de expertos y de información estadística. Para definir el grado de creencia de un individuo, se utiliza una función másica  $m(A)$ , la cual denota el grado de creencia que tiene un individuo respecto a la ocurrencia de un evento  $A$ .

Al denotar un marco de discernimiento como  $\theta$ , el cual es un conjunto que incluye elementos limitados (eventos a los cuales se les asocia un grado de creencia de que puedan suceder) y mutuamente excluyentes de una proposición particular, la función básica de Dempster-Shafer es la siguiente (Wu, Zhou, Xu, & Wu, 2017):

$$m(A) = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{1}{1-K} \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_N} m_1(A_1) \cdot m_2(A_2) \dots m_N(A_N), & A \neq \emptyset \\ 0, & A = \emptyset \end{array} \right\} \quad (2.23)$$

Donde:

$m(A)$ : Función másica del objeto  $A$  o grado de creencia del evento  $A$ .

$K$ : Grado de conflicto entre los eventos.

$m(A)$  es una función del conjunto potencia  $2^\theta$  con valores de  $[0, 1]$  y también es la función de probabilidad de Dempster-Shafer, con dos condiciones que la función debe cumplir:

$$\left\{ \begin{array}{l} m(\emptyset) = 0 \\ \sum_{A \subset \theta} m(A) = 1 \end{array} \right\} \quad (2.24)$$

Donde,  $m(\emptyset)$  implica que no existe evidencia que apoye al conjunto vacío mientras que  $m(A)$  expresa las evidencias que apoyan la ocurrencia del evento  $A$ . Por lo tanto,  $\sum_{A \subset \theta} m(A) = 1$  muestra que el valor total de las creencias del conjunto  $2^\theta$  deben ser iguales a 1.  $K$  se refiere al grado de conflicto de las creencias  $m_1, m_2 \dots m_N$  y se define como:

$$\begin{aligned} K &= \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_N \neq \emptyset} m_1(A_1) \cdot m_2(A_2) \dots m_N(A_N) \\ &= 1 - \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_N = \emptyset} m_1(A_1) \cdot m_2(A_2) \dots m_N(A_N) \end{aligned} \quad (2.25)$$

Una vez realizado este procedimiento, se pueden ponderar las creencias individuales de un grupo de expertos para obtener un valor medible en el modelo de red bayesiana. Aplicar esto, ayuda a nivelar entre expectativas demasiado optimistas o pesimistas de las creencias *a priori* lo cual puede distorsionar la red e invalidar los resultados del modelo.

## 2.8 Construcción de una Red Bayesiana

De acuerdo con Dávila Aragón (2014) respecto a la construcción de redes bayesianas menciona lo siguiente: “La clave para un diseño exitoso de una red bayesiana es la descomposición significativa de un dominio del problema en un conjunto de proposiciones causales o condicionales sobre el dominio. En lugar de llevar a cabo la laboriosa y difícil tarea de calcular la distribución de probabilidad conjunta de todas las variables de interés, se aplica el principio “divide y vencerás” y tomar las especificaciones parciales del modelo que son en sí significativos en el dominio del experto”.

Partiendo de esto, los pasos para construir cualquier red bayesiana son los siguientes:

1. Definir el dominio del problema, así como objetivos específicos de la red y el mecanismo de análisis.
2. Determinar las variables de estado del problema, estos son los nodos y los valores que cada nodo puede tomar de acuerdo con las características propias del evento.
3. Relacionar los nodos de acuerdo con el desarrollo de los eventos en forma gráfica.
4. Validar el modelo resultante mediante el juicio de expertos.
5. Adquirir la distribución de probabilidad *a priori* mediante el juicio de expertos o información estadística e incorporarla como evidencia a la red.
6. Realizar inferencias a partir de la evidencia incluida en el modelo mediante escenarios hipotéticos y verificar que los resultados obtenidos puedan ser utilizados para resolver el problema determinado.
7. Mantener actualizada la red conforme surjan nuevos datos o información.

Concluidos estos pasos, una red bayesiana puede utilizarse como un modelo dinámico que permita tener siempre una herramienta confiable para incorporar en cualquier análisis de riesgo sin importar las características de la actividad o instalación industrial que se requiera evaluar.

## 2.9 Ventajas de las Redes Bayesianas

Las Redes Bayesianas fueron presentadas por primera vez en California, Estados Unidos por Judea Pearl en 1985 como un método por el cual se planteaba diseñar un modelo para realizar razonamientos basado en evidencias con carácter multidireccional (Pearl, 1985). A partir de ese momento, ha evolucionado en una infinidad de aplicaciones y modelos predictivos en campos como la medicina, informática, finanzas, economía y en todo tipo de análisis de riesgo.

En específico, las redes bayesianas han probado ser una eficaz herramienta de análisis causa-efecto para representar la incertidumbre de sistemas probabilísticos en una amplia variedad de contextos relacionados con accidentes. Algunos casos de éxito son:

- Khakzad et al. concluyeron que las Redes Bayesianas constituían una técnica superior para el análisis de riesgo en instalaciones de procesamiento de gas por su estructura flexible, lo que le permitía adaptarse a una gran variedad de escenarios de accidente. (Khakzad, Khan, & Amyotte, 2011)
- Hossain M. y Muromachi Y. aplicaron la metodología de Redes Bayesianas para clasificar y predecir choques en segmentos de autopistas urbanas utilizando información proveniente de sensores de tráfico, logrando predecir correctamente 66% de choques futuros con un porcentaje de falsa alarma de 20%. (Hossain & Muromachi, 2012)
- Francis et al. demostraron que es posible utilizar una red bayesiana para vigilar una red de ductos de distribución de agua potable y predecir fallas en el sistema. (Francis, Guikema, & Henneman, 2014)
- Tan et al. lograron desarrollar una estrategia de inspección de equipos para prevenir fugas de gas natural con alto contenido en azufre en una estación acumuladora de gas a partir de redes bayesianas. (Tan, Chen, Zhang, Fu, & Li, 2014)
- Kabir et al. evaluaron el riesgo de falla en ductos de agua usando una red bayesiana a partir de bases de datos históricas, lo que permitió identificar vulnerabilidades en tramos específicos para posteriormente dar mantenimiento, rehabilitación o reemplazo de dichos tramos. (Kabir, Tesfamariam, Francisque, & Sadiq, 2015)

De estos estudios, se pueden enlistar algunas ventajas que poseen las redes bayesianas:

- Permite modelar eventos causa-efecto que son necesarios para comprender la evolución de un accidente.
- Admite la posibilidad de usar, tanto fuentes estadísticas basadas en datos históricos de accidentes, como el criterio de expertos en un mismo modelo matemático.
- Es un mecanismo dinámico y autocorrectivo, es decir, a medida que se incorpora nueva o mejor evidencia al modelo, este se vuelve más preciso.
- Permite realizar, de manera rápida, modificaciones al modelo incluso después de haberlo generado.
- Puede realizar predicciones en ambientes de alta incertidumbre.
- Permite modelar variables multi estado con lo cual un solo nodo puede otorgar información de más de dos desenlaces para un mismo evento.
- Puede ser tan general o focal como se requiera dependiendo de la estructura de la red.
- Puede integrar información tanto cualitativa como cuantitativa a partir de distintas fuentes de información.

La principal crítica al método de redes bayesianas radica en la subjetividad del experto que elabora el modelo, así como el carácter subjetivo de las entrevistas como fuente de información. No obstante, como se describió en el capítulo anterior, las metodologías convencionales de análisis de riesgos no carecen de una componente subjetiva y presentan algunas desventajas que las redes bayesianas logran mitigar o rechazar eficientemente.

En resumen, las redes bayesianas cuentan con una enorme flexibilidad y adaptabilidad sin perder el rigor técnico que un análisis de riesgos del sector industrial requiere.

## Capítulo 3. El Gas Natural y su Infraestructura en México

En el presente capítulo, se plantea abordar una introducción general sobre el gas natural como recurso energético, sus características y sus usos, así como las ventajas de este recurso frente a otros recursos como el petróleo o el Gas L.P.

Posteriormente, se presentarán las actividades mediante las cuales la industria aprovecha dicho recurso y su valor en la economía mundial, además del rol e importancia que tiene este recurso en la matriz energética nacional y las actividades en las cuales se emplea.

Consecutivamente, se presentará el marco regulatorio vigente para las actividades de transporte de gas natural; las instituciones que regulan esta actividad; la cadena de valor que se define para un mejor entendimiento del sector; las leyes, reglamentos e instrumentos que regulan el sector, y finalmente, la normatividad específica que tiene relación con los Análisis de Riesgos para las actividades de transporte de gas natural.

Después, se mostrará la infraestructura principal por la cual el gas natural se conduce a todos los centros de aprovechamiento mediante ductos, así como la forma en la que se dividen los ductos para su comprensión.

Finalmente, se realizará una breve revisión de algunos accidentes relevantes a nivel mundial relacionados con la actividad de transporte de gas natural o algunos productos similares para dejar en contexto la importancia de los Análisis de Riesgos.

### 3.1 El Gas Natural

Uno de los recursos centrales para el desarrollo de una industria energética eficiente es el gas natural. El gas natural ha cobrado relevancia como recurso energético a partir de la década de los 80's, principalmente por las crecientes preocupaciones por los precios del petróleo y la contaminación ambiental. (Bhattacharyya, 2011)

De acuerdo con el *BP Statistical Review of World Energy* de 2020, el gas natural constituye el 24.2% de la matriz energética primaria global, siendo el tercer recurso energético de mayor uso después del petróleo y el carbón, además, se prevé que dicha tendencia se mantenga para reemplazar a ambos como el recurso energético principal a nivel mundial. A continuación, se presentarán algunas características fundamentales del gas natural como punto de partida de este capítulo.

El gas natural es una mezcla de gases compuesta fundamentalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ), aunque también puede contener otros gases como: etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), propano ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ), butano ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) y pentanos ( $\text{C}_5\text{H}_{12}$ ). Asimismo, puede contener dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), nitrógeno ( $\text{N}_2$ ), sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ) y trazas de hidrocarburos más pesados.

Se extrae principalmente de yacimientos en el subsuelo localizados a una profundidad de entre 300 m a 6000 m. El gas natural es extraído de estos yacimientos a través de diversos métodos dependiendo de las características específicas del yacimiento en cuestión. No se abordarán dichos métodos ya que no es el objeto de estudio de esta tesis.

### **3.1.1 Clasificación del Gas Natural**

El gas natural tiene varias clasificaciones, según la materia de la que se esté tratando, las clasificaciones más comunes son las siguientes:

- Por su origen:

a) Gas Natural Asociado:

En los yacimientos de gas natural asociado, dependiendo de las condiciones de presión y temperatura, el gas se puede encontrar de forma libre, comúnmente denominado gas de casquete, o como gas en solución, disuelto en el petróleo.

b) Gas Natural No Asociado:

El gas natural no asociado es el gas que se encuentra en un yacimiento de hidrocarburos y cuya composición es de hidrocarburos muy ligeros, principalmente metano, y que no forman una fase líquida a las condiciones de presión y temperatura del yacimiento.

- Por su composición química:

a) Según la concentración de compuestos condensables:

1. Gas Húmedo:

Se le denomina gas húmedo al gas natural con un contenido importante de hidrocarburos más complejos que el metano, como etano, propano, butano, pentano, etc. Esta mezcla permite obtener algunos otros derivados del petróleo como gasolinas, queroseno, y gas licuado de petróleo.

2. Gas Seco:

Se le denomina gas seco al gas natural que contiene en su composición mayoritaria solamente metano, contiene pequeñas cantidades de otros hidrocarburos y agua.

b) Según la concentración de impurezas y derivados del azufre:

1. Gas Amargo:

Se le denomina gas amargo a aquel gas con una concentración importante de sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ) como impurezas, llamados compuestos amargos. Dichos compuestos afectan el desempeño del combustible y aumentan la emisión de contaminantes durante la combustión.

2. Gas Dulce:

Se le denomina gas dulce al gas natural libre de sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ), mercaptanos y otros derivados del azufre. Normalmente no se encuentra libre de impurezas en yacimientos, por lo que para obtenerlo se procesa utilizando solventes o adsorbentes.

Estas clasificaciones son las más comunes dentro de la industria y nos servirán para introducir algunas de las propiedades fisicoquímicas del gas natural. Lo anterior para comprender los eventos relacionados con accidentes en las actividades concernientes al manejo de gas natural.

Para concluir, vale la pena introducir la clasificación del gas natural de acuerdo con la Ley de Hidrocarburos, esto para comprender su lugar dentro de la regulación vigente mexicana. Según la Ley de Hidrocarburos (2016) el Gas Natural es:

“La mezcla de gases que se obtiene de la Extracción o del procesamiento industrial y que es constituida principalmente por metano. Usualmente esta mezcla contiene etano, propano, butanos y pentanos. Asimismo, puede contener dióxido de carbono, nitrógeno y ácido sulfhídrico, entre otros. Puede ser Gas Natural Asociado, Gas Natural No Asociado o gas asociado al carbón mineral.”

A continuación, se muestra en la siguiente figura una clasificación general de los hidrocarburos de acuerdo con dicha Ley para distinguirla de otros productos en el sector energético mexicano:

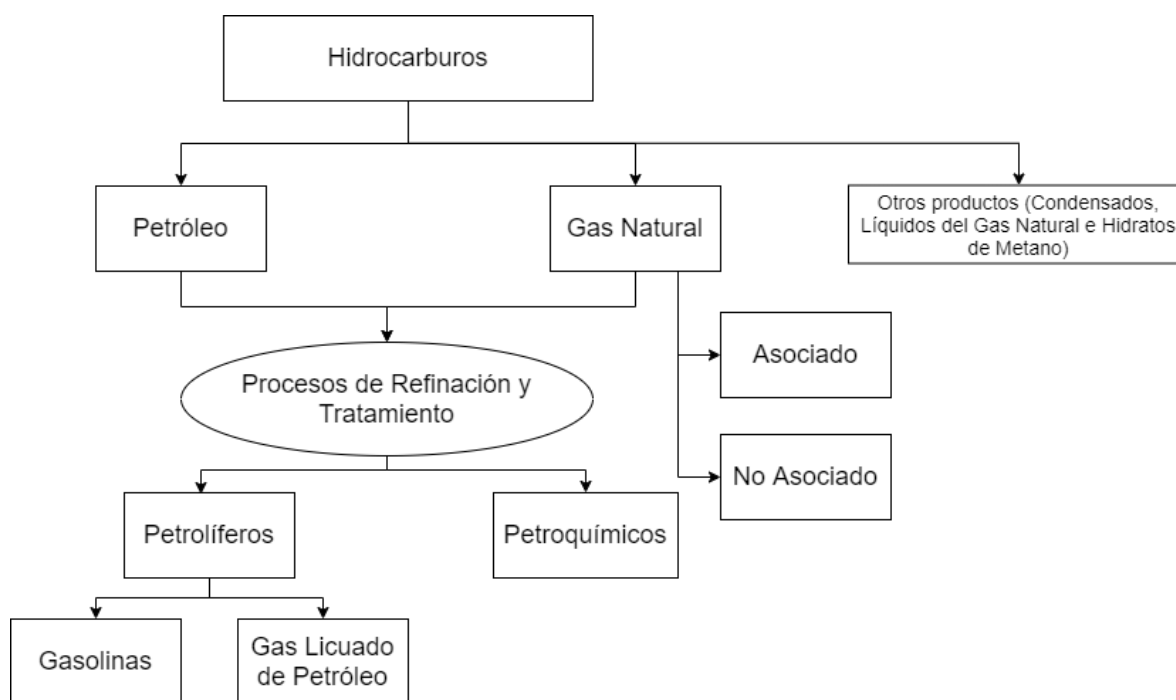
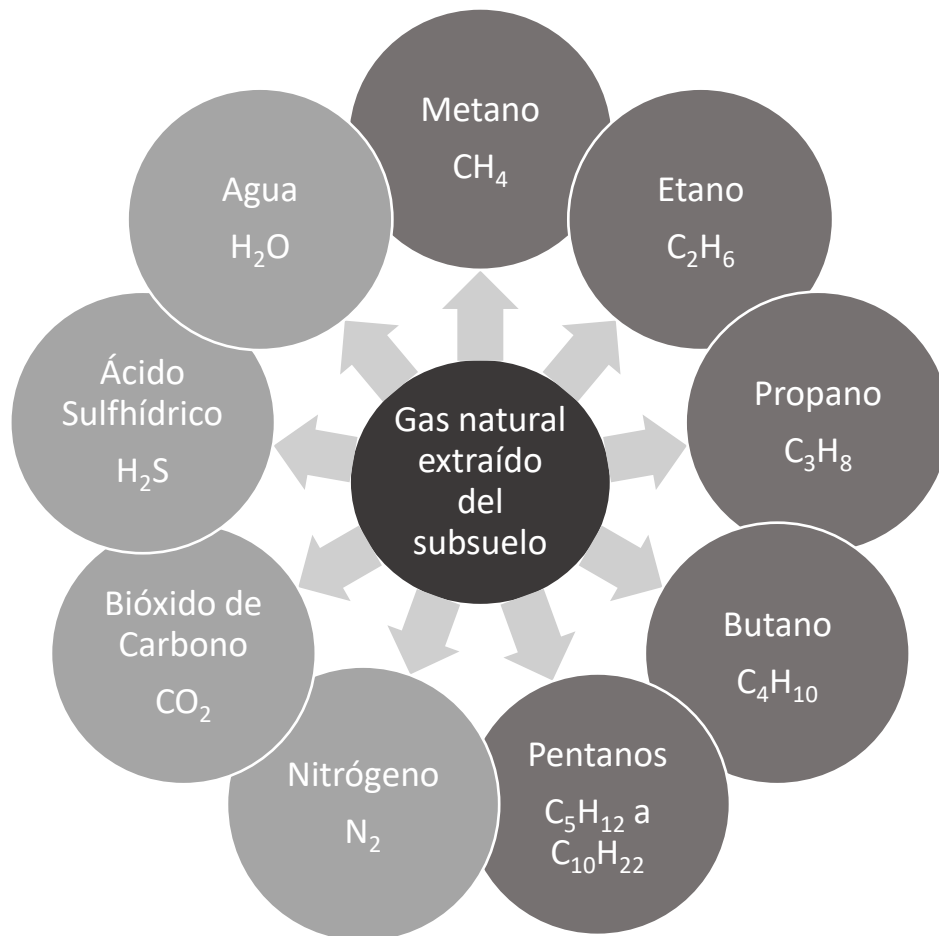


Figura 3.1 Clasificación del Gas Natural según la Ley de Hidrocarburos. Fuente: Elaboración propia a partir del contenido de la Ley de Hidrocarburos

### 3.1.2 Propiedades Fisicoquímicas del Gas Natural

Es una mezcla de hidrocarburos sencillos en estado gaseoso en condiciones ambientales estándar de presión y temperatura. La composición del gas natural comercializable en México debe contener por lo menos 84% en volumen de metano (CH<sub>4</sub>), la cadena de hidrocarburos más simple. Como se mencionó anteriormente, también puede contener otras cadenas de hidrocarburos, así como otras impurezas.



*Figura 3.2 Componentes del Gas Natural. Fuente: Secretaría de Energía.*

En su estado natural es inodoro, incoloro e insípido, por lo que, para identificar su presencia en el ambiente, se le agrega un compuesto llamado mercaptano, que le da su olor característico. Su densidad relativa lo hace más ligero que el aire por lo que se disipa rápidamente en las capas superiores de la atmósfera en casos de fugas, dificultando la formación de mezclas explosivas. No obstante, a pesar de esta cualidad, no está completamente exento de un nivel de peligrosidad considerable en el sector.

Algunas de las propiedades generales del gas natural, hablando específicamente del metano (molécula mayoritaria en la mezcla del gas natural), se muestran en la Tabla 8:

*Tabla 8. Propiedades Generales del Gas Natural. Fuente: Elaboración propia a partir de información de Hojas de Datos de Seguridad del Gas Natural tomada de <https://www.linde.mx/-/media/corporate/praxair-mexico/documents/safety-data-sheets/gas-natural-hds-p4627e-2009.pdf>.*

<b>Propiedades Físicas</b>	<b>Propiedades Químicas</b>
<b>Fórmula molecular</b>	CH <sub>4</sub>
<b>Masa molar</b>	18.2 g/mol
<b>Densidad relativa (Fase gas)</b>	0.61
<b>Densidad relativa (Fase líquida)</b>	0.554
<b>Temperatura de ebullición</b>	-160 °C
<b>Temperatura de fusión</b>	-180 °C
<b>Relación de expansión</b>	1 L de líquido se convierte en 600 L de gas
<b>Solubilidad en agua</b>	Ligeramente soluble

Adicionalmente, de acuerdo con la normatividad vigente en México, el gas natural que se inyecte en los sistemas de transporte, almacenamiento y distribución y el que sea entregado por los suministradores a permisionarios y usuarios, es decir el gas natural comercializable, debe cumplir con especificaciones mostradas en la Tabla 9 (Comisión Reguladora de Energía, 2010):

*Tabla 9. Especificaciones del Gas Natural. Fuente: Elaboración propia a partir de la información de la NOM-003-SECRE-2010.*

<b>Propiedad</b>	<b>Unidades</b>	<b>Valor</b>
<b>Metano (CH<sub>4</sub>) Min.</b>	% vol	84.00
<b>Oxígeno (O<sub>2</sub>) Max.</b>	% vol	0.20
<b>Bióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) Max.</b>	% vol	3.00
<b>Nitrógeno (N<sub>2</sub>) Max.</b>	% vol	4.00
<b>Nitrógeno (Variación máxima diaria)</b>	% vol	±1.5
<b>Total de inertes (CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>) Max.</b>	%vol	4.00
<b>Etano Max.</b>	% vol	11.00
<b>Temperatura de rocío de hidrocarburos Max.</b>	K (°C)	271.15 (-2)

<b>Humedad (H<sub>2</sub>O) Max.</b>	mg/m <sup>3</sup>	110.00
<b>Poder calorífico superior Min.</b>	MJ/m <sup>3</sup>	37.30
<b>Poder calorífico superior Max.</b>	MJ/m <sup>3</sup>	43.60
<b>Índice Wobbe<sup>10</sup> Min.</b>	MJ/m <sup>3</sup>	48.20
<b>Índice Wobbe Max.</b>	MJ/m <sup>3</sup>	53.20
<b>Índice Wobbe (Variación máxima diaria)</b>	%	±5
<b>Ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) Max.</b>	mg/m <sup>3</sup>	6.00
<b>Azufre total (S) Max.</b>	mg/m <sup>3</sup>	150.00

Estas especificaciones serán las consideradas para el caso de estudio que nos compete, dado que constituye el gas natural comercializable y utilizado en México.

### 3.1.3 Usos del Gas Natural

El gas natural tiene una gran variedad de aplicaciones, el gas seco se utiliza principalmente como:

1. Combustible:
  - a. Para transporte vehicular.
  - b. En hogares (calefacción, calentadores de agua, estufas y hornos, etc.)
  - c. Comercial (aire acondicionado, calentadores de agua, etc.)
  - d. Industrial (generación de vapor, precalentamiento, secado, etc.)
2. Generación de energía eléctrica en plantas de ciclo combinado. Involucra la combustión del gas natural que produce gases de escape dirigidos a turbinas que generan energía eléctrica.
3. Materia prima para la elaboración de otros productos petroquímicos. Por su estructura simple puede ser convertido a otras moléculas como hidrógeno,

<sup>10</sup> **Índice Wobbe (W):** la relación del poder calorífico con respecto a la raíz cuadrada de la densidad relativa, este índice permite determinar si el gas natural tiene calidad intercambiable y está relacionado con el flujo de energía a través de los equipos que utilizan gas natural.

etileno o metanol que son precursores de plásticos y fertilizantes. Algunos de ellos son:



#### **Gas Seco**

- Fertilizantes nitrogenados
- Aditivos
- Anticongelantes
- Fumigantes
- Tintas



#### **Etano**

- Fibras
- Envases de Plástico
- Cremas y perfumes
- Rollos fotográficos
- Tuberías



#### **Naftas (Gasolinas Naturales)**

- Llantas
- Elastómeros
- Farmacéuticos y cosméticos
- Bolsas
- Insecticidas



#### **Propano**

- Fibras
- Acrílicos
- Pinturas
- Sacos para envasados
- Empaques

*Figura 3.3 Subproductos petroquímicos del Gas Natural. Fuente: Elaboración Propia.*

### 3.1.4 Ventajas del Gas Natural

Por las características antes mencionadas el gas natural presenta una variedad de ventajas que otros combustibles no. A continuación, se enlistarán algunas de estas ventajas para destacar su importancia en el marco energético global.

En cuanto a su formación, el gas natural es un hidrocarburo distinto al petróleo, en el sentido de que las condiciones geológicas para su formación son mucho menos complejas que aquellas que requiere el petróleo. Además de esto, el gas natural puede encontrarse a una variedad de profundidades que el petróleo no. Por esta razón, el gas natural es un recurso mucho más abundante y extendido a nivel mundial.

A pesar de que países del Medio Oriente y los países pertenecientes a la Comunidad de Estados Independientes (CEI, ex Unión Soviética) poseen aproximadamente el 70% de las reservas de gas mundiales, se han encontrado reservas de gas en todos los continentes y aún continúan estos hallazgos, esto responde a la incertidumbre y volatilidad de los precios del petróleo en las últimas décadas (Bhattacharyya, 2011). En la siguiente página se muestra la Figura 3.4 que representa la distribución de reservas de gas natural probadas en el mundo.

De esta figura se puede observar el aumento de las reservas mundiales de gas en el tiempo, lo que muestra la relevancia que ha cobrado para la seguridad energética global.

Por otro lado, el gas natural es la fuente de energía fósil más limpia, ya que emite menos gases contaminantes por unidad de energía producida. El gas natural emite 56.1 ton CO<sub>2</sub> por terajoule mientras que para el carbón y petróleo es de 73.3 ton CO<sub>2</sub> y 94.6 ton CO<sub>2</sub> respectivamente por terajoule (Bhattacharyya, 2011). Esto es un 30% menos de CO<sub>2</sub> que el petróleo y casi 70% menos que el carbón. Además de esto, su combustión no produce partículas sólidas y tampoco es corrosivo.

Por los motivos anteriores, aunados a la incertidumbre en los mercados energéticos y las preocupaciones actuales por el medio ambiente, el gas natural se perfila como el recurso energético predominante en el futuro cercano.

- Medio Oriente
- CEI
- Asia Pacífico
- Norteamérica
- África
- Sur y Centroamérica
- Europa

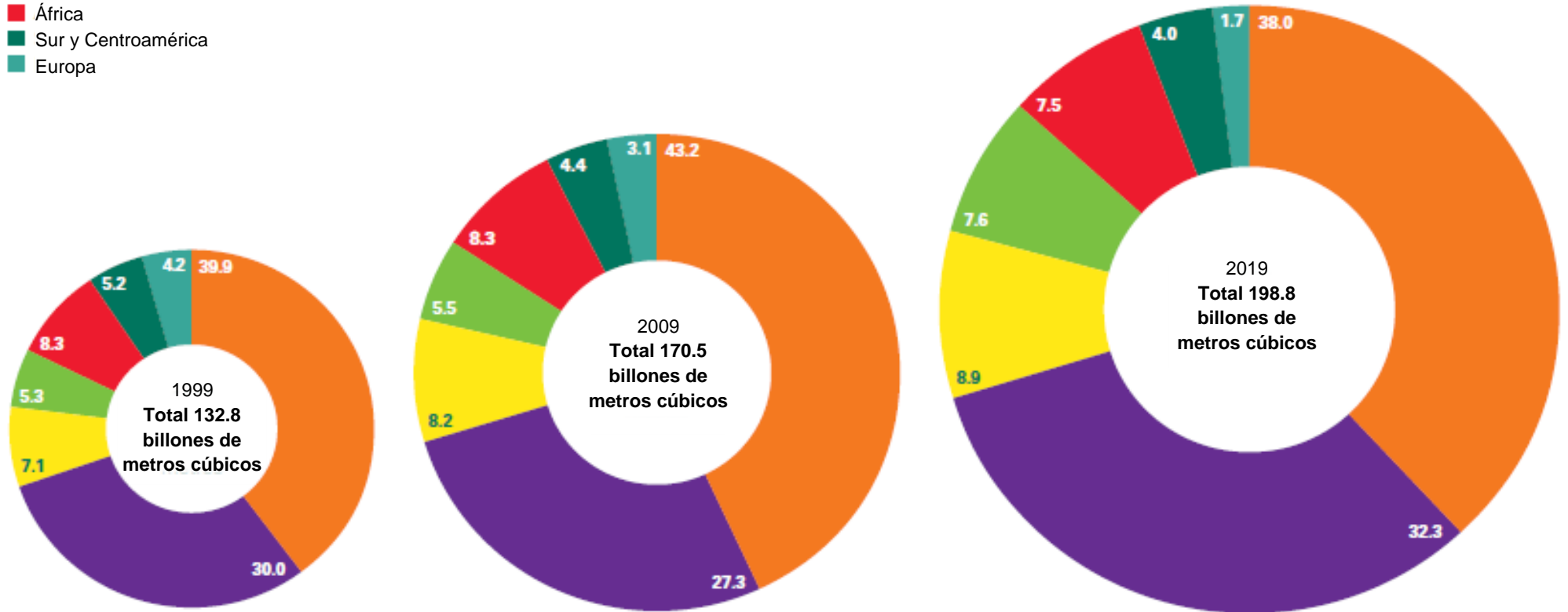


Figura 3.4 Distribución de reservas probadas de gas natural en el mundo en 1999, 2009 y 2019. Fuente: Tomada del BP Statistical Review of World Energy 2020.

## **3.2 Economía del Gas Natural**

### **3.2.1 Actividades de la Industria del Gas Natural**

La industria del gas natural está constituida por varias actividades de una alta complejidad a tanto a nivel técnico como intensivas en capital. Estas actividades incluyen la producción, recolección, tratamiento, almacenamiento, transporte por ducto o por otros medios (como gas natural licuado o comprimido), comercialización y distribución a usuarios finales.

La producción de gas natural involucra operaciones como la exploración, perforación y extracción en el sitio. Esta es la actividad que presenta los mayores requisitos en inversión de capital inicial por la necesidad de activos fijos y por los altos riesgos que conlleva desde la etapa de exploración. Adicionalmente, a medida que los campos son explotados se requiere de altas inversiones para mantener tasas de recuperación redituables en el proceso. Por estos motivos, esta actividad la suelen realizar compañías grandes y el mercado disponible es de un tamaño reducido.

El transporte de gas natural establece el enlace entre los productores y los usuarios finales. Esto se realiza principalmente mediante el uso de ductos de alta presión (similar a las redes de transmisión de la industria eléctrica) o por otras modalidades. Dichas instalaciones son esenciales para la industria y presentan una alta especificidad de activos (no permiten usos alternativos), esto provoca que la inversión sea alta durante las etapas iniciales. Además de esto, el costo es directamente proporcional al tamaño de la instalación, lo cual a su vez depende de la distancia y la demanda pico requerida en los sitios de aprovechamiento ya sean de tipo industrial, comercial o residencial. Consecuentemente los costos de transporte de gas natural y las características de la infraestructura requerida le dan la característica de monopolio natural (la duplicidad de infraestructura resulta en una opción económicamente inviable). Sin embargo, si los mercados se encuentran lo suficientemente desarrollados, y la demanda lo permite, se puede dar el caso de que coexista más de una línea de transporte de gas natural en el mismo sitio, por ejemplo, en países como Estados Unidos o Alemania (International Energy Agency, 2009).

El transporte de gas natural es complejo y la forma de ser transportado se decide principalmente por el costo. En general por estos costos, una pequeña fracción del gas producido se comercializa internacionalmente y el resto se aprovecha en las instalaciones cercanas o se inyecta a la infraestructura del país y el resto se quema

en el sitio. Entre las formas más comunes de transporte de gas natural está vía ducto o vía gas natural licuado o GNL, las cuales se abordarán a continuación.

El transporte de gas natural vía ducto se realiza mediante tuberías de alta presión, en las cuales se presuriza el gas natural de forma que se desplace de un punto de inicio a un punto final. La presurización se realiza mediante estaciones de compresión localizadas en puntos estratégicos de forma que se mantenga una velocidad constante del gas. El diseño de estas instalaciones radica en la combinación óptima entre la selección del diámetro de tubería y la potencia de las estaciones de compresión que resulte en los menores costos.



*Figura 3.5 Gasoducto Topolobampo en Sinaloa. Fuente: Tomada de <https://centrourbano.com/2018/07/19/construyen-gasoducto-chihuahua-sinaloa/>*

Por otro lado, el gas natural también puede ser transportado vía gas natural licuado o GNL. En esta modalidad, el gas natural recibe un tratamiento por el cual se remueven las impurezas y posteriormente es enfriado a una temperatura de  $-161^{\circ}\text{C}$ , la cual es la temperatura de fusión del metano (componente mayoritario del gas natural). Una vez licuado, el GNL es almacenado en contenedores criogénicos especiales reforzados con hormigón y acero. Esto reduce su volumen en aproximadamente 600 veces, volviéndolo fácil de transportar en grandes volúmenes.

Posteriormente, este gas se transfiere a buques especiales de gran calado, llamados comúnmente buques metaneros o gaseros. Estos son altamente especializados para mantener dichas temperaturas y presiones a lo largo de todo el

recorrido marítimo. Dichos buques tienen una capacidad de entre 100 mil y 260 mil metros cúbicos de gas.



*Figura 3.6 Buque metanero “LNG Akwa Ibom”.*

*Fuente: Tomada de: <https://www.puentedemando.com/el-buque-metanero-Ing-akwa-ibom-en-santa-cruz-de-tenerife/>*

Una vez transportado el GNL, este requiere otro complejo proceso para llevar el gas natural a temperaturas y presiones atmosféricas de manera que pueda ser inyectado en la infraestructura existente del país que recibe el gas.

Independientemente de la modalidad de transporte, ambas incurren en altos costos por su complejidad técnica y económica; sin embargo, existen casos en donde estos costos están justificados, lo que abre el mercado de comercialización de gas natural entre los países.

La distribución involucra la entrega de gas natural a los consumidores finales mediante el uso de redes de ductos a bajas presiones (similar a las redes de distribución eléctrica). La inversión necesaria depende en gran medida de la demanda pico que requiere el sistema y de los patrones de consumo de los usuarios. De la misma forma esta actividad se considera un monopolio natural.

Finalmente, la comercialización es una actividad de compra/venta mediante intermediarios, ya sean mayoristas o minoristas, en la cual no se requiere de mucha inversión ni infraestructura. Por sus características, es uno de los sectores más competitivos de la industria.

En estas actividades, la continuidad de la oferta y la integridad de la infraestructura son las principales preocupaciones de la industria. Al igual que en la industria eléctrica, la demanda por gas natural responde a variaciones diarias y estacionales. Dichas variantes también dependen de la región y país del que se trate. Como resultado de esto, la industria del gas natural requiere de una coordinación y cooperación impecable entre sus participantes para asegurar una correcta operación de los sistemas de transporte y distribución.

En el caso del transporte por ductos, para la correcta operación de estos sistemas se deben observar ciertos factores críticos, entre ellos el control de la presión interna de los ductos, el balance de cargas a transportar o distribuir, los cambios de ruta durante la operación de la línea, los sistemas de almacenamiento que intervienen y la calidad del gas. En general, los países han adoptado la idea de establecer un operador del sistema, un sujeto con la facultad y responsabilidad de programar y despachar a los participantes del mercado. Esta figura cobra importancia a medida que aumenta la complejidad del sistema ya que, incluso una interrupción momentánea del suministro puede llevar a fugas, incendios y explosiones en la red.

### **3.2.2 Estado del Mercado Mundial de Gas Natural**

El gas natural ha cobrado relevancia en la mayor parte de los países desarrollados derivado de las razones antes mencionadas. A continuación, se presentará la producción y el consumo a nivel mundial de gas natural para otorgar una perspectiva de su importancia.

La producción de gas natural a nivel mundial por región fue la siguiente:

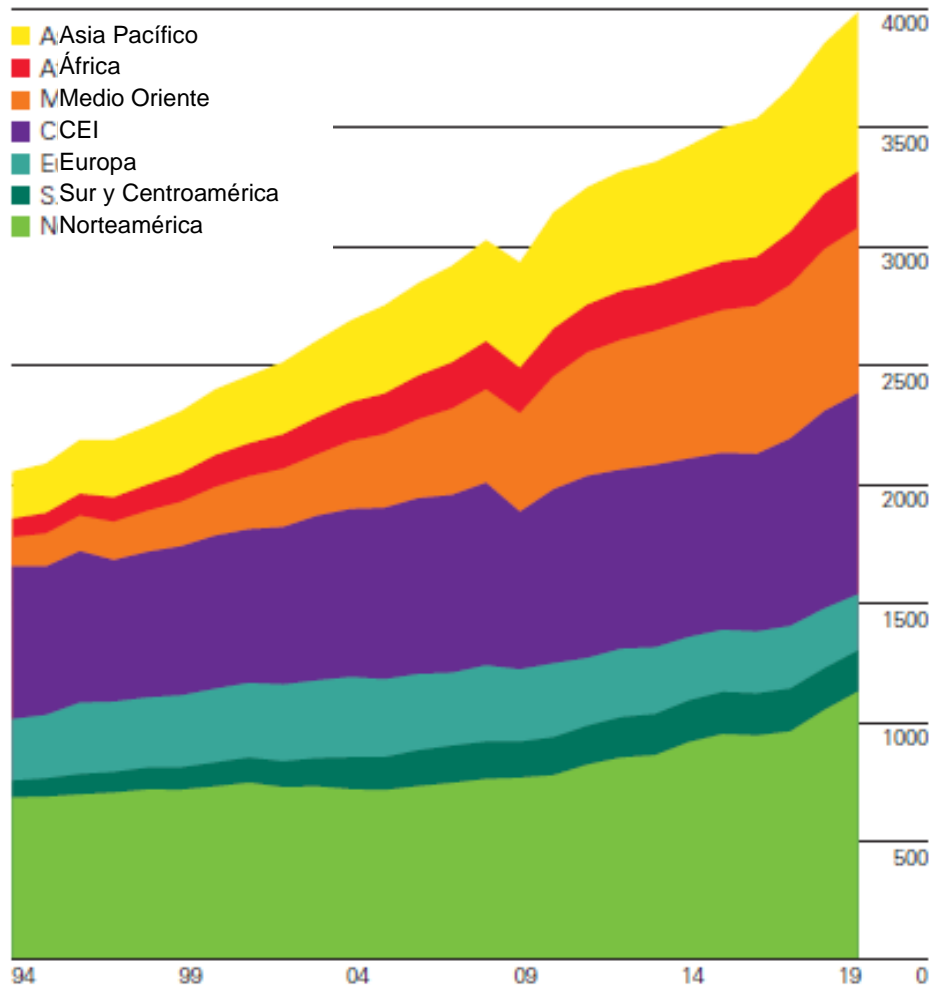


Figura 3.7 Producción mundial de gas natural por región en billones de metros cúbicos a partir de 1994. Fuente: Tomada del BP Statistical Review of World Energy 2020.

La producción total a nivel mundial en 2019 fue de 3989.3 billones de metros cúbicos con una participación del 16.8% por parte de la región Asia Pacífico; del 6% por parte de África; del 17.4% por parte de Medio Oriente; del 21.2% por parte de los países pertenecientes al CEI (Comunidad de Estados Independientes); del 5.9% por parte de Europa; del 4.4% por parte de Sur y Centroamérica, y del 28.3% por parte de Norteamérica.

Como se puede observar, la región de Norteamérica es la región con la mayor participación en cuanto a producción de gas natural en el mundo, a pesar de contar con menos del 10% de reservas probadas en el mundo. A esta región pertenece México; sin embargo, México solo produjo 34 billones de metros cúbicos de gas

natural en el 2019 de los 1128 billones de metros cúbicos que produjo la región en el mismo año divididos entre Canadá y Estados Unidos. En resumen, México se encuentra en una región de alta producción de gas natural pero no produce en cantidades significativas.

Además de esto, se puede observar el crecimiento progresivo de producción de gas natural en todas las regiones del mundo, siendo aproximadamente de 2.4% a nivel mundial a partir de 2008. (BP p.l.c., 2020) Por esta razón, se puede corroborar la creciente importancia del gas natural.

En cuanto al consumo mundial de gas natural se tienen los siguientes datos:

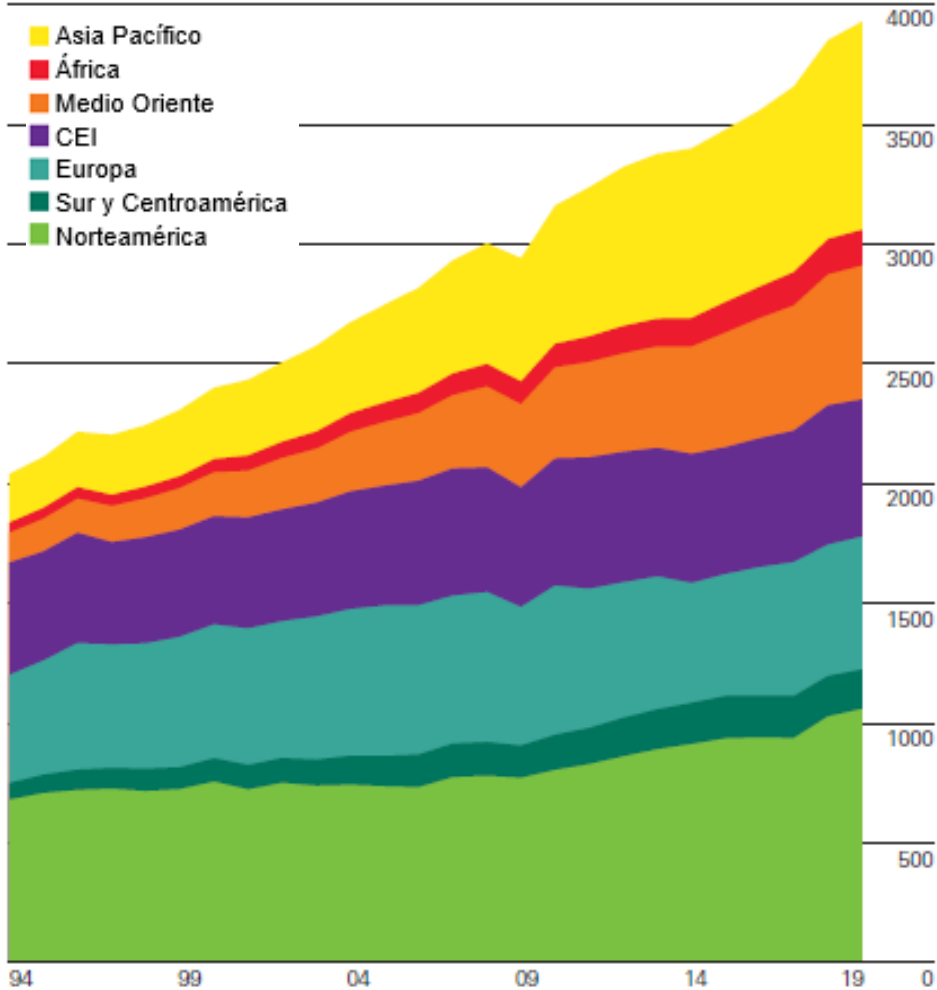


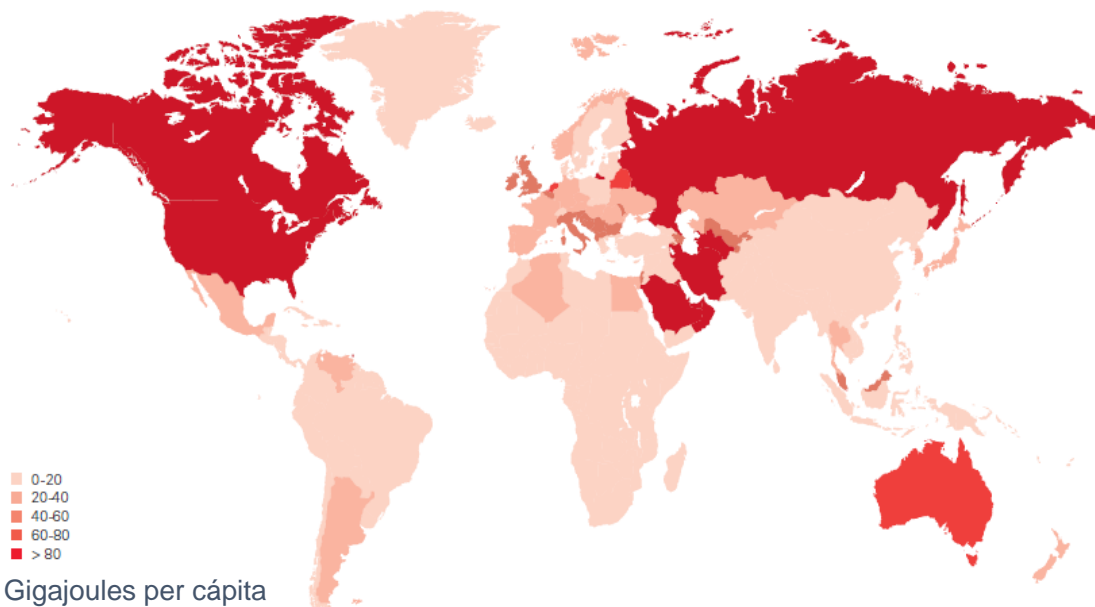
Figura 3.8 Consumo mundial de gas natural por región en billones de metros cúbicos a partir de 1994. Fuente: Tomada del BP Statistical Review of World Energy 2020.

El consumo total a nivel mundial en 2019 fue de 3929.2 billones de metros cúbicos con una participación del 22.1% por parte de la región Asia Pacífico; del 3.8% por parte de África; del 14.2% por parte de Medio Oriente; del 14.6% por parte de los países pertenecientes al CEI (Comunidad de Estados Independientes); del 14.1% por parte de Europa; del 4.2% por parte de Sur y Centroamérica, y del 26.9% por parte de Norteamérica.

La región de Norteamérica también es la región con el mayor consumo de gas natural, a pesar de contar con muy bajas reservas probadas en el mundo en comparación con otras regiones. México consumió 90.7 billones de metros cúbicos de gas natural en el 2019, comparándolo con lo expuesto anteriormente, esto es más del doble de lo que produjo en ese mismo año. En resumen, México consume mucho más gas natural del que produce, lo cual implica que este recurso es adquirido a través del intercambio con otras naciones, principalmente Estados Unidos.

Además de esto, se puede observar de igual forma un crecimiento progresivo y constante de consumo de gas natural en todas las regiones del mundo, siendo aproximadamente de 2.5% a nivel mundial a partir de 2008, (BP p.l.c., 2020) lo cual concuerda con lo expuesto anteriormente.

Adicionalmente se muestra a continuación un mapa en el que se identifican los mayores consumidores per cápita de gas natural en el mundo:



*Figura 3.9 Consumo per cápita de gas natural en 2019. Fuente: Tomada del BP Statistical Review of World Energy 2020.*

Se puede observar en este mapa que el consumo de gas natural tiene a coincidir con las regiones de más desarrollo del mundo, excepto para el caso de China, el cual es más conocido por utilizar mayoritariamente carbón para sus necesidades energéticas.

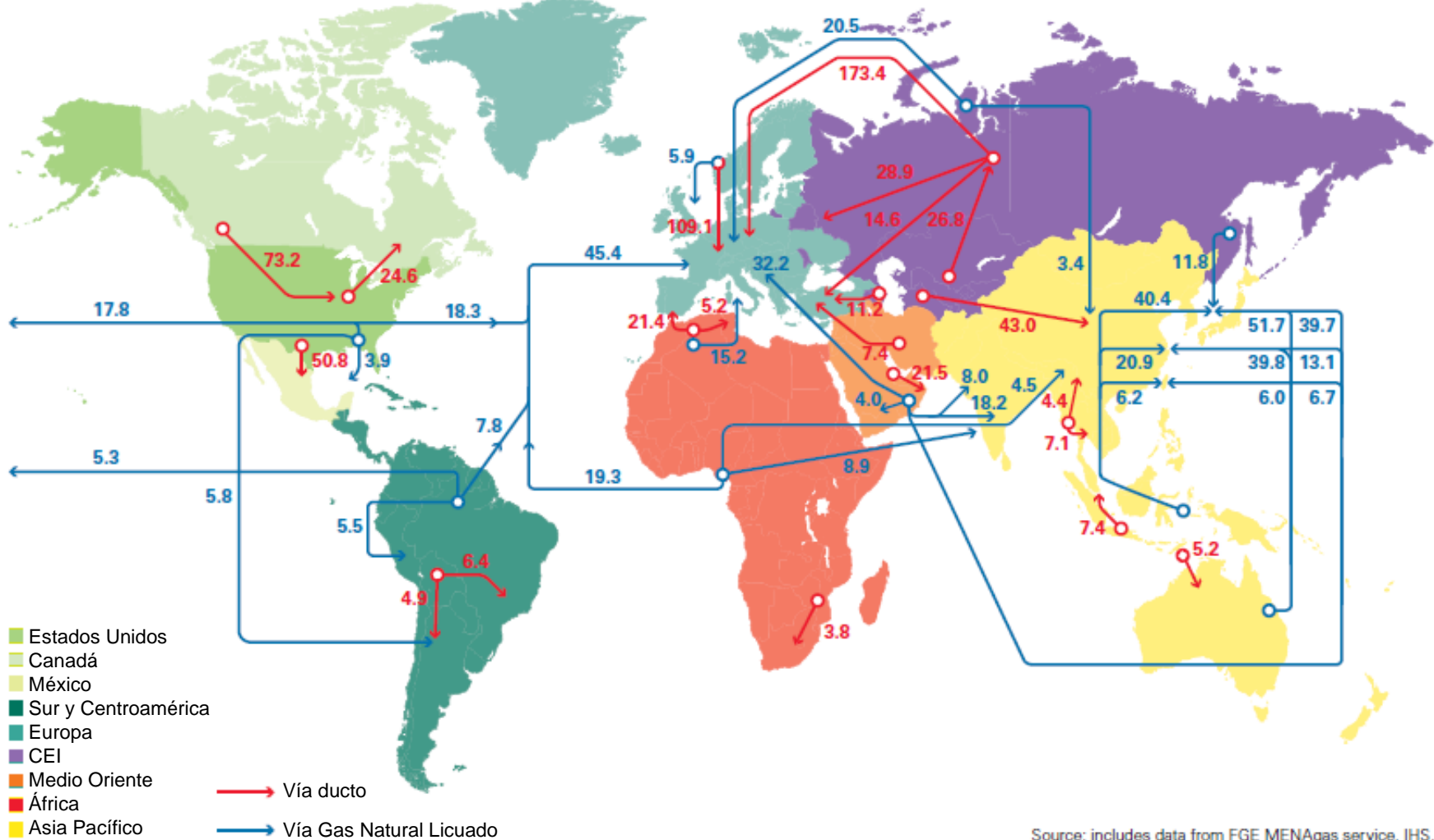
De esto, se puede concluir que el gas natural se encuentra presente a nivel global y cada año que pasa aumenta esta relevancia, por lo que la seguridad y continuidad del suministro energético se vuelve una preocupación global.

Para concluir este apartado, en la siguiente figura se presentarán los intercambios comerciales de mayor relevancia a nivel mundial y lo que esto implica para México.

Se puede observar que existe una gran cantidad de rutas marítimas (GNL) de comercio; sin embargo, dichas rutas suelen ser de volúmenes más pequeños en comparación con el volumen transportado vía ducto. Adicionalmente, se observa también que los mayores exportadores de gas natural son Rusia, Estados Unidos y la región de Medio Oriente.

Por otro lado, se advierte que existe una ruta de gran volumen vía ducto de Estados Unidos a México, ruta por la cual México obtiene la mayor parte de sus importaciones de gas natural y la cual será abordada en el siguiente apartado.

**Major trade movements 2019**  
Trade flows worldwide (billion cubic metres)



Source: includes data from FGE MENAgas service, IHS.

Figura 3.10 Intercambios comerciales de gas natural en 2019. (Billones de metros cúbicos) Fuente: BP Statistical Review of World Energy 2020

### 3.2.3 Estado del Mercado Nacional de Gas Natural

A partir de la Reforma Energética promulgada el 20 de diciembre de 2013, México ha pasado a través de un cambio total en el paradigma de sus mercados energéticos. Estos cambios han significado una apertura casi total de una industria dominada por el monopolio de la empresa paraestatal Petróleos Mexicanos (PEMEX) y centrada casi por completo en el petróleo y sus derivados.

Esta reforma comenzó como un esfuerzo para modernizar y diversificar la matriz energética del país, así como mejorar la economía e incrementar la competitividad internacional, después de un largo periodo marcado por la disminución de producción y exportación de petróleo, así como de una importante dependencia del presupuesto público en los ingresos de este recurso.

Como resultado de esto, se espera contar con un sector energético más sustentable, eficiente, transparente y productivo. En este contexto, el gas natural ha tenido un papel central en este periodo de transición posterior a la Reforma Energética. A continuación, se presentará un panorama general de la importancia en México de este recurso.

De acuerdo con la Prospectiva de Gas Natural 2018-2032 la demanda nacional histórica de gas natural de 2007 a 2017 ha sido la siguiente:

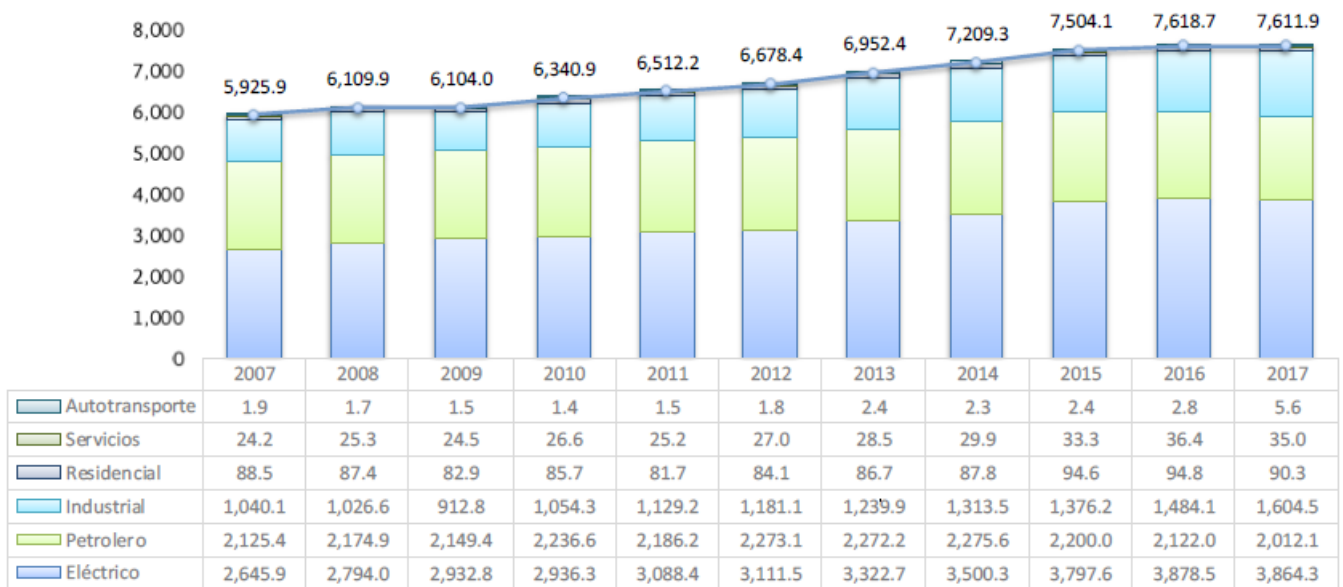


Figura 3.11 Demanda Nacional Histórica de Gas Natural (MMPCD) Fuente: Tomada de la Secretaría de Energía: Prospectiva de Gas Natural 2018-2032.

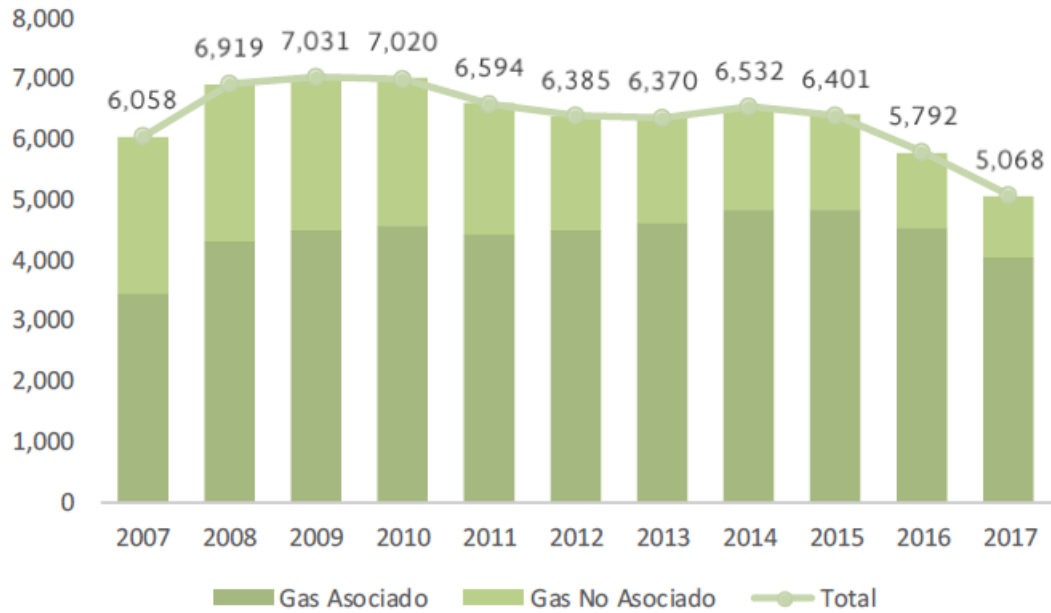
Se puede observar de esta gráfica que la demanda de gas natural ha aumentado constantemente de 5,925.9 MMPCD (millones de pies cúbicos por día) en 2007, a 7,611.9 MMPCD en 2017, un incremento de 28.4%, lo cual muestra la relevancia cada vez mayor que ha adquirido este recurso en las últimas décadas a nivel nacional.

Este aumento es principalmente debido al incremento en la generación de energía eléctrica a través de la tecnología de plantas de ciclo combinado. Este crecimiento se puede notar particularmente en el sector industrial, donde la demanda se ha incrementado más del 50% en un periodo de 10 años. Esto debido a las ventajas que habíamos mencionado anteriormente como su mayor eficiencia energética y menor impacto al medio ambiente.

Por otro lado, en cuanto al sector autotransporte este cambio no es tan discernible debido a la prevalencia de combustibles como la gasolina y el diésel; sin embargo, a últimos años se ha popularizado el uso de gas natural vehicular en forma de gas natural comprimido o licuado y se espera que esta tendencia continúe.

Para el sector servicios y residencial, el uso del gas natural no ha aumentado en gran medida por dos motivos, el alto costo de desarrollo de infraestructura en zonas urbanas y la competencia con otros combustibles de más fácil acceso como el gas licuado de petróleo y la leña que aún dominan una parte significativa del mercado. El sector petrolero tampoco presenta cambios tan perceptibles debido a la disponibilidad y menores costos de combustibles derivados del petróleo dentro de las mismas instalaciones para su propio aprovechamiento.

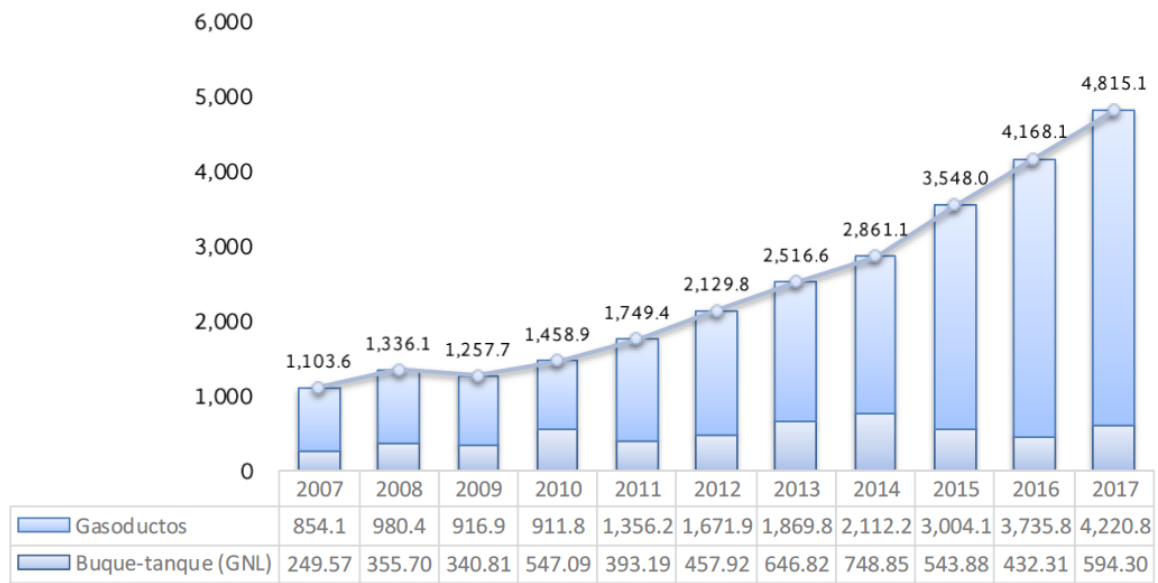
De acuerdo con la Prospectiva de Gas Natural 2018-2032 la producción nacional histórica de gas natural con nitrógeno de 2007 a 2017 ha sido la siguiente:



*Figura 3.12 Producción Nacional Histórica de Gas Natural (MMPCD) Fuente: Tomada de la Secretaría de Energía: Prospectiva de Gas Natural 2018-2032*

A partir de esta gráfica es notable que la producción nacional ha ido decreciendo constantemente a partir de 2009, con una producción de 5,068 MMPCD (millones de pies cúbicos por día) en 2017. Esta producción es sostenida casi en su totalidad por PEMEX, el cual ha priorizado principalmente las reparaciones y estimulaciones de los pozos existentes y, en menor medida, la incorporación de nuevos campos (Secretaría de Energía, 2018). Esta reducción supone un riesgo para la seguridad energética del país y para la satisfacción de la demanda nacional de gas requerida.

Esta baja constante en la producción nacional de gas natural y el aumento de la demanda debido a un mayor consumo, principalmente por el sector eléctrico, ha resultado en un aumento drástico en las importaciones de gas natural al interior del país. Este incremento de las importaciones se muestra en la figura siguiente:



*Figura 3.13 Producción Nacional Histórica de Gas Natural (MMPCD) Fuente: Tomada de la Secretaría de Energía: Prospectiva de Gas Natural 2018-2032*

Mientras que en 2007 las importaciones de gas natural eran de 1,103 MMPCD, en 2017 las importaciones ascendieron hasta 4,815 MMPCD de gas natural. Este volumen ha sido importado principalmente a través de gasoductos y, en menor medida, como Gas Natural Licuado por medio de buque-tanques.

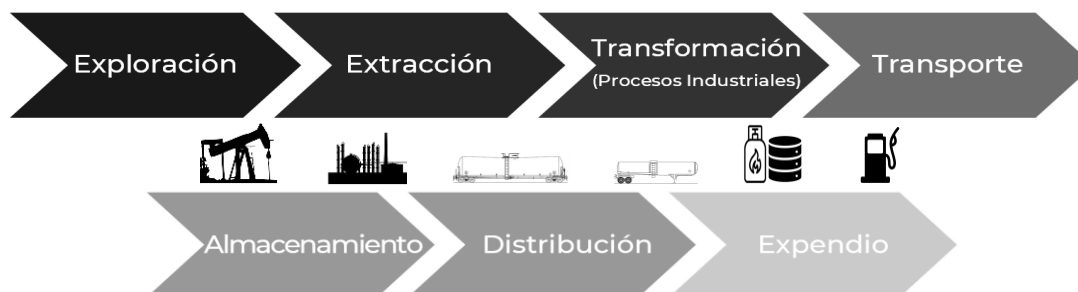
Este aumento ha sido sustentado principalmente por el comercio con Estados Unidos gracias al desarrollo de infraestructura para el transporte por ducto en el norte del país, lo cual ha promovido el desarrollo de este mercado en los últimos años. Este intercambio comercial con Estados Unidos representa el 85% del total de las importaciones de gas natural en 2017, con el porcentaje restante siendo importado a través de buque-tanques (Secretaría de Energía, 2017). Adicionalmente, de acuerdo con el Balance de Energía 2017, el gas natural importado en ese año corresponde al 77% del gas consumido en ese periodo, dicha tendencia se espera que continúe durante los próximos años en tanto la producción nacional y la incorporación de nuevos campos gasíferos no aumente.

Por estos motivos, se resalta aún más la importancia de la preservación de la integridad de la infraestructura de transporte de gas natural que conduce este valioso energético a las centrales eléctricas que mantienen el funcionamiento y las actividades económicas diarias del país. Por lo cual, el transporte de gas natural es un sector crítico para mantener la estabilidad de la matriz energética nacional.

### 3.3 Marco Regulatorio del Gas Natural en México

#### 3.3.1 Organismos de la Administración Pública Federal que intervienen en el transporte de gas natural por ducto

Hasta este punto, se ha dado una breve revisión sobre las características y usos del gas natural, se ha presentado su relevancia en el contexto global y nacional y se ha destacado su importancia para el sector energético. De manera breve el transporte de gas natural se encuentra inmerso en una cadena de actividades que van desde la extracción del energético hasta la distribución de este recurso a usuarios finales. A manera de resumen, se muestra la siguiente figura, la cual ilustra las actividades principales de esta cadena de valor:



*Figura 3.14 Actividades principales del Sector Hidrocarburos. Fuente: Elaboración propia*

Esta cadena de valor está regulada por más de una institución de acuerdo con lo indicado en la Ley de Hidrocarburos, que se emitió a partir de la Reforma Constitucional en Materia Energética promulgada el 20 de diciembre de 2013. De acuerdo con la ley, las siguientes atribuciones se establecen para las siguientes instituciones:

1. Secretaría de Energía (SENER): Le corresponde el diseño de la Política Nacional Energética, la cual consiste, entre otras actividades, en la:
  - a) Elaboración de la Política de Suministro, que incluye la importación y exportación de energía.
  - b) Instrucción de proyectos estratégicos y sociales.
  - c) Opinión sobre la expansión de las redes de distribución de gas natural.



**SENER**  
SECRETARÍA DE ENERGÍA

*Figura 3.15 Logotipo institucional de la SENER*

2. Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH): Le corresponde la administración y regulación de las actividades de exploración y extracción de hidrocarburos, la cual consiste, entre otras actividades, en la:
  - a) Dictaminación de proyectos de exploración y extracción de hidrocarburos del subsuelo.
  - b) Administración de contratos y asignaciones de exploración y extracción de hidrocarburos en el territorio nacional.
  - c) Elaboración de la información estadística y de reservas de hidrocarburos en el subsuelo.



Comisión Nacional  
de Hidrocarburos

*Figura 3.16 Logotipo institucional de la CNH*

3. Comisión Reguladora de Energía (CRE): Le corresponde la administración y regulación de las actividades de transporte, almacenamiento, distribución, comercialización y expendio de hidrocarburos, el cual consiste, entre otras actividades, en la:
  - a) Emisión de permisos de transporte, almacenamiento, distribución, comercialización y expendio de hidrocarburos.
  - b) Regulación del mercado de hidrocarburos a través de la definición de precios máximos y normas de calidad de producto.
  - c) Elaboración de la información estadística de tipo económico del mercado de hidrocarburos.



*Figura 3.17 Logotipo institucional de la CRE*

4. Agencia Nacional de Seguridad Industrial y de Protección al Medio Ambiente Del Sector Hidrocarburos (ASEA): Le corresponde la regulación de la seguridad industrial, operativa y de protección al medio ambiente para todas las actividades de la cadena de valor del sector hidrocarburos, la cual incluye, entre otras actividades, en la:
- a) Elaboración de normatividad técnica en temas de seguridad industrial para las actividades relacionadas con el sector hidrocarburos.
  - b) Emisión de autorizaciones técnicas a los regulados en dichas actividades.
  - c) Verificación y supervisión de las instalaciones de dicho sector.



*Figura 3.18 Logotipo institucional de la ASEA*

A manera de resumen, en la siguiente figura se ilustra como interactúan las diferentes instancias reguladoras en la cadena de valor del sector hidrocarburos junto con las actividades que son de su atribución:

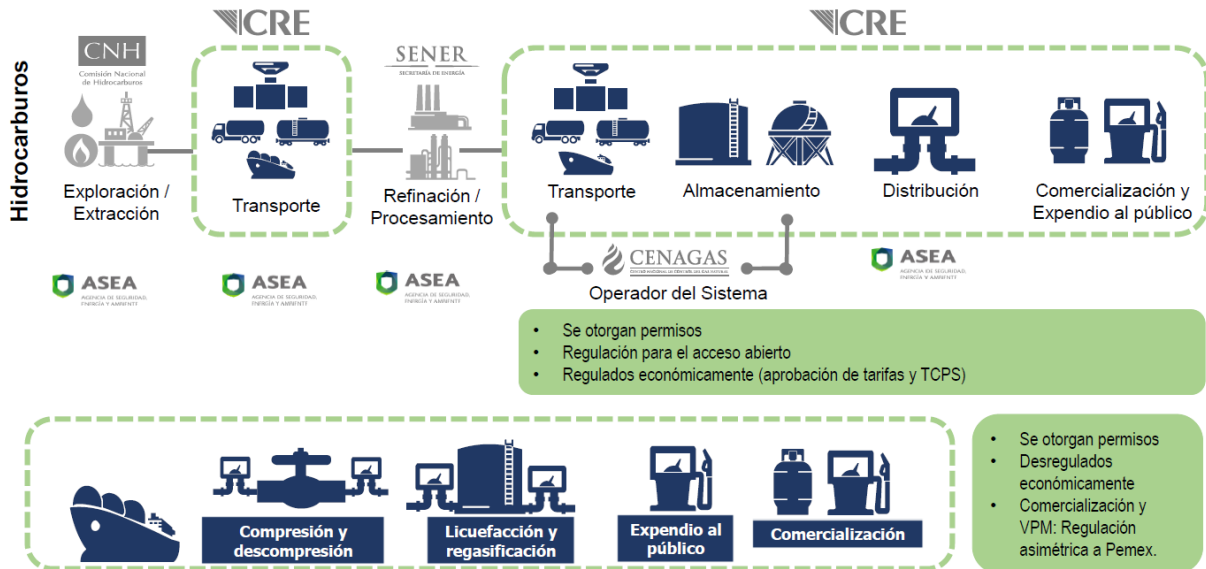


Figura 3.19 Regulación actual en la cadena de valor del sector hidrocarburos.  
Fuente: Tomada del material expuesto en *Economía y Derecho de la Regulación y Contratos Energéticos* impartida en septiembre de 2019.

Adicionalmente, es importante mencionar una institución más que, si bien no es regulador del sector energético, lleva a cabo una labor muy importante en relación con el transporte de gas natural por medio de ductos, institución conocida como el Centro Nacional de Control de Gas Natural o CENAGAS.



Figura 3.20 Logotipo institucional del CENAGAS

El CENAGAS tiene por objeto gestionar, administrar y operar de manera independiente el SISTRANGAS, para garantizar la continuidad y seguridad en la prestación de los servicios de transporte y almacenamiento en dicho sistema, con el propósito de ampliar la cobertura o aportar beneficios sistémicos en términos de mejoras en las condiciones de seguridad, continuidad, calidad y eficiencia en la prestación de los servicios, con el fin de contribuir al suministro eficiente de gas natural en el país (ESTATUTO Orgánico del Centro Nacional de Control del Gas Natural, 2016).

El CENAGAS cumple dos roles distintos en la actividad de transporte de gas natural por medio de ductos. Esto con la finalidad de asegurar la confianza en el suministro de gas natural a los usuarios y evitar las congestiones en el sistema derivado de una conducción incorrecta del gas natural, así como para prever actividades de paro, arranque y mantenimientos programados en los ductos más importantes del país. Estas dos funciones son la de:

1. Gestor Independiente del Sistema de Transporte y Almacenamiento de Gas Natural (SISTRANGAS), y
2. Titular del Permiso de Transporte de Gas Natural por medio de ductos para el Sistema Nacional de Gasoductos.

Como parte de estas funciones, en la siguiente tabla se muestran las diferencias entre cada una de estas funciones, las cuales son de suma importancia para asegurar el suministro de gas a lo largo de todo el territorio nacional:

*Tabla 10. Funciones del CENAGAS.*

*Fuente: Tomada del material expuesto en Economía y Derecho de la Regulación y Contratos Energéticos impartida en septiembre de 2019.*

<b>CENAGAS GESTOR</b>	<b>CENAGAS TRANSPORTISTA</b>
<b>Gestionar y administrar</b> el SISTRANGAS, así como ductos y plantas de almacenamiento vinculadas a ductos de internación de gas natural que estén interconectados con el Sistema.	<b>Operar y mantener</b> directamente o través de un tercero, la infraestructura de transporte y almacenamiento de la que sea titular, de conformidad con el o los permisos.
<b>Determinar y asignar</b> la capacidad disponible del SISTRANGAS.	<b>Supervisar</b> la ejecución y el cumplimiento de las obligaciones derivadas de sus permisos de transporte por ductos y almacenamiento,
<b>Licitación</b> los proyectos estratégicos de infraestructura de transporte y almacenamiento de gas natural.	<b>Supervisar</b> que las actividades de transporte por ductos y almacenamiento de gas natural de los que sea titular se realicen de acuerdo con los programas de seguridad industrial, salud en el trabajo y protección ambiental.

CENAGAS GESTOR	CENAGAS TRANSPORTISTA
<b>Gestionar</b> los actos jurídicos y demás acciones necesarias para que los permisionarios lleven a cabo la prestación de los servicios	<b>Operar</b> el sistema Integrado, que incluye al Sistema Nacional de Gasoductos y a los sistemas integrantes.
<b>Realizar</b> los procesos de compensación de ingresos a los permisionarios y demás personas involucradas en los contratos cuya gestión esté a su cargo.	
<b>Fomentar</b> el desarrollo del mercado secundario de la capacidad del Sistema.	

### 3.3.2 Cadena de valor del sector hidrocarburos

Como se mencionó anteriormente, la ASEA se encarga de supervisar y emitir la regulación en materia de seguridad industrial, operativa y protección ambiental del sector hidrocarburos. En el contexto mundial, la ASEA es un organismo regulador único en su tipo ya que tiene la facultad, atribución y obligación de regular la totalidad de las actividades de la cadena de valor del sector hidrocarburos en México. Esto abarca desde la exploración y extracción de hidrocarburos, comúnmente llamado *upstream*; la producción, transporte y almacenamiento, conocido como *midstream*, y finalmente la distribución, venta al por menor o expendio en estaciones de servicio, denominado *downstream*. (Massa Roldán, 2018)

Es por sus amplias atribuciones que una de las prioridades de la ASEA al inicio de sus actividades fue representar de manera gráfica la totalidad de las actividades que integran esta cadena de valor; así como las regulaciones e instrumentos jurídicos aplicables a cada una de ellas, principalmente Normas Oficiales Mexicanas (NOM) y Disposiciones Administrativas de Carácter General (DACG).

Gracias a este esfuerzo, la ASEA logró identificar cada una de las áreas en las cuales es relevante emitir regulación de carácter técnico para salvaguardar la seguridad industrial, operativa y la protección al ambiente dentro del sector hidrocarburos y la cual se presentará en la siguiente figura. Dicha cadena de valor nos permite conocer cómo se interrelacionan las actividades del sector hidrocarburos, así como los instrumentos normativos de cumplimiento obligatorio que cada actividad requiere.

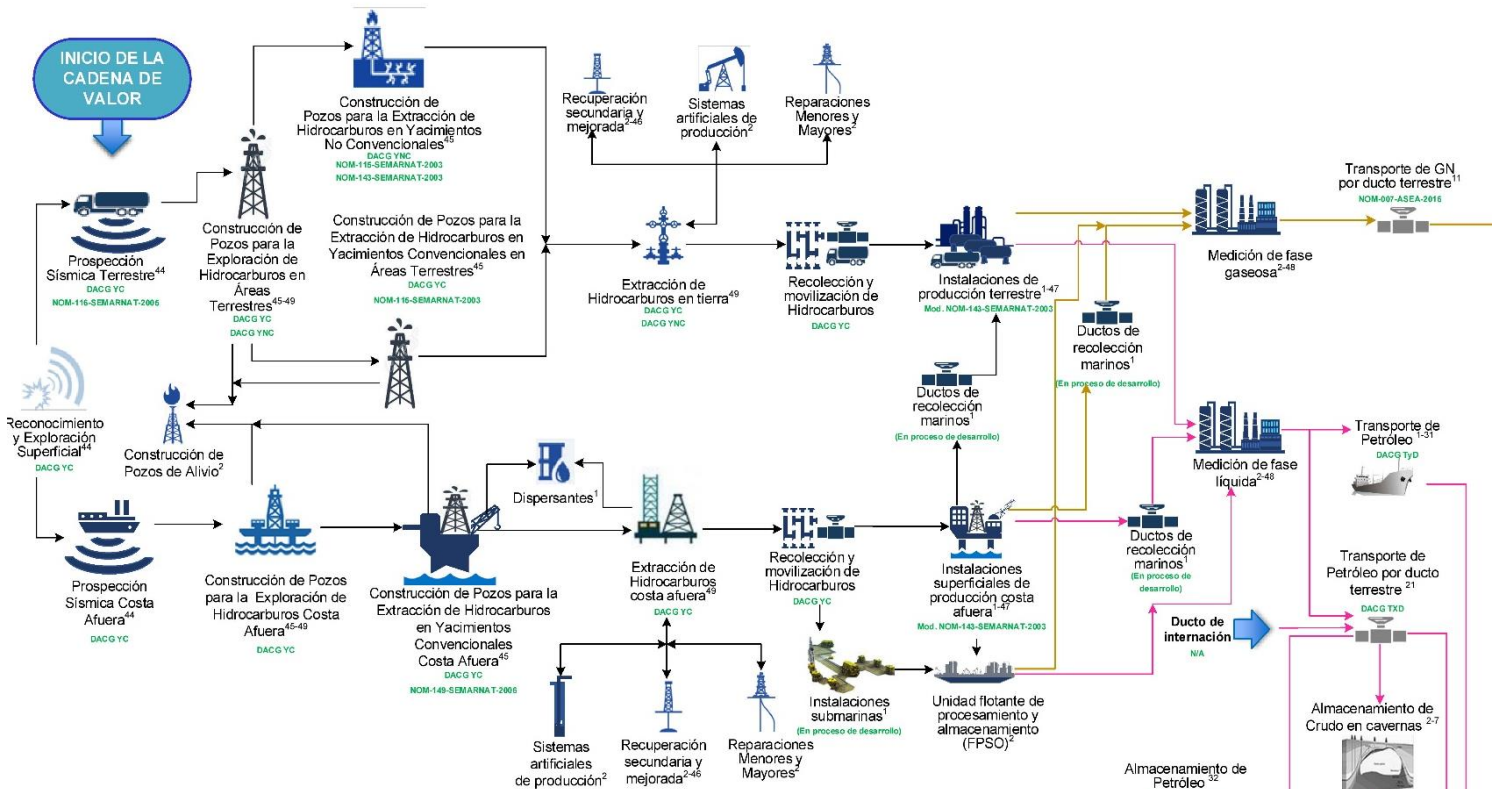
Es notable mencionar que, gracias a esto, podemos observar que las actividades de la cadena de valor están estrechamente interrelacionadas entre sí y que dependen unas de otras para tener un sector energético que funcione de forma coordinada y eficiente. Es decir, si la actividad de alguna parte de la cadena de valor es interrumpida por eventos no previstos, las actividades antecedentes y subsecuentes se ven impactadas de forma importante.

De las figuras 3.21 y 3.22 (a continuación), se identifica el transporte de gas natural en diversos puntos de la cadena de valor del sector hidrocarburos, las cuales son:

- Posterior a la extracción de gas natural en pozos, ya sea en instalaciones de producción terrestres o marítimas.
- Posterior a instalaciones de procesamiento de gas natural.
- Posterior a instalaciones de almacenamiento de gas natural.
- Posterior a terminales de regasificación de gas natural.
- Previo a su ingreso a las redes de distribución de gas natural.
- Previo a instalaciones de licuefacción o compresión de gas natural.

La correcta identificación de la actividad en su contexto es el primer paso para distinguir las situaciones de peligro y evaluar los riesgos asociados, así como para conocer y priorizar la infraestructura crítica para el desarrollo de dicha actividad.

# CADENA DE VALOR DEL SECTOR HIDROCARBUROS



## REGULACIONES TRANSVERSALES

	DAGG	NORMAS	GUÍAS
<b>DAGG</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>DAGG SASBOPA y DAGG SASBOPA para TYD</li> <li>DAGG seguros</li> <li>DAGG seguros</li> <li>DAGG Auditorías de SASBOPA</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>DAGG IA1</li> <li>DAGG ICN</li> <li>DAGG MF</li> <li>DAGG Terceros</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>DAGG PRE</li> <li>DAGG COA</li> <li>DAGG COA</li> </ul>
<b>NORMAS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>NOM-09-ASEA-2017</li> <li>NOM-007-ASEA-2018</li> <li>NOM RME</li> <li>NOM-05</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>DAGG IA1</li> <li>DAGG ICN</li> <li>DAGG MF</li> <li>DAGG Terceros</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>DAGG PRE</li> <li>DAGG COA</li> <li>DAGG COA</li> </ul>
<b>GUÍAS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Guía para la construcción de SASBOPA aplicable a las actividades de expendio al público de gas natural, gas licuado de petróleo y petrolíferos.</li> <li>Guía de Inspección Basada en Riesgo</li> <li>Guía para la Revisión de Seguridad de Pre-namque</li> <li>Guía para la Elaboración del Análisis de Riesgo para el Sector Hidrocarburos</li> <li>Guía LOPA<sup>7</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>DAGG IA1</li> <li>DAGG ICN</li> <li>DAGG MF</li> <li>DAGG Terceros</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>DAGG PRE</li> <li>DAGG COA</li> <li>DAGG COA</li> </ul>

## NOTAS

- ➔ Hidrocarburo
  - ➔ Gas Natural
  - ➔ Fase Líquida
  - ➔ Gas Licuado de Petróleo (GLP)
  - ➔ Petroquímicos
  - ➔ Petroíferos, excepto GLP
1. Regulación en desarrollo.
  2. Regulación aplicable. Ley de Hidrocarburos, art. 51, fracción I.
  3. La actividad de descompresión la realiza el distribuidor.
  4. Existen Normas de SCT aplicables.
  5. La regulación aplica solo cuando se transporta el GN desde una instalación de regasificación costa afuera.
  6. La regulación aplica solo cuando se llevan a cabo operaciones de tránsito de una unidad de Transporte y Distribución a otra.
  50. Verificar los criterios establecidos en ASEA-CRT-002-2019.
  51. Verificar los criterios establecidos en ASEA-CRT-003-2019.
  52. Verificar los criterios establecidos en ASEA-CRT-004-2019.

## NOMENCLATURA

ASEA	Agencia de Seguridad, Energía y Ambiente
CNH	Comisión Nacional de Hidrocarburos
DAGG	Comisión Reguladora de Energía
CDCE	Disposiciones Administrativas de Carácter General
FPSO	Floating, Production, Storage and Offloading
FSRU	Floating Storage and Regasification Unit
GN	Gas Natural
GNL	Gas Natural Licuado
GNL	Gas Natural Licuado
GLP	Gas Licuado de Petróleo
IES	Instalación de Expendio Simultáneo
NA	No aplica Regulación de la ASEA, corresponde a otra institución Reguladora.
SENER	Secretaría de Energía
TV	Través
TXD	Transporte por Ducto
TYD	Transporte y Distribución
YC	Yacimiento Convencional
YNC	Yacimiento no Convencional

## PERMISOS Y AUTORIZACIONES

7. Procesamiento de gas natural - SENER
8. Licuación de gas natural - CRE
9. Almacenamiento de gas natural - CRE
10. Regasificación de gas natural - CRE
11. Transporte de gas natural por medio de ductos - CRE
12. Transporte de gas natural por medio de ductos para usas propias - CRE
13. Transporte de gas natural por medios distintos a ductos - CRE
14. Compresión de gas natural - CRE
15. Descompresión de gas natural - CRE
16. Distribución de gas natural por medio de ductos - CRE
17. Distribución de gas natural por medios distintos a ductos - CRE
18. Expendio al público de gas natural comprimido para uso vehicular en estación de servicio - CRE
19. No definida - Nueva modalidad
20. Expendio en estación de servicio multimodal - CRE
21. Transporte de petróleo por medio de ducto - CRE
22. Refinación de petróleo - SENER
23. Almacenamiento de gas licuado de petróleo - CRE
24. Transporte por medio de ducto de gas licuado de petróleo - CRE
25. Transporte de gas licuado de petróleo por medios distintos a ductos - CRE
26. Distribución de gas licuado de petróleo por medio de ductos - CRE
27. Distribución de gas licuado de petróleo mediante planta de distribución - CRE
28. Distribución de gas licuado de petróleo por medio de auto-tanques - CRE
29. Expendio al público de gas licuado de petróleo mediante estación de servicio con específico - CRE
30. Expendio al público de gas licuado de petróleo mediante botella de expendio - CRE
31. Transporte de petróleo por medio distinto a ducto - CRE
32. Almacenamiento de petróleo - CRE
33. Transporte de petrolíferos por medio - CRE
34. Transporte de petrolíferos por medios distintos a ductos - CRE
35. Almacenamiento de petrolíferos, petrolquímicos y biopetrolíferos - CRE
36. Distribución de petrolíferos por medios distintos a ductos - CRE
37. Distribución de petrolíferos por medio de ductos - CRE
38. Expendio de petrolíferos en estaciones de servicio - CRE
39. Expendio de petrolíferos en estaciones de servicio de autoservicio - CRE
40. Expendio en aeródromos - CRE
41. Distribución de petrolíferos por medios distintos a ductos, cuando el auto-tanque salga de las instalaciones del aeropuerto - CRE
42. Transporte de petrolíferos, petrolquímicos y biopetrolíferos - CRE
43. No se han identificado permisos
44. Autorización y aviso de inicio de actividades para reconocimiento y exploración superficial - CNH
45. Autorización de perforación de pozos y aviso de inicio de perforación - CNH
46. Programa, avisos e informes de proyectos de recuperación secundaria y mejorada - CNH
47. Aviso e informes para el aprovechamiento de gas natural asociado en exploración y extracción - CNH
48. Aviso para la medición de hidrocarburos - CNH
49. Aprobación de planes de exploración y de extracción para el desarrollo de YC - YNC - CNH

Figura 3.21 Cadena de Valor del Sector Hidrocarburos (Parte 1/2) Fuente: Seminario Web: Guía para la Elaboración del Análisis de Riesgo de la ASEA

# CADENA DE VALOR DEL SECTOR HIDROCARBUROS

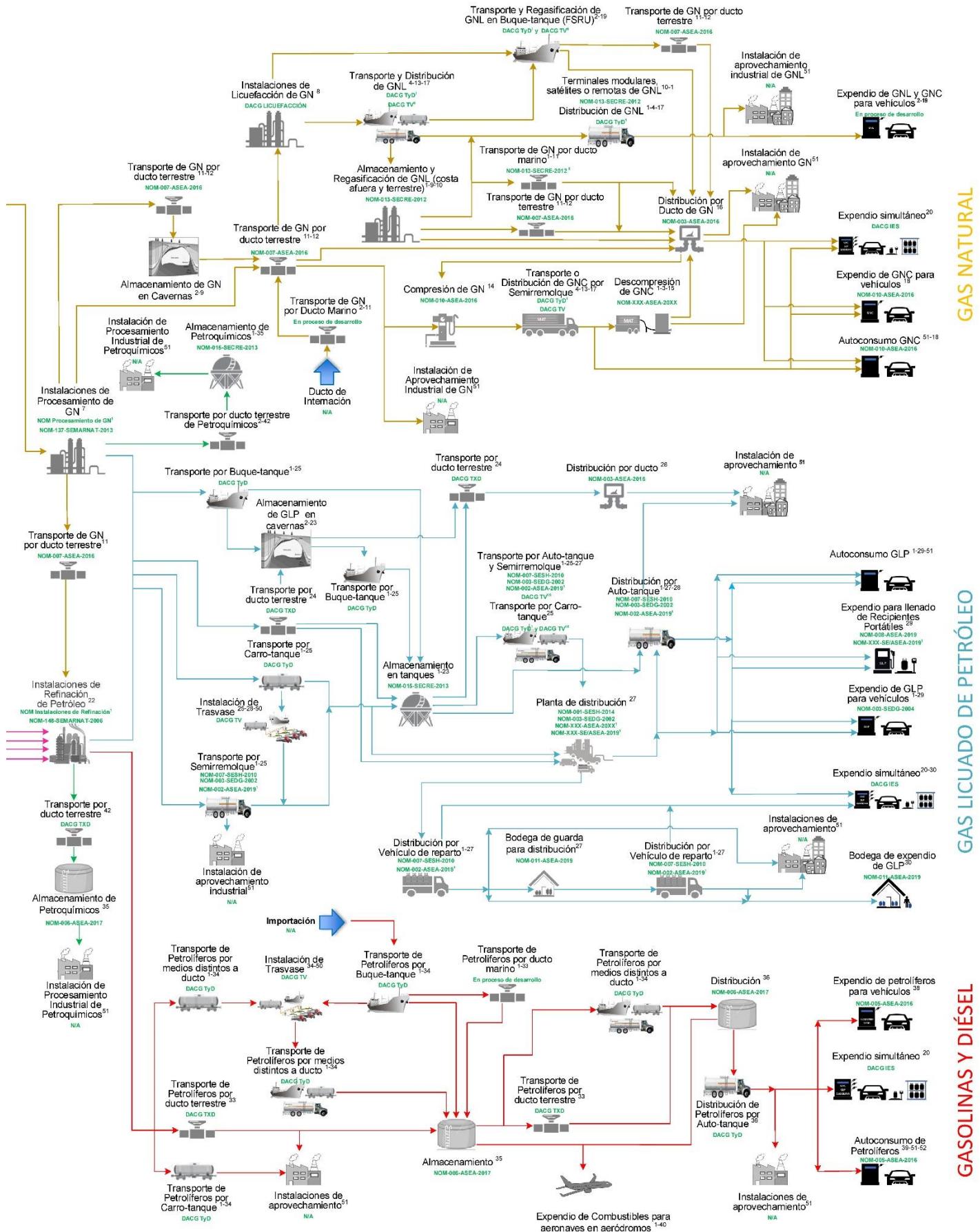


Figura 3.22 Cadena de Valor del Sector Hidrocarburos (Parte 2/2) Fuente: Seminario Web: Guía para la Elaboración del Análisis de Riesgo de la ASEA

### 3.3.3 Marco Regulatorio Vigente para el Transporte de Gas Natural

El transporte de gas natural por ducto se encuentra sujeto a una variedad de leyes, reglamentos e instrumentos regulatorios para asegurar un funcionamiento eficiente, por mencionar algunos de los más relevantes se encuentran los siguientes:

#### Leyes

- Ley de Hidrocarburos
- Ley de los Órganos Reguladores Coordinados en Materia Energética
- Ley de la Agencia Nacional de Seguridad Industrial y de Protección al Medio Ambiente
- Ley de Petróleos Mexicanos

#### Reglamentos

- Reglamento de las actividades a que se refiere el Título Tercero de la Ley de Hidrocarburos (Tratamiento, Refinación, Procesamiento, Transporte, Almacenamiento, Distribución y Expendio)
- Reglamento Interno de la Comisión Reguladora de Energía
- Reglamento de la Agencia Nacional de Seguridad Industrial y de Protección al Medio Ambiente
- Reglamento de Ingresos sobre Hidrocarburos
- Estatuto Orgánico y Decreto por el que se crea el Centro Nacional de Control de Gas Natural

#### Instrumentos

- Disposiciones Administrativas de Carácter General de acceso abierto de Transporte por Ducto y Almacenamiento - RES/900/2015
- Disposiciones Administrativas de Carácter General en materia de protección al Usuario final de bajo consumo de Gas Natural - RES/995/2015
- Disposiciones Administrativas de Carácter General que establecen los Lineamientos para la conformación, implementación y autorización de los Sistemas de Administración de Seguridad Industrial, Operativa y de Protección al Ambiente (SASISOPA)

#### Normas

- NOM-001-SECRE-2010, Especificaciones del gas natural
- NOM-002-SECRE-2010, Instalaciones de aprovechamiento de gas natural
- NOM-003-ASEA-2016, Distribución de gas natural y gas licuado de petróleo por ductos
- NOM-007-ASEA-2016, Transporte de gas natural, etano y gas asociado al carbón mineral por medio de ductos
- NOM-009-ASEA-2017, Administración de la integridad de ductos de recolección, transporte y distribución de hidrocarburos, petrolíferos y petroquímicos

*Figura 3.23 Marco Regulatorio Vigente para el Transporte por Ducto de Gas Natural. Fuente: Elaboración propia.*

### **3.3.4 Regulación Vigente en materia de riesgos industriales, operativos y al medio ambiente para el Transporte de Gas Natural por medio de ductos**

El transporte de gas natural por ducto es una actividad altamente compleja a nivel técnico, industrial, económico, ambiental e incluso social. Prueba de esto yace en el amplio número de leyes, reglamentos e instrumentos que regulan dicha actividad; sin embargo, es conveniente puntualizar los instrumentos relevantes para el caso de estudio que se presentará más adelante, por lo que a continuación se presentarán las normas técnicas y el contenido relevante que sustentan y justifican la necesidad de contar con un análisis de riesgos para dicha actividad.

La **NOM-007-ASEA-2017**, *Transporte de gas natural, etano y gas asociado al carbón mineral por medio de ductos*, establece los requisitos mínimos y especificaciones técnicas de Seguridad Industrial, Seguridad Operativa y Protección al medio ambiente, que deben cumplir los Regulados para el Diseño, Construcción, Pre-arranque, Operación, Mantenimiento, Cierre y Desmantelamiento de los Sistemas de Transporte de Gas Natural, Etano y Gas Natural Asociado al carbón mineral por medio de Ductos.

Adicionalmente a estos requisitos y especificaciones técnicas, en dicha norma se indica que desde el diseño del proyecto se requiere que se cumpla con la elaboración de un Análisis de Riesgo de acuerdo con lo establecido en los Lineamientos para la conformación, implementación y autorización de los Sistemas de Administración de Seguridad Industrial, Operativa y de Protección al Ambiente (SASISOPA). Además de esto, dicho análisis de riesgo se requiere para determinar ciertas distancias o ubicaciones de accesorios importantes en un segmento de ducto de transporte de gas natural.

Por otro lado, la **NOM-009-ASEA-2017**, *Administración de la integridad de ductos de recolección, transporte y distribución de hidrocarburos, petrolíferos y petroquímicos* establece los requisitos que se deben cumplir para mantener la integridad física de un ducto, segmento de ducto o sección de recolección, dedicado a la actividad de transporte o distribución de hidrocarburos, petrolíferos y petroquímicos; esto con la finalidad de mantener la seguridad industrial, la seguridad operativa y la protección al medio ambiente durante el ciclo de vida del proyecto. Por lo mencionado anteriormente, esta norma es de suma importancia para el objeto de estudio de este trabajo, el cual están enfocado en el transporte de gas natural por medio de ductos.

Para definir claramente el alcance y diferenciar entre los ductos que se consideran de transporte, se muestra la siguiente figura:

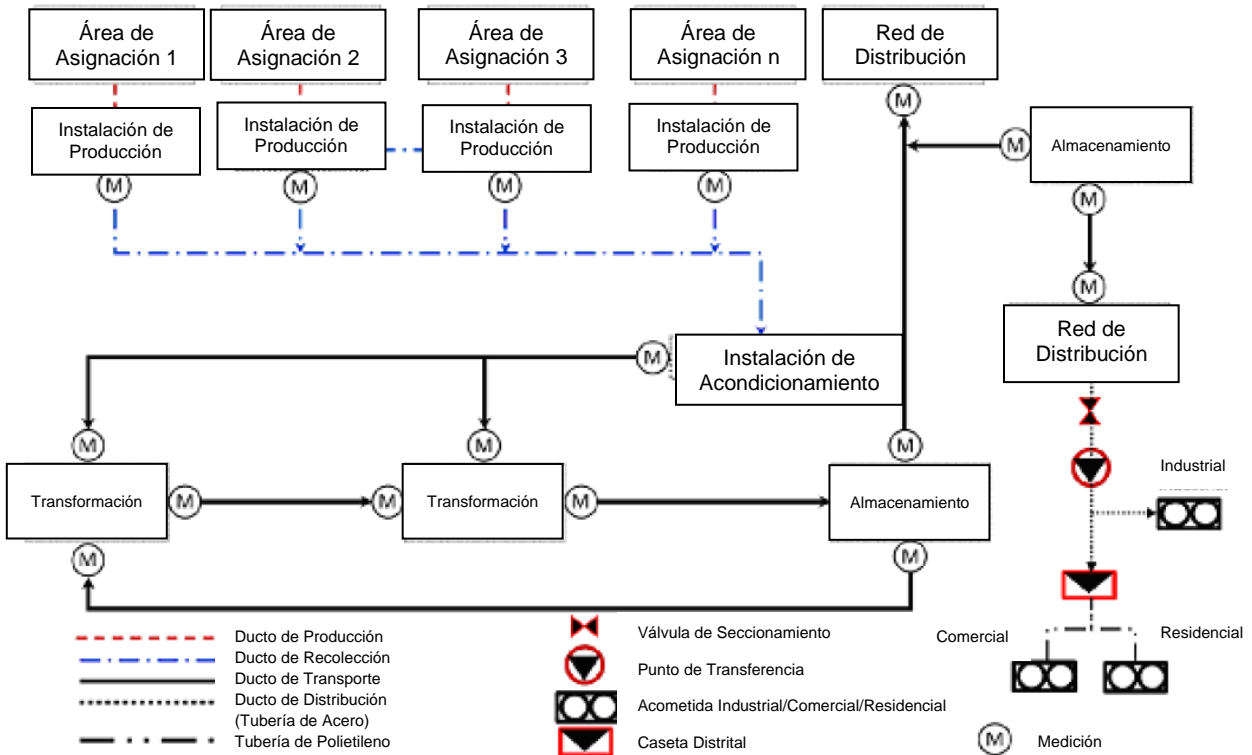


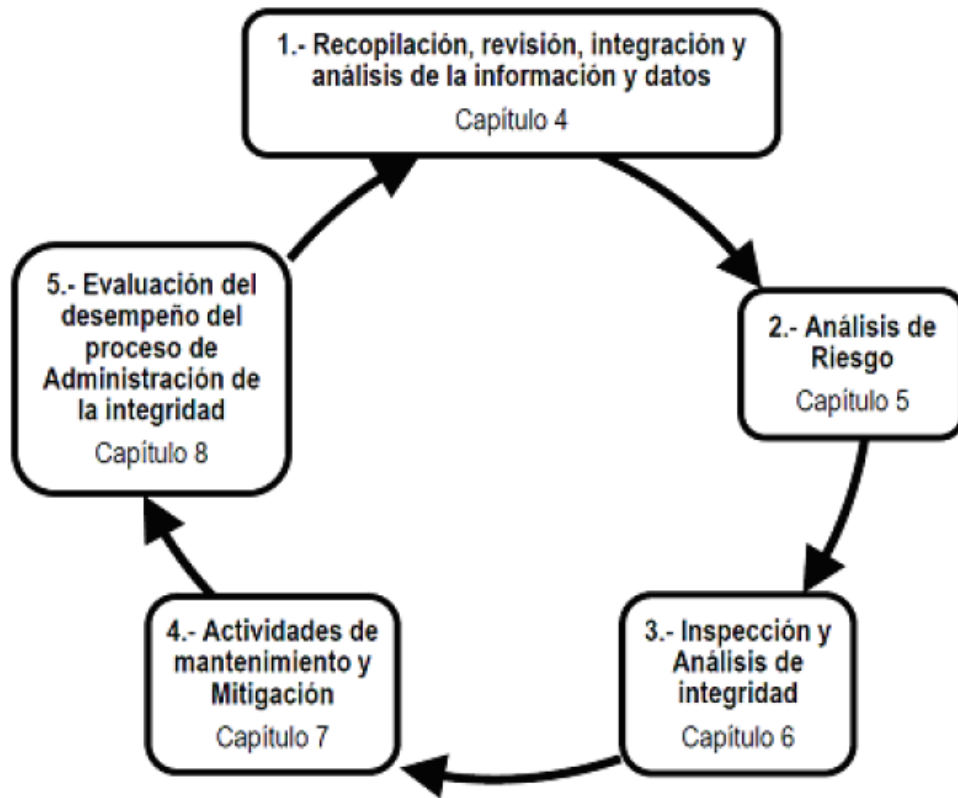
Figura 3.24 Alcance de la norma (ductos terrestres). Fuente: Tomada de la NOM-009-ASEA-2017.

Se puede observar que los siguientes ductos son parte del campo de aplicación de este instrumento:

- Ductos de producción, conducen hidrocarburos de las áreas de asignación de extracción del subsuelo a las instalaciones primarias de producción.
- Ductos de recolección, conducen hidrocarburos de las instalaciones primarias de producción hacia el acondicionamiento para poder ser transportados hacia sus respectivos destinos.
- Ductos de transporte, conducen hidrocarburos hacia centros de transformación (refinerías o centros procesadores de gas), almacenamiento o hacia las redes de distribución.
- Ductos de distribución, conducen hidrocarburos hacia los usuarios finales, pueden ser de acero o de polietileno.

Se le considera ducto de transporte terrestre a los representados con una línea sólida de color negro, por lo que dicho diagrama es congruente con lo presentado anteriormente y es el tipo de ductos que serán analizados en este caso de estudio.

De forma general, la administración de la integridad de ductos se resume de la siguiente forma:



*Figura 3.25 Diagrama de flujo para la Administración de la integridad de ductos.  
Fuente: Tomada de la NOM-009-ASEA-2017.*

Es importante mencionar que el proceso de administración de la integridad de un ducto es un proceso cíclico, es decir; dichos pasos deben ser parte del proceso continuo de cualquier regulado para asegurar que:

1. Se cuenta con información actualizada sobre las condiciones que son parte del contexto del ducto.
2. Se tiene contemplado en el Análisis de Riesgo todas los riesgos y peligros que pueden afectar a una instalación.
3. Se realizan inspecciones de forma rutinaria para asegurar las condiciones de la infraestructura de transporte.
4. Se realiza el mantenimiento correspondiente ante cualquier vulnerabilidad del sistema detectada en las inspecciones.
5. Se valora el desempeño de las actividades anteriores para detectar áreas de oportunidad en el proceso.

Al ser un proceso continuo, se destaca aún más la necesidad de contar con un proceso de Análisis de Riesgos que pueda ser fácilmente actualizable. Por este motivo, cobra una mayor relevancia el método discutido en el presente trabajo, ya que como se mencionó, realizar un Análisis de Riesgos a través de Redes Bayesianas permite actualizar de manera sencilla la información y renovar los resultados de dicho análisis ante un cambio de información de cualquiera de los nodos de la red.

En el próximo capítulo se abordará el procedimiento específico que esta norma indica para realizar el Análisis de Riesgos y se adaptará el método propuesto en este trabajo para ser congruentes con los requisitos de dicha norma.

Hasta este punto, se ha mostrado un panorama general sobre los instrumentos que serán de relevancia referente a los análisis de riesgos y su interrelación con el caso de estudio. A continuación, se presentará la infraestructura de transporte de gas natural con la que cuenta México.

### **3.4 Infraestructura de Transporte de Gas Natural por Ducto en México**

Una vez que contamos con una perspectiva general de la actividad de transporte de gas natural por medio de ductos en México, las entidades que regulan este sector, su papel en la cadena de valor del sector hidrocarburos y los instrumentos que de éstas instituciones emanan, se presentará la infraestructura existente de ductos que existen en el país. Lo anterior para ubicar el segmento de ducto que será analizado en el caso de estudio que será objeto del presente trabajo.

#### **3.4.1 Sistema de Transporte y Almacenamiento Nacional Integrado de Gas Natural (SISTRANGAS)**

Hasta 2012 operaban aproximadamente 11,347 kilómetros de gasoductos de transporte en México, de los cuales 9,118 kilómetros eran operados por PEMEX y solo 2,229 eran operados por otros particulares (Secretaría de Energía, 2019). A partir de la Reforma Energética, se definió en la fracción XXXVI del artículo 4 de la Ley de Hidrocarburos la figura de *Sistema Integrado*, la cual establece lo siguiente:

*XXXVI.- Sistema Integrado: Sistemas de Transporte por ducto y de Almacenamiento interconectados, agrupados para efectos tarifarios y que cuentan con condiciones generales para la prestación de los servicios que permiten la coordinación operativa entre las diferentes instalaciones.*

Esta figura implicó un cambio fundamental para la forma en la que se realizaba el transporte por ducto de gas natural en México al ceder la capacidad de transporte de PEMEX a un sistema mucho mayor gestionado por el CENAGAS, lo cual se manifiesta en el artículo 60 de la Ley de Hidrocarburos:

**Artículo 60.-** *Los sistemas de Transporte por ducto y de Almacenamiento de Gas Natural, Petrolíferos y Petroquímicos que se encuentren interconectados podrán conformar Sistemas Integrados, con objeto de ampliar la cobertura o aportar beneficios sistémicos en términos de mejoras en las condiciones de seguridad, continuidad, calidad y eficiencia en la prestación de los servicios.*

*La Secretaría de Energía, con base en la política pública en materia energética que al respecto emita, podrá requerir que se desarrollen los análisis necesarios para la conformación de Sistemas Integrados a fin de alcanzar los objetivos planteados en el párrafo anterior. Asimismo, la Secretaría de Energía será la encargada de emitir el plan quinquenal de expansión y optimización de la infraestructura de Transporte por ducto y Almacenamiento, tomando en consideración lo propuesto por los gestores de los sistemas integrados, previa asistencia técnica de la Comisión Reguladora de Energía.*

Este es el origen del Sistema de Transporte y Almacenamiento Nacional Integrado de Gas Natural (SISTRANGAS) el cual es el conjunto de sistemas de transporte de mayor capacidad a nivel nacional. Este se compone de 7 sistemas de transporte de gas natural que están interconectados entre sí y los cuales son de los siguientes permisionarios:

1. Sistema Nacional de Gasoductos (CENAGAS)
2. Gasoductos de Tamaulipas, S. de R. L. de C. V.
3. Gasoductos del Bajío, S. de R.L. de C.V.
4. Gasoductos del Noreste, S. de R.L. de C.V.
5. Gas Natural del Noroeste, S.A. de C.V.
6. TAG Pipelines Norte, S. de R.L. de C.V.
7. TAG Pipelines Sur, S. de R.L. de C.V.

Estos están integrados para efectos tarifarios y de operación, de entre los que el Sistema Nacional de Gasoductos, propiedad de CENAGAS, funge como sistema central, teniendo integrados seis sistemas periféricos, lo que otorga diversos beneficios técnicos y económicos tales como redundancia, eficiencia operativa, garantía en el suministro y tarifas de transporte de gas competitivas. En la siguiente figura se muestra la ruta aproximada de dichos ductos:



Figura 3.26 Ductos del Sistema de Transporte y Almacenamiento Nacional Integrado de Gas Natural (SISTRANGAS)  
 Fuente: Tomada de SISTRANGAS del sitio web de CENAGAS en <https://boletin-gestor.cenagas.gob.mx/>

El SISTRANGAS cuenta actualmente con una longitud de 10,068 kilómetros y alcanza veinte (20) Entidades Federativas divididas en seis zonas tarifarias. La capacidad total de transporte del sistema se estima en 6,307 millones de pies cúbicos diarios abasteciéndose en 27 Puntos de Inyección y entregando este energético en 112 Centros de Extracción.

### **3.4.2 Sistema Nacional de Gasoductos (SNG)**

Como se dijo anteriormente, el sistema de transporte central del SISTRANGAS es el Sistema Nacional de Gasoductos (SNG), dicho sistema era la red más importante propiedad de PEMEX que conducía la mayor parte del gas natural previo a la Reforma Energética. De acuerdo con la descripción del sistema incluida en el Título de Permiso **G/061/TRA/99**:

El Sistema Nacional de Gasoductos (SNG) está constituido por 8,704 kilómetros de ductos interconectados de diferentes diámetros y longitudes, que cruzan el territorio nacional a través de 19 entidades federativas con el objeto de satisfacer la demanda de gas natural en el territorio nacional. Durante los últimos cinco años se ha transportado a través del SNG un volumen promedio de 72.94 millones de metros cúbicos diarios equivalentes a 2,576 millones de pies cúbicos diarios (MMPCD), para abastecer a 1094 usuarios comerciales e industriales en los sectores público y privado.

Dentro del SNG existen alrededor de 419.77 kilómetros de subtruncas y ramales propiedad de CENAGAS debidamente registrados en el expediente respectivo. Por otra parte, CENAGAS posee ductos dentro de zonas urbanas que podrían convertirse en ductos de distribución en caso de que así se requiera.

El SNG cuenta con 539 estaciones de medición y regulación de diferentes tipos y tamaños, que se utilizan para medir y regular el volumen de gas natural que se entrega. Comprende también 8 estaciones de compresión con una potencia nominal instalada total de 141 MW (193,950 HP ISO), cinco de ellas centrífugas y las tres restantes reciprocantes, que se identifican como: Cárdenas, Tab.; Chinameca, y Lerdo, Ver.; Valtierra, Gto.; Estación N° 19 Tamps.; Santa Catarina, N.L., y Ojo Caliente y Chávez, Coah.

Los puntos de inyección más importantes del SNG son los que se detallan en el cuadro siguiente. Aproximadamente 75% del volumen inyectado proviene de las plantas de Cactus y Nuevo Pemex, parte es enviado al área de consumo de Minatitlán y el resto es transportado a las diferentes zonas de consumo del país, por

el ducto de 1219.2 mm (48”) de Cactus a San Fernando y de 1066.8 mm (42”) de San Fernando a Los Ramones.

*Tabla 11. Puntos de Inyección del SNG.*

Punto de Inyección	Origen		Punto de Inyección	Origen
Reynosa, Tamps.	Importación		Cactus, Chis.	Proceso
Miguel Alemán, Tamps.	Pozos		Monclova, Coah.	Pozos
Argüelles, Tamps.	Importación		Reynosa, Tamps.	Proceso
Cd. Juárez, Chih.	Importación		Nuevo Pemex, Chis.	Proceso
Gloria a Dios, Chih.	Importación		Cd. Pemex, Tab.	Proceso
Pípila, Tamps.	Pozos		Matapionche, Ver.	Proceso
Papaloapan, Ver.	Pozos		La Venta, Tab.	Proceso
Culebra, Tamps.	Pozos			

Adicionalmente, el SNG se divide en las siguientes regiones o residencias:

- Norte  
(Chihuahua, Torreón), con 2,106.718 kilómetros de ductos.
- Noreste  
(Monterrey, Reynosa, Madero), con 2,485.927 kilómetros de ductos.
- Centro  
(Valtierrilla, Tlaxcala, Edo de México), con 1,942.044 Km de ductos.
- Sur  
(Mendoza, Veracruz, Minatitlán, Cárdenas), con 2,076.118 Km de ductos

Finalmente, para su operación y mantenimiento el SNG se divide en 13 sectores, cuyas denominaciones se indican a continuación:

Tabla 12. Sectores operativos y longitud de ductos del SNG que recorren dichos ductos (Kilómetros)

N°	Sector	km		N°	Sector	km
1	Cárdenas	596		8	Guadalajara	159
2	Minatitlán	472		9	Madero	566
3	Veracruz	734		10	Reynosa	472
4	Cd. Mendoza	255		11	Monterrey	1125
5	Tlaxcala	715		12	Torreón	1222
6	V. de Carpio	525		13	Chihuahua	973
7	Salamanca	890				
Total						8,704

Este sistema se compone de muchos otros ductos subtrunciales y ramales de menor diámetro y longitud que atienden a necesidades particulares en cada una de las zonas.

En la siguiente figura se ilustra el sistema descrito anteriormente para referencia. Se muestran solo los ductos que pertenecen al SNG junto con las estaciones de compresión mencionadas en las regiones descritas anteriormente. Es importante notar que, a partir de un tramo de ducto de este sistema se realizara el Análisis de Riesgo propuesto en el presente trabajo. Dicho tramo será seleccionado en el Capítulo 4: Construcción de una Red Bayesiana para la Identificación y Cuantificación de Riesgos en Ductos de Transporte de Gas Natural.

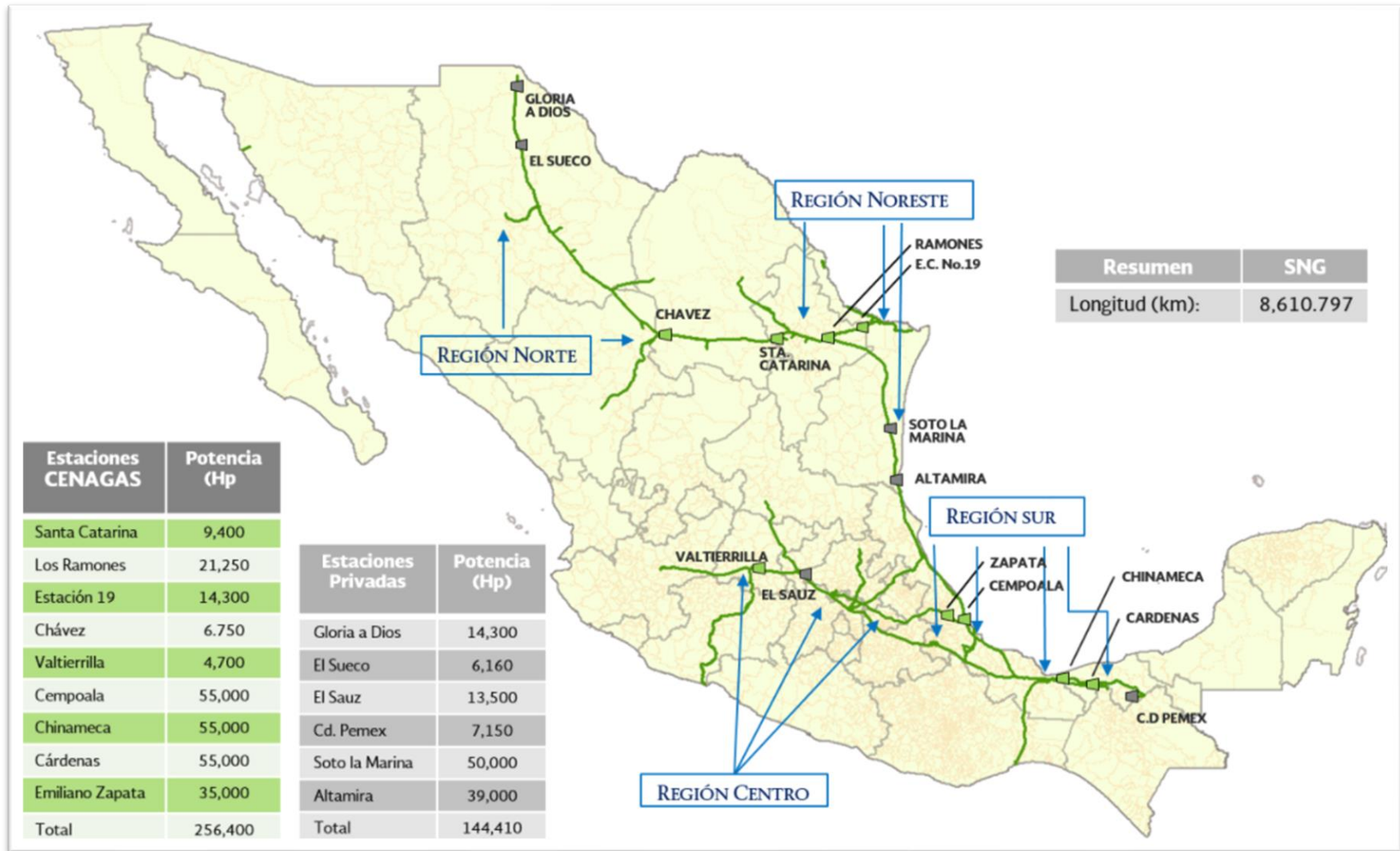


Figura 3.27 Ductos del Sistema Nacional de Gasoductos (SNG). Fuente: Tomada de Descripción General del Sistema Nacional de Gasoductos en <https://www.gob.mx/cenagas/acciones-y-programas/descripcion-general>

Se ha presentado la infraestructura más importante para el transporte de gas natural en México, por lo que, para concluir el presente capítulo, se hará una breve revisión de los accidentes que pudieran ser de relevancia para el caso de estudio y así destacar nuevamente la importancia de contar con un método eficaz y eficiente para la oportuna detección de riesgos prioritarios durante la operación de un ducto de gas natural.

### **3.5 Revisión de accidentes relacionados con Gas Natural relevantes para el caso de estudio**

A pesar de los múltiples beneficios que se han presentado en el presente trabajo sobre el uso del gas natural, desafortunadamente el sector de gas natural es uno de los más peligrosos en cuanto a fatalidades causadas por accidentes durante cualquiera de las actividades de la cadena de valor.

De acuerdo con el artículo *Natural Gas And The New Deathprint For Energy* (Conca, 2018), la industria del gas natural reporta en su índice de mortalidad de 4,000 muertes por cada billón de kilowatts-hora de energía producido, esto es mucho mayor que el índice de mortalidad de la energía nuclear, el cual solo llega a 90 muertes por cada billón de kilowatts-hora de energía producido, esto referido a los últimos 40 años.

Esta información nos habla de algo importante: como se mencionó anteriormente el gas natural es relativamente inocuo a bajas concentraciones y su quema produce la menor cantidad de contaminantes entre los combustibles fósiles, a diferencia de otros energéticos como el carbón o las gasolinas, cuya quema ha producido problemas de salud pública en distintas ciudades del mundo, principalmente en el sistema respiratorio de las personas. Por este motivo, el alto índice de mortalidad citado anteriormente se debe al nivel de letalidad de los accidentes relacionados con gas natural. Por esta razón, a continuación, se mostrarán algunos de los accidentes más representativos relacionados con el transporte o distribución de gas natural por ductos para dar una perspectiva sobre las causas y efectos que ocasionan en la infraestructura, en el ambiente y en las personas.

En la siguiente tabla se muestran algunos de los accidentes más representativos relacionados con el transporte y la distribución de gas natural por medio de ductos:

*Tabla 13. Algunos accidentes importantes en el Transporte o Distribución de Gas Natural por medio de ductos.*

<b>Fecha</b>	<b>Locación</b>	<b>Evento</b>	<b>Consecuencias</b>
<b>02 de noviembre de 1978</b>	Villahermosa, Tabasco	Explosión en gasoducto debido a un error de soldadura en una estación de bombeo	52 muertos y 21 heridos
<b>22 de abril de 1992</b>	Guadalajara, Jalisco	Explosión de gas natural en redes de distribución de la ciudad.	Más de 500 muertos y 7000 heridos
<b>03 de enero de 1995</b>	Tsinan, China	Válvula con fuga en gasoducto llenó un canalón para cable eléctrico, provocando una detonación.	17 muertos y más de 100 heridos
<b>11 de diciembre de 1999</b>	Sian, China	Explosión de un gasoducto causada por daños durante trabajos de construcción.	Más de 10 heridos, 2 de ellos con heridas serias
<b>02 de agosto de 2004</b>	Asunción, Paraguay	Incendio causado por explosión en gasoductos de un centro comercial.	Más de 350 muertos y 500 heridos aproximadamente
<b>18 de noviembre de 2007</b>	Arabia Saudita	Incendio causado por fuga de gas en ducto de transporte.	28 muertos
<b>09 de septiembre de 2010</b>	California, Estados Unidos	Incendios causados por explosiones en redes de distribución de San Francisco.	7 muertos y destrucción de 170 viviendas
<b>18 de septiembre de 2012</b>	Tamaulipas, México	Fuga de gas en un gasoducto provoca una bola de fuego cerca de un complejo procesador de Pemex.	22 muertos
<b>11 de junio de 2013</b>	Soochow, China	Explosión por fuga de gas en gasoductos de distribución.	11 muertos y 9 heridos

<b>Fecha</b>	<b>Locación</b>	<b>Evento</b>	<b>Consecuencias</b>
<b>01 de agosto de 2014</b>	Kaohsiung, Taiwán	Explosión causada por sobrepresión en un ducto de distribución de gas.	32 muertos y 300 heridos
<b>17 de abril de 2015</b>	California, Estados Unidos	Explosión en un ducto de transporte de gas natural durante trabajos de remodelación de una autopista.	14 heridos y 4 heridos de gravedad
<b>20 de julio de 2016</b>	Enshi, China	Explosión causada por fuga en un gasoducto causado por movimientos geológicos,	2 muertos y 7 heridos.

Es notable que estos accidentes son causados por una gran cantidad de factores desde amenazas geológicas, defectos de fabricación o de construcción, errores de operación, falta de mantenimiento, entre otros. Por este motivo, el uso de redes bayesianas es relevante para este caso de estudio, ya que dicho método nos permite relacionar una gran cantidad de causas o motivos de distinta índole y nos permite concluir sobre el grado de riesgo de un determinado evento.

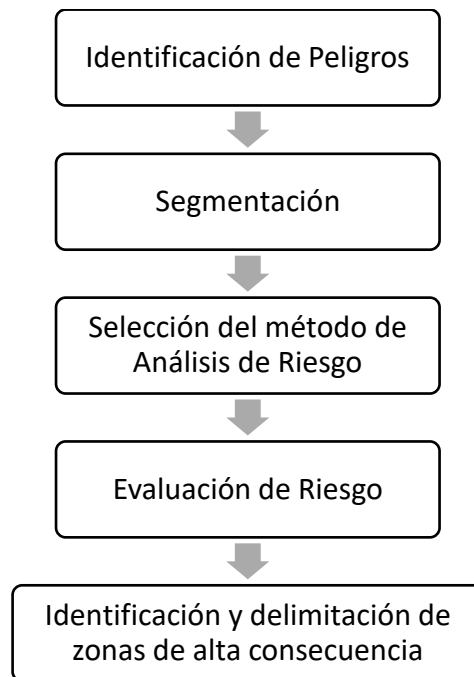
De la misma forma, se puede observar que es un sector que no está exento de accidentes graves y cuyas consecuencias van más allá del daño económico a la infraestructura, sino que impactan seriamente en la vida de las personas que se desempeñan en estos sectores e incluso en la población civil.

En el próximo capítulo, se planteará la construcción de la red bayesiana aplicada a un caso de estudio, a partir de la selección del ducto, sus características mecánicas, la segmentación y el contexto en el cual está inmerso: características del sitio, información técnica sobre los tipos de defectos más comunes en tuberías, población aledaña al sitio, entre otros. Una vez construida la red, se podrán identificar los nodos de dicha red y asignar las frecuencias correspondientes a cada uno de ellos para poder realizar el análisis e interpretación de dichas probabilidades.

## Capítulo 4. Construcción de una Red Bayesiana para la Identificación y Cuantificación de Riesgos en un segmento de ducto de transporte de gas natural

En este capítulo se elaborará formalmente la propuesta de Red Bayesiana para el Análisis de Riesgos en un segmento específico de ducto de transporte de gas natural. Para esto, se seguirá del procedimiento indicado en la norma oficial **NOM-009-ASEA-2017**, *Administración de la integridad de ductos de recolección, transporte y distribución de hidrocarburos, petrolíferos y petroquímicos*. En dicha norma se establece como primer paso la recopilación, revisión, integración y análisis de datos relativos al segmento de ducto a estudiar, por lo que se iniciará a partir de este punto.

Una vez obtenida esta información, dicha norma establece un proceso general para realizar el Análisis de Riesgo como se muestra en la figura 4.1:



*Figura 4.1 Proceso de Análisis de Riesgo para ductos de transporte de gas natural. Fuente: Tomada de la NOM-009-ASEA-2017*

A partir de ahí se realizará el Análisis de Riesgos utilizando el método propuesto, cabe mencionar que la identificación y delimitación de las zonas de alta consecuencia no será objeto de estudio del presente caso debido a que, para realizar esto, es necesario abordar temas que no son parte de los objetivos de este trabajo. Finalizado esto, se discutirán los resultados obtenidos de este análisis en el próximo capítulo.

## 4.1 Recopilación, revisión, integración y análisis de datos relativos al segmento de ducto

De acuerdo con la **NOM-009-ASEA-2017**:

*La información y datos que se deben recopilar, revisar, integrar y analizar sobre el Ducto, Segmento o Sección, son las relativas a las etapas y actividades de: Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento, así como las condiciones o acciones que reduzcan la resistencia del Ducto, Segmento o Sección. Asimismo, es necesaria la información relacionada con las técnicas de Mitigación empleadas y los procesos y procedimientos del sistema de Ductos.*

Adicionalmente, dicha norma incluye una tabla con los requisitos mínimos de información que se requiere para iniciar el Análisis de Riesgo. Es importante mencionar que, dado que el presente trabajo trata de un caso hipotético, solo se abarcará hasta la etapa de Diseño del ducto para ilustrar la utilidad y ventajas del método de Redes Bayesianas en los Análisis de Riesgos. Cualquier otra información que sea requerida, será tomada de la literatura disponible públicamente o será estimada utilizando el juicio de expertos. Por los motivos anteriores, se omitirá la parte relativa a la integración y entrega de documentación contenida en la norma; sin embargo, el tratamiento dado a la información será lo más apegado posible a un caso real.

La Tabla 14 nos muestra los requisitos mínimos de información que se requieren para dar inicio al Análisis de Riesgo, los cuales serán utilizados para este caso de estudio, en dicha tabla solo se mostrarán los requisitos relativos a la información de identificación del ducto y la información requerida para la etapa de Diseño:

Tabla 14. Información mínima para el Análisis de Riesgo e integridad del Ducto, Segmento o sección hasta la etapa de Diseño. Fuente: Tomada de la NOM-009-ASEA-2017.

Tipo	Información
<b>Identificación</b>	Nombre del Ducto
	Origen (Kilometraje)
	Destino (Kilometraje)
<b>Diseño</b>	Longitud
	Diámetro nominal
	Espesor de Pared
	Especificación del material
	Servicio de Diseño
	Presión de Diseño
	Temperatura de Diseño
	Tipo de Costura
	Fecha de Fabricación
	Propiedades mecánicas del material
Protecciones del sistema de Ductos	

#### 4.1.1 Selección y Descripción del Sistema de Ducto seleccionado

El sistema de transporte de gas natural por ducto que será analizado es el Gasoducto **Cactus - Los Ramones** con un diámetro de 48" - 42". Este ducto forma parte del Sistema Nacional de Gasoductos y tiene las siguientes características:

Cuenta con una longitud aproximada de 1,252.500 km de longitud y consta de dos secciones, las cuales tienen como punto final de entrega la estación los Ramones:

- La primera sección del gasoducto es el tramo **Cactus - Madero** con una longitud de 781 km, con un diámetro nominal (DN) de 48" y un flujo promedio inicial de 1262 MMPCSD. La presión inicial promedio es de 56.3 kg/cm<sup>2</sup>. y la presión de entrega promedio de 57.8 kg/cm<sup>2</sup>.
- La segunda sección es el tramo **Madero - Los Ramones** y comprende de la estación de envío Madero a los Ramones y tiene una longitud de 471.5 km de los cuales:

- 144.35 km. tienen un diámetro nominal de 42", y
- 325.15 km. con un diámetro nominal de 48".

Esta sección del Gasoducto maneja un flujo de 56 MMPCSD inyectándose en la estación Los Ramones a la presión necesaria para alcanzar una presión final de 57.8 kg/cm<sup>2</sup> en la estación de Madero.

Este sistema está conformado por 5 Estaciones de Compresión:

- Estación de Compresión Cárdenas
- Estación de Compresión Chinameca
- Estación de Compresión Lerdo
- Estación de Compresión Cempoala
- Estación de Compresión Los Ramones

También se conforma de 5 Estaciones de Regulación y Medición:

- Estación de Regulación y Medición Jáltipan
- Estación de Regulación y Medición Venta de Carpio
- Estación de Regulación y Medición Palmillas
- Estación de Regulación y Medición de Valtierrilla
- Estación de Regulación y Medición de Beristain

Finalmente hay 4 Estaciones de Medición únicamente en:

- Estación de Medición de Cactus
- Estación de Medición de Cosoleacaque
- Estación de Medición de la Refinería de Minatitlán
- Estación de Medición de Santa Ana

En la siguiente figura se muestra en azul la ruta aproximada de los gasoductos existentes en México, de acuerdo con lo expuesto en el capítulo anterior. Además, se ha marcado con rojo la ruta que recorre el ducto que se utilizará para el caso de estudio que abordará el presente trabajo y que se describió en los párrafos anteriores.

Como nota adicional, es importante mencionar que se trata de una ruta aproximada debido a que la localización exacta de los ductos en México; así como otros detalles como las válvulas de seccionamiento, trampas para diablos, etc., no forma parte de la información disponible públicamente por cuestiones de seguridad de la infraestructura energética del país. Por esta razón, a partir de aquí se realizarán los supuestos necesarios para poder ilustrar el método de Redes Bayesianas para el Análisis de Riesgos en ductos de transporte de gas natural.



Figura 4.2 Ruta aproximada de los ductos del Sistema Nacional de Gasoductos (SNG). Tomada de: <https://cartocritica.giscloud.com/>

Por lo tanto y a manera de resumen, en la Tabla 15 se muestra la información mínima para el Análisis de Riesgo e integridad del ducto que la **NOM-009-ASEA-2017** solicita. Lo anterior, para el caso específico de estudio del presente trabajo:

*Tabla 15. Información para el Análisis de Riesgo del caso de estudio. Fuente: Elaboración propia.*

Tipo	Información
<b>Identificación</b>	Nombre: Gasoducto <b>Cactus - Los Ramones</b>
	Origen: CPG Cactus Ejido San Miguel S/N, Reforma, Chiapas
	Destino: Estación de Compresión Los Ramones Carr. Libre Monterrey - Reynosa, Los Ramones, Nuevo León
<b>Diseño</b>	Longitud: 1,252.500 km
	Diámetro Nominal: 48" - 42"
	Espesor de Pared: 1 pulgada
	Especificación del material: Acero al Carbono
	Servicio de Diseño: Gas Natural
	Presión de Diseño: 110 kg/cm <sup>2</sup>
	Temperatura de Diseño: 40 °C
	Tipo de Costura: Sin costura
	Propiedades mecánicas del material: ASTM A106 Gr. A 25% Carbono máximo Resistencia mecánica: 55 kg/mm <sup>2</sup> Dureza 160 HB
	Protecciones del sistema de Ductos: Recubrimiento Anticorrosivo Sistema de Protección Catódica

Debido a que el Sistema Nacional de Gasoductos ha tenido muchas modificaciones y reparaciones a lo largo de los años, no se establece una fecha de fabricación específica para el gasoducto completo. Pero de acuerdo con el título de permiso, se sabe que algunos de estos ductos iniciaron operaciones desde 1952.

Cabe mencionar que posteriormente se realizará la segmentación de este ducto para facilitar su estudio y se mostrará con mayor detalle el recorrido del segmento seleccionado.

## 4.2 Identificación de Peligros

En el primer capítulo definimos peligro como: “Fuente o situación potencial de daño en términos de lesiones o efectos nocivos para la salud de las personas, daños a la propiedad, daños al entorno del lugar de trabajo, al medio ambiente o una combinación de estos”. A partir de esto, es importante recordar que un peligro es una característica inherente a la instalación y la actividad, por lo que una potencial situación de riesgo se puede originar con la frecuencia que nos aproximamos a ese peligro latente. Es por este motivo que debemos identificar correctamente los peligros posibles desde el planteamiento del Análisis de Riesgos. Para esto, la **NOM-009-ASEA-2017** nos indica que el Análisis de Riesgos debe considerar, como mínimo, los peligros indicados en la Tabla 16 para el caso de ductos de transporte de gas natural:

*Tabla 16. Categorías de Peligros. Fuente: Tomada de la NOM-009-ASEA-2017.*

No.	Comportamiento con el tiempo	Categoría	Peligros
1	Independiente	Diseño	1. Selección inadecuada del material y espesor de tubería y componentes.
			2. Instalación inadecuada (selección de ruta, tipo de unión soldada, pandeo local o global, esfuerzo combinado, soldadura, conexiones, interferencia por pesca y sistemas de protección).
			3. Desviaciones en las condiciones (Presión, Temperatura, tipo de producto, estabilidad hidrodinámica, claro libres y fatiga).
			4. Selección inadecuada de protección catódica.
			5. Selección inadecuada de recubrimiento externo.
		Fabricación	6. Defectos en la tubería y componentes.
			7. Defectos en soldaduras.
		Construcción	8. Defectos en soldadura.
			9. Desalineamiento.
			10. Doblez por flexión o pandeo.
			11. Daños en el recubrimiento anticorrosivo, protección catódica y de lastre.
			12. Daños en recubrimiento mecánico.

No.	Comportamiento con el tiempo	Categoría	Peligros
2		Daños por Terceros	13. Interferencia por pesca.
			14. Golpe por ancla o cable de ancla.
			15. Impacto de embarcación.
			16. Impacto de objetos arrojados sobre el Ducto.
			17. Vandalismo, terrorismo, extracciones clandestinas.
			18. Tránsito vehicular (impacto de vehículo, peso muerto y cargas repetitivas).
			19. Excavación, construcción u otras actividades de trabajo.
			20. Impactos mecánicos.
			21. Interferencias físicas.
			22. Incremento de la densidad poblacional.
3		Estructural	23. Pandeo en tubería expuesta o enterrada.
			24. Expansión o contracción térmica.
			25. Estabilidad hidrodinámica.
			26. Sobrecarga estática.
			27. Fatiga.
4		Peligros Naturales	28. Sismos.
			29. Desplazamientos de tierra o lecho marino.
			30. Clima extremo.
			31. Inundaciones.
			32. Descarga eléctrica atmosférica.
			33. Cargas de viento.
			34. Mareas, oleaje y corrientes marinas.
5		Operaciones Incorrectas	35. Operaciones fuera de las condiciones seguras.
			36. Procedimientos incorrectos.
			37. Procedimientos no aplicados.
			38. Errores humanos.
6		Equipo	39. Mal funcionamiento de equipos, componentes y accesorios.
			40. Componente defectuoso o no funcional.

No.	Comportamiento con el tiempo	Categoría	Peligros
7	Dependiente	Corrosión, Erosión y Agrietamiento	41. Corrosión interna.
			42. Corrosión externa.
			43. Corrosión microbiológica.
			44. Erosión.
			45. Agrietamiento por corrosión bajo esfuerzos (SCC, por sus siglas en inglés).
			46. Agrietamiento bajo tensión en presencia de sulfuros (SSC, por sus siglas en inglés).
			47. Agrietamiento inducido por hidrógeno (HIC, por sus siglas en inglés).
			48. Termofluencia.

Para entrar en detalle de los peligros a los que están expuestas las tuberías se mostrarán a continuación algunas descripciones breves sobre las categorías de peligros que se mostraron en la columna tres de la tabla anterior para poner en perspectiva dichos fenómenos:

- Peligros de diseño: Son aquellos que son originados por errores durante el diseño del proyecto, como se mostró en la tabla anterior, involucra errores por parte del equipo que realiza desde la ingeniería básica del proyecto hasta la procura de materiales para la construcción del ducto.



Figura 4.3 Error de diseño en la colocación de las bridas bajo un ducto. Fuente: <https://www.steeljrv.com/pipeline-design-errors-and-poor-live-pictures.html>

- Peligros de fabricación: Se refiere a aquellos peligros que son atribuibles a errores en la producción de los componentes y en la infraestructura asociada por parte de los proveedores. A pesar de que existen controles de calidad distintos para cada uno de los componentes, es importante considerar la posibilidad de que alguno de ellos pueda tener defectos de fábrica no detectados o defectos que con el tiempo de uso pueden desencadenar eventos no deseados.



*Figura 4.4 Defecto de fábrica de la tubería durante pruebas de presión. Fuente: Tomada de Seminario ROSEN SEMINAR México octubre 2019 Gerencia del Riesgo impartido por P. Guillen.*

- Peligros de construcción: Se refieren a aquellos peligros que son originados desde la preparación del terreno, el ensamblaje de los componentes adquiridos y los trabajos de soldadura en el ducto de transporte. Este tipo de peligros se asocian principalmente a los procedimientos establecidos en la construcción de la infraestructura y pueden provenir desde los trabajadores en sitio, hasta las decisiones tomadas por el equipo de supervisión. Usualmente este tipo de peligros son detectables durante las pruebas de pre-arranque de la instalación por lo que es de vital importancia contar con estas revisiones antes de la puesta en marcha del ducto.



*Figura 4.5 Defecto de construcción en la soldadura de la tubería. Fuente: Tomada de Pictures of Pipeline Material and Construction Quality Issues, PHMSA. Junio 15, 2012.*

- Peligros debido a daños por terceros: Estos peligros incluyen cualquier interferencia humana externa en un gasoducto construido y puede ser debido a vandalismo, impacto de vehículos, robo de combustible, entre otras actividades. Este tipo de peligros es uno de los que más relevantes se han vuelto en el sector hidrocarburos debido al incremento en el robo de combustibles líquidos. Si bien no es común el robo de gas natural en ductos de transporte en México, es importante considerar que es factible en el contexto actual. El principal problema de este tipo de peligros es que no solo es competencia del propietario del ducto, sino también es responsabilidad del Estado la obligación de tomar las medidas para mejorar el ambiente de inseguridad pública nacional en el cual se pretende desarrollar la actividad.



*Figura 4.6 Tomas ilegales en ductos. Fuente: Tomada de Hot Tapping and Product Theft from Pipelines. A Way to Detect and locate these Spots during Normal operation, Pipeline Technology Journal. Issue 1. P. 26. 2017*  
[www.legaloil.com/Images.asp](http://www.legaloil.com/Images.asp)

- Peligros estructurales: Se refieren a aquellos que son originados debido modificaciones en la estructura de la tubería debido a la carga del producto a transportar o por la topografía del sitio donde fue instalado en el segmento de tubería. Pueden ser daños debido a exposición de segmentos de tubería en terreno erosionado, aumento del peso situado sobre la tubería, pandeo o deformaciones por cambios de temperatura en tuberías expuestas, etc.



*Figura 4.7 Tubería doblada debido a las características del terreno. Fuente: Lee & Fookes QJEG 2016.*

- Peligros naturales: Son aquellos ocasionados por fenómenos naturales repentinos como sismos, inundaciones, mareas, deslaves, etc. Usualmente este tipo de peligros son los más difíciles de predecir y, en ocasiones, los más catastróficos.



*Figura 4.8 Tubería expuesta y doblada debido a inundaciones. Fuente: Enbridge Incorporated. Hazardous Liquid Pipeline Rupture and Release. Julio, 2012*

- Peligros debido a operaciones incorrectas: Son aquellos causados por procedimientos operativos fuera de los límites de diseño y/o errores humanos en la operación del ducto. Este tipo de errores suelen ser prevenidos mediante el establecimiento de manuales claros para la correcta operación del ducto o programas de capacitación del personal.



*Figura 4.9 Doblez en tubería expuesta a altas presiones y temperaturas Fuente: Tomada de H Saadawi, Upheaval Buckling of Gas Injection Pipelines Onshore Abu Dhabi - A Case Study, Society of Petroleum Engineers Marzo 2001*

- Peligros debido a corrosión, erosión y agrietamiento: Son aquellos que se presentan por el tiempo de uso del ducto y en general son reconocidos como las causas más frecuentes de falla en ductos. La corrosión es uno de los problemas principales para los operadores de ductos e incluso existen análisis de riesgos mediante redes bayesianas que son exclusivas para prevenir el problema de la corrosión (Yun-Tao Li, 2021).



*Figura 4.10 Tubería deteriorada por corrosión Fuente: Tomada de <https://www.infocorrosion.com/index.php/infocorrosion-vip/infocorrosion-recomienda/item/1247-la-importancia-de-la-ingenieria-en-corrosion>*

### 4.3 Segmentación

Para simplificar el análisis del caso de estudio y atendiendo a lo establecido en la **NOM-009-ASEA-2017**, del ducto presentado se utilizará un segmento más corto del mismo. De acuerdo con la **NOM-009-ASEA-2017**, los criterios mínimos para para realizar la segmentación del ducto deben ser los siguientes:

*Tabla 17. Criterios mínimos para la Segmentación. Fuente: Tomada de la NOM-009-ASEA-2017*

No.	Criterio	Descripción
1	Entre trampas de envío y recibo.	Delimita la longitud del Segmento entre trampas de envío y recibo.
2	Entre válvulas de seccionamiento.	Delimita la longitud del Segmento ubicado entre dos válvulas.
3	Por cambios de atributo.	Este criterio se emplea cuando se requiere analizar independientemente cada Segmento del Ducto por algún atributo en particular.
4	Por necesidades del usuario.	Este criterio permite tomar cualquier tipo de referencia para determinar el tamaño o dimensión del Segmento. Se puede usar para delimitar zonas urbanas, zonas de alta Consecuencia o cualquier área que sea de un interés particular para los Regulados.

Por lo tanto y atendiendo a las necesidades de este caso de estudio, dicho segmento es el que se muestra en la Tabla 18:

*Tabla 18. Características del segmento de ducto seleccionado. Fuente: Elaboración propia.*

Tipo	Información
<b>Identificación</b>	Nombre: Segmento <b>San Fernando - Los Ramones</b>
	Origen: Estación de Compresión Los Indios Camino S/N, San Fernando, Tamaulipas
	Destino: Estación de Compresión Los Ramones Carr. Libre Monterrey - Reynosa, Los Ramones, Nuevo León
<b>Diseño</b>	Longitud: 144 km
	Diámetro Nominal: 42"
	Espesor de Pared: 1 pulgada
	Especificación del material: Acero al Carbono
	Servicio de Diseño: Gas Natural
	Presión de Diseño: 110 kg/cm <sup>2</sup>

	Temperatura de Diseño: 40 °C
	Tipo de Costura: Sin costura
	Propiedades mecánicas del material: ASTM A106 Gr. A 25% Carbono máximo Resistencia mecánica: 55 kg/mm <sup>2</sup> Dureza 160 HB
	Protecciones del sistema de Ductos: Recubrimiento Anticorrosivo Sistema de Protección Catódica

La longitud y el tramo expresados son estimados, para fines del caso de estudio y no corresponden a la ubicación exacta del gasoducto; adicionalmente, se considerará que dicha tubería se encuentra enterrada en su totalidad. Por otro lado, cabe mencionar que, a juicio del equipo encargado del análisis de riesgos, esta segmentación se puede realizar tantas veces como sea necesario de acuerdo con las necesidades específicas y/o particularidades que tenga el proyecto. En estos casos, dicho análisis de riesgo se debe replicar tantas veces como segmentos se hayan definido necesarios.

A continuación, se mostrarán en las siguientes figuras lo siguiente:

- Figura 4.11: Localización del segmento de ducto seleccionado, los ductos en verde corresponden al SNG y el ducto en rojo corresponde al caso de estudio.
- Figura 4.12: Detalle del segmento de ducto seleccionado, dicho segmento cruza los estados de Nuevo León y Tamaulipas.
- Figura 4.13: Detalle del segmento de ducto seleccionado en *Terra Metrics* de *Google Maps®* en el que se aprecian las características físicas del recorrido del ducto.



Figura 4.11 Segmento de ducto San Fernando – Los Ramones. Fuente: Elaborado usando Google Maps® a partir de información de <https://www.gob.mx/sener/es/articulos/infraestructura-de-gas-natural-en-mexico>





## 4.4 Selección del método de Análisis de Riesgo

Una vez definido el segmento de ducto para el caso de estudio, la **NOM-009-ASEA-2017**, establece en su numeral **5.3** que:

*El método utilizado para el Análisis de Riesgo debe considerar los peligros aplicables al Ducto, Segmento o Sección que se hayan identificado, pudiendo requerirse más de un método, estos métodos se describen en el Apéndice A (normativo).*

Los métodos convencionales descritos en el Apéndice A de dicha norma fueron abordados en la sección 1.7 del presente trabajo por lo que no se requiere ahondar más en dichos métodos; sin embargo, para la construcción de la Red Bayesiana, se utilizará un método conocido como Análisis de Árbol de Fallas (AAF) el cual es uno de los métodos más populares para realizar Análisis de Riesgos y el cual será presentado a continuación a detalle.

Actualmente, la construcción de una Red Bayesiana a partir de un Árbol de Fallas es uno de los métodos más eficientes para generar dicha red. (Duan & Zhou, 2012).

### 4.4.1 Árbol de Fallas

El Análisis del Árbol de Fallas (AAF) es un método deductivo enfocado en un evento indeseado en particular o en la falla de un sistema importante, y su función es determinar las causas de dicho evento. Es un método gráfico que muestra tanto las fallas en equipo como errores humanos y otros factores que pueden resultar en la falla de un sistema de interés. Podemos definir una falla como:

*Aquel evento en el cual un activo o infraestructura se deteriora en la medida en que ya no puede realizar completamente su función prevista. Puede ir desde un paro total o parcial de actividades hasta un accidente de gravedad.*

Una tubería puede fallar de distintas formas; sin embargo, se pueden agrupar en dos categorías:

- Fugas, las cuales se definen como la pérdida de producto (en este caso gas) a través de una pequeña apertura que atraviesa la pared del ducto y que, en general, no cambia su tamaño al momento de fallar.
- Rupturas, las cuales se definen como la pérdida de producto a través de grandes aperturas y donde es posible que el defecto se extienda a lo largo de la tubería después de atravesar la pared.

En general, las fugas suelen presentar consecuencias menores como paros por reparaciones o, en algunos casos, requiere de la evacuación temporal del sitio. Las rupturas habitualmente tienen consecuencias importantes y suelen ser motivo de alerta. Para efectos del presente caso de estudio, se entenderá como falla a la

ocurrencia de cualquiera de estos dos eventos en el segmento de tubería definido. En la siguiente figura se muestran estas dos categorías de fallas:



*Figura 4.14 Ejemplo de Fuga (Izq.) y Ruptura (Der.).  
Tomada de Fuente: Tomada de Seminario ROSEN SEMINAR México octubre  
2019 Gerencia del Riesgo impartido por P. Guillen*

Regresando al Árbol de Fallas, este análisis calcula la frecuencia y/o probabilidad de ocurrencia de un suceso culminante, de aquí que sea una de las herramientas más útiles cuando se desea cuantificar riesgos. Como método de Análisis de Riesgos es de los más estructurados, y puede aplicarse a un solo sistema o a sistemas interconectados.



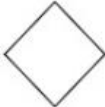

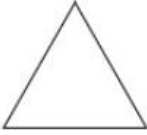
Este método parte de un suceso no deseado (un accidente o una desviación peligrosa de cualquier tipo) ya ha ocurrido, y busca las causas de este y la cadena de sucesos que puede hacer que tenga lugar. Puede ser un complemento de otras técnicas de análisis de riesgos o analizar un evento con alto grado de riesgo encontrados con otras técnicas como el *HAZOP*, por ejemplo.

Para el presente trabajo, se pretende utilizar los eventos descritos en el apartado **4.2 Identificación de Peligros** como nodos de la Red Bayesiana por lo que dicho Árbol de Fallas debe contener a los mismos para su construcción.

El Análisis de Árbol de Fallas descompone un accidente en sus elementos contribuyentes, por ejemplo: mantenimiento deficiente, fenómenos naturales, fallas humanas, de equipos de planta o sucesos externos, etc. El resultado es una representación lógica en la que aparecen cadenas de eventos capaces de generar el suceso culminante que ocupa la cúspide del Árbol de Fallas. Para la representación lógica se utiliza la simbología que se muestra en la Tabla 19:

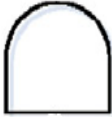

Tabla 19. Simbología común utilizada para la construcción de Árbol de Fallas.  
 Tomada de “Análisis: Árbol de Fallas, qué es y cómo se utiliza”

<https://laedu.digital/2020/03/08/analisis-arbol-de-fallas-que-es-y-como-se-utiliza/>

Símbolo	Descripción
 Rectángulo	El rectángulo es el principal componente básico del árbol analítico. Representa el evento negativo y se localiza en el punto superior del árbol y puede localizarse por todo el árbol para indicar otros eventos que pueden dividirse más. Este es el único símbolo que tendrá abajo una puerta de lógica y eventos de entrada.
 Círculo	Un círculo representa un evento base en el árbol. Estos se encuentran en los niveles inferiores del árbol y no requieren más desarrollo o divisiones. No hay puertas o eventos debajo del evento base.
 Diamante	El diamante identifica un evento terminal sin desarrollar. Tal evento es uno no completamente desarrollado debido a una falta de información o significancia. Una rama del árbol de fallas puede terminar con un diamante. Por ejemplo, la mayoría de los proyectos requieren personal, procedimientos, y equipo. El desarrollador del árbol tal vez se decida enfocarse en el aspecto de personal del procedimiento y no en los aspectos del equipo o procedimientos. En este caso el desarrollador usaría diamantes para mostrar "procedimientos" y "equipo" como eventos terminales no desarrollados.
 Óvalo	Un símbolo de oval representa una situación especial que puede ocurrir solamente si ocurren ciertas circunstancias. Esto se explica dentro del símbolo del óvalo. Un ejemplo de esto tal vez sea el caso de que si hay que cerrar ciertos interruptores por una secuencia específica antes de ocurrir una acción.
 Triángulo	El triángulo significa una transferencia de una rama del árbol de fallas a otro lugar del árbol. Donde se conecta un triángulo al árbol con una flecha, todo que esté mostrado debajo del punto de conexión se pasa a otra área del árbol. Esta área se identifica con un triángulo correspondiente que se conecta al árbol con una línea vertical. Letras, números o figuras diferencian un grupo de símbolos de transferencia de otro. Para mantener la simplicidad del árbol analítico, el símbolo de transferencia debe usarse con moderación.

Adicionalmente, se utilizan estos símbolos, llamados puertas, para representar relaciones entre dichos eventos de acuerdo con la Tabla 20:

Tabla 20. Puertas usadas para describir relaciones en el Árbol de Fallas. Tomada de “Análisis: Árbol de Fallas, qué es y cómo se utiliza”  
<https://laedu.digital/2020/03/08/analisis-arbol-de-fallas-que-es-y-como-se-utiliza/>

Símbolo	Descripción
 <p data-bbox="342 562 443 590">Puerta Y</p>	<p data-bbox="557 453 1372 590">Representa una condición en la cual todos los eventos mostrados debajo de la puerta (puerta de entrada) tiene que estar presentes para que ocurra el evento arriba de la puerta (evento de resultado). Esto significa que el evento de resultado ocurrirá solamente si todos los eventos de entrada existen simultáneamente.</p>
 <p data-bbox="342 758 443 785">Puerta O</p>	<p data-bbox="557 648 1372 726">Representa una situación en la cual cualquier de los eventos mostrados debajo de la puerta (puerta de entrada) llevarán al evento mostrado arriba de la puerta (evento de resultado).</p>

Antes de empezar a construir el Árbol de Fallas es importante tener un amplio conocimiento del funcionamiento del sistema, en este caso, se va a retomar lo planteado a lo largo del presente trabajo. La metodología empleada en la elaboración de un Análisis de Árbol de Fallas es la siguiente:

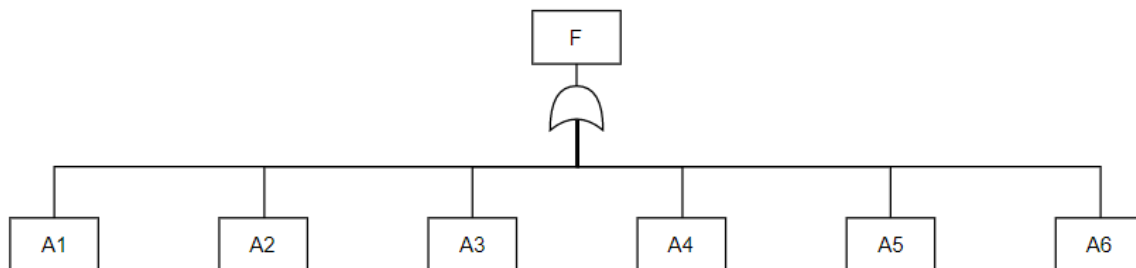
1. Identificar la falla del sistema (evento culminante o superior) que va a ser analizada y ubicarla en la parte alta del Árbol.
2. Proceder al próximo nivel del sistema que llamaremos subsistema e identificar las fallas del subsistema que podrían conducir a la falla del sistema.
3. Determinar la relación lógica entre las fallas del subsistema que son requeridas para producir la falla del sistema. Puede ser el resultado de la combinación de fallas o la ocurrencia de cualquiera de las fallas identificadas.
4. Usar la estructura lógica de puertas “Y” u “O” para mostrar la relación de fallas del subsistema que producen la falla del sistema. La “Y” significa que las frecuencias o probabilidades deben ser multiplicadas y la “O” significa que estas deben ser sumadas.
5. Proceder al próximo nivel más bajo del sistema y repetir los pasos del 2 al 4 hasta que se hayan identificado todas las fallas del nivel de componentes.
6. Iniciar con datos de frecuencia o probabilidad de fallas en el nivel de componentes, calcular la frecuencia o probabilidad de las fallas descritas en el nivel ubicado arriba del nivel de componentes usando las puertas “Y” u “O”.
7. Continuar la estructura lógica indicada por las puertas “Y” u “O” en el Árbol de Fallas hasta que la probabilidad de la falla del sistema o evento culminante ha sido calculada.

Si bien es necesario realizar los últimos dos pasos para encontrar la probabilidad de falla utilizando esta metodología, para efectos del presente caso de estudio, solo realizaremos las instrucciones establecidas hasta el paso 5 para identificar todos los eventos y establecer el Árbol de Fallas. Una vez establecido el Árbol de Fallas, se mostrará como pasar de esta estructura a una Red Bayesiana, para lo cual se mencionarán ciertas consideraciones y particularidades más adelante.

Como primer paso, se identificará la falla del sistema (el evento culminante o superior) y se ubicará en la parte más alta del Árbol de Fallas, en este caso, el evento culminante lo definiremos como F: Falla en el ducto de transporte. Posteriormente procederemos a englobar los siguientes subsistemas que pueden llevar a la falla del ducto de transporte los cuales son:

- A1: Defectos de Tubería
- A2: Daños por Terceros
- A3: Peligros Estructurales
- A4: Peligros Naturales
- A5: Operaciones Incorrectas
- A6: Corrosión, Erosión y Agrietamiento

Lo cual resulta en el siguiente Árbol de Fallas:



*Figura 4.15 Inicio del Árbol de Fallas. Fuente: Elaboración propia en <https://www.diagrameditor.com/>*

Se puede notar que se está utilizando la puerta “0” para representar que, en caso de presentarse cualquiera de los eventos descritos anteriormente de los subsistemas, esto resultará en la falla del ducto de transporte.

Una vez que tenemos esto, procederemos a establecer los subsistemas, y para cada uno los eventos primarios que lo desencadenan, estos eventos estarán representados por una “X” y corresponde a lo que más adelante serán los nodos raíz de la Red Bayesiana. Estos eventos fueron tomados de la literatura consultada y para los cuales disponemos de información histórica. En la Tabla 21, se establece cada uno de los eventos considerados y en la Figura 4.15 se observa la estructura de nuestro primer Árbol de Fallas.

Tabla 21. Eventos considerados para el Análisis de Riesgos general en un ducto de transporte de gas natural.

Fuente: Elaboración propia a partir de eventos analizados en Wang, W., Shen, K., Wang, B., Dong, C., Khan, F., & Wang, Q. (2017). *Failure probability analysis of the urban buried gas pipelines using Bayesian networks.*

<i>Símbolo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Descripción</i>		
<b>F</b>	<b>Falla en ducto de transporte</b>										
<b>A1</b>	<b>Defectos de Tubería</b>	<b>B1</b>	<b>Defectos de Diseño</b>	X8	Selección inadecuada del material y espesor de tubería y componentes						
				X9	Instalación inadecuada (selección de ruta, tipo de unión soldada, pandeo local o global, esfuerzo combinado, soldadura, conexiones, interferencia por pesca y sistemas de protección)						
				X10	Desviaciones en las condiciones (Presión, Temperatura, tipo de producto, estabilidad hidrodinámica, claro libres y fatiga)						
		<b>B2</b>	<b>Defectos de Fabricación</b>	<b>C1</b>	<b>Defectos en la tubería y componentes</b>	X31	Contaminación del metal				
						X32	Grano grueso				
						X33	Mala microestructura				
						X34	Mala calidad de procesamiento				
						X35	Material no apto				
						X36	Grado de ovalidad excedido				
				<b>C2</b>	<b>Defectos en soldaduras</b>	X37	Métodos de soldadura incorrectos				
						X38	Mala calidad de materiales de soldadura				
						X39	Mal pretratamiento de la superficie a soldar				
						X40	Porosidad en la soldadura				
						X41	Falta de penetración				
						X42	Sobrecalentado				
						X43	Superficie por soldar con escoria				
						<b>C3</b>	<b>Defectos en soldaduras</b>	X44	Métodos de soldadura incorrectos		
		X45	Mala calidad de materiales de soldadura								
		X46	Mal pretratamiento de la superficie a soldar								
		X47	Porosidad en la soldadura								
		X48	Falta de penetración								
X49	Sobrecalentado										
<b>B3</b>	<b>Defectos de Construcción</b>	<b>C4</b>	<b>Defectos en la Instalación de la tubería</b>	X50	Superficie por soldar con escoria						
				X51	Desalineamiento						
				X52	Doble por flexión o pandeo						
				X53	Daños en el recubrimiento anticorrosivo, protección catódica y de lastre						
		X54	Daños en recubrimiento mecánico								
<b>C5</b>	<b>Defectos en la construcción de la trinchera</b>	X55	Poca profundidad								
		X56	Inestabilidad de pendiente								
		X57	Errores en el relleno de la trinchera								

Tabla 21. Eventos considerados para el Análisis de Riesgos general en un ducto de transporte de gas natural.

Fuente: Elaboración propia a partir de eventos analizados en Wang, W., Shen, K., Wang, B., Dong, C., Khan, F., & Wang, Q. (2017). Failure probability analysis of the urban buried gas pipelines using Bayesian networks.

<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>		
<b>A2</b>	<b>Daños por Terceros</b>	<b>B4</b>	<b>Daños por eventos marítimos</b>	X11	Interferencia por pesca						
				X12	Golpe por ancla o cable de ancla						
				X13	Impacto de embarcación						
				X14	Impacto de objetos arrojados sobre el Ducto						
		<b>B5</b>	<b>Interferencias físicas</b>	<b>C6</b>	<b>Vandalismo, terrorismo, extracciones clandestinas</b>	X58	Malas relaciones públicas				
						X59	Inseguridad local				
						X60	Poca supervisión administrativa del regulado				
				X15	Tránsito vehicular (impacto de vehículo, peso muerto y cargas repetitivas)						
				X16	Excavación, construcción u otras actividades de trabajo						
				X17	Impactos mecánicos						
X18	Incremento de la densidad poblacional										
<b>A3</b>	<b>Peligros Estructurales</b>	X1	Pandeo en tubería expuesta o enterrada								
		X2	Expansión o contracción térmica								
		X3	Estabilidad hidrodinámica								
		X4	Sobrecarga estática								
		X5	Fatiga								
<b>A4</b>	<b>Peligros Naturales</b>	<b>B6</b>	<b>Amenazas Geológicas</b>	X19	Sismos						
				X20	Desplazamientos de tierra o lecho marino						
		<b>B7</b>	<b>Clima extremo</b>	X21	Inundaciones						
				X22	Descarga eléctrica atmosférica						
				X23	Cargas de viento						
X24	Mareas, oleaje y corrientes marinas										
<b>A5</b>	<b>Operaciones Incorrectas</b>	<b>B8</b>	<b>Operaciones fuera de las condiciones seguras.</b>	X25	Procedimientos incorrectos						
				<b>C7</b>	<b>Errores humanos</b>	X61	Procedimientos no aplicados				
						X62	Falta de capacitación				
		<b>B9</b>	<b>Equipo</b>	X26	Mal funcionamiento de equipos, componentes y accesorios						
				X27	Componente defectuoso o no funcional						

Tabla 21. Eventos considerados para el Análisis de Riesgos general en un ducto de transporte de gas natural.

Fuente: Elaboración propia a partir de eventos analizados en Wang, W., Shen, K., Wang, B., Dong, C., Khan, F., & Wang, Q. (2017). Failure probability analysis of the urban buried gas pipelines using Bayesian networks.

Símbolo	Descripción	Símbolo	Descripción	Símbolo	Descripción	Símbolo	Descripción	Símbolo	Descripción				
A6	Corrosión, Erosión y Agrietamiento	B10	Corrosión interna	C8	Medio Ácido	X63	Alto contenido de H <sub>2</sub> S						
						X64	Alto contenido de SO <sub>2</sub>						
						X65	Alto contenido de CO <sub>2</sub>						
						X66	Alto contenido de H <sub>2</sub> O (Agua)						
				C9	Falla del recubrimiento interno	X67	Sin recubrimiento interno						
						X68	Daño al recubrimiento interno						
				B11	Corrosión externa	C10	Ambiente corrosivo	D1	Suelo corrosivo	X69	Otros metales	X70	Exceso de sulfuros
										X71	Alto contenido en sales		
										X72	PH bajo		
		X73	Alta humedad										
		X74	Alto contenido de O <sub>2</sub>										
		C11	Falla de los sistemas de protección			D2	Sistema de Protección Catódica	X75	Corrosión microbiológica	X76	Diseño o selección incorrecta		
								X77	Falla en el suministro de energía				
								X78	Blindaje				
								X79	Daño externo				
								D3	Recubrimiento Externo	X80	Mal revestimiento en juntas		
		X81	Mala calidad de construcción										
		X82	Selección incorrecta del recubrimiento externo										
		X6	Erosión										
		B12	Agrietamiento	X28	Agrietamiento por corrosión bajo esfuerzos (SCC, por sus siglas en inglés)								
X29	Agrietamiento bajo tensión en presencia de sulfuros (SSC, por sus siglas en inglés)												
X30	Agrietamiento inducido por hidrógeno (HIC, por sus siglas en inglés)												
X7	Termofluencia												

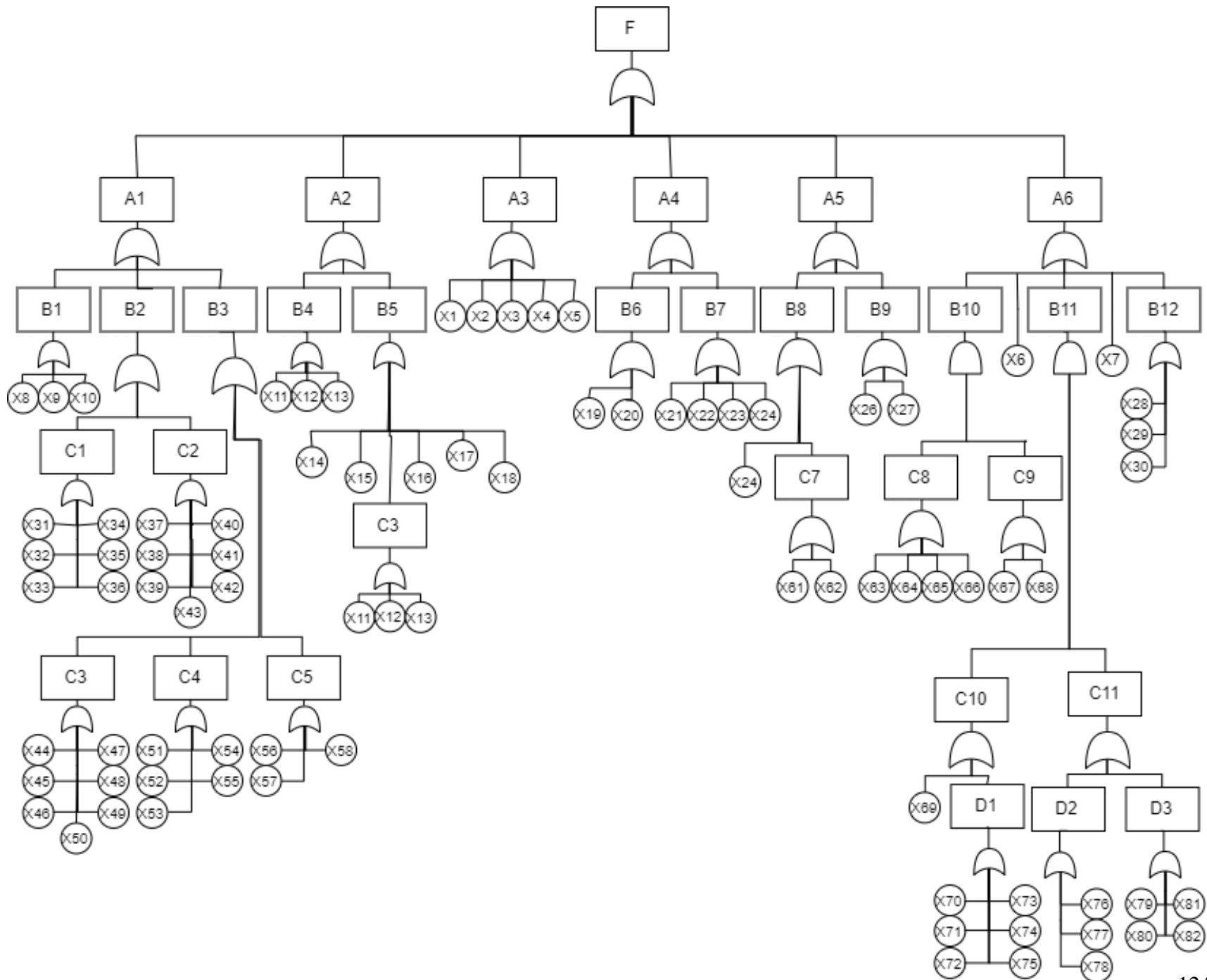


Figura 4.16 Árbol de Fallas general para el Análisis de Riesgos.  
 Fuente: Elaboración propia en <https://www.diagrameditor.com/>

Este Árbol de Fallas corresponde a un caso general en el que estamos considerando la totalidad de los eventos que la **NOM-009-ASEA-2017** plantea para realizar el Análisis de Riesgos; sin embargo, es posible simplificar este Árbol de Fallas realizando algunas consideraciones derivadas del contexto del caso de estudio que estamos presentando y de la información disponible con la que contamos para realizar el presente análisis, estas consideraciones son las siguientes:

1. Debido a que se cuenta con un parámetro general de falla para los Defectos de Diseño, se convertirá este subsistema en un nodo raíz que incluya los tres puntos mencionados en el subsistema, los cuales son:
  - Selección inadecuada del material y espesor de tubería y componentes.
  - Instalación inadecuada (selección de ruta, tipo de unión soldada, pandeo local o global, esfuerzo combinado, soldadura, conexiones, interferencia por pesca y sistemas de protección).
  - Desviaciones en las condiciones (Presión, Temperatura, tipo de producto, estabilidad hidrodinámica, claro libres y fatiga).
2. La ruta propuesta es una tubería terrestre y no recorre ningún tramo submarino, por lo que no es factible ningún tipo de riesgo debido a eventos marítimos (impacto de embarcaciones, daños por pesca, etc.) por este motivo, el subsistema B4: Daños por eventos marítimos, puede ser removido del Árbol de Fallas. Adicionalmente, los riesgos relacionados con mareas, oleajes o corrientes marinas tampoco serán tomados en cuenta.
3. De acuerdo con el tramo propuesto, se considera una tubería enterrada en su totalidad y sin tránsito vehicular, por lo que podemos omitir los siguientes eventos:
  - Impacto de objetos arrojados sobre el Ducto.
  - Tránsito vehicular (impacto de vehículo, peso muerto y cargas repetitivas).
  - Impactos mecánicos.
  - Cargas de viento.
  - Descargas eléctricas atmosféricas.
  - Erosión.
4. No se consideran elevaciones, ni cambios abruptos de pendiente en el tramo de ducto seleccionado por lo que se puede omitir el subsistema referente a los peligros estructurales; sin embargo, es importante no descartar este tipo de contribuciones para topologías más complejas.

5. En general, en las revisiones sistemáticas de riesgos en ductos de transporte de gas natural no hacen una distinción puntual entre sismos y los desplazamientos de tierra ocasionados por otros fenómenos, por lo cual se engloban ambas categorías en el subsistema Amenazas Geológicas, para lo cual si existe información disponible sobre la frecuencia de falla anual en ductos debido a estos fenómenos.
6. El fenómeno de agrietamiento en la información consultada en general no está desglosado por los tipos que se enuncian en este primer acercamiento, los cuales son:
  - Agrietamiento por corrosión bajo esfuerzos (SCC, por sus siglas en inglés)
  - Agrietamiento bajo tensión en presencia de sulfuros (SSC, por sus siglas en inglés)
  - Agrietamiento inducido por hidrógeno (HIC, por sus siglas en inglés)Por este motivo se considerará el agrietamiento como parte de un solo fenómeno; sin embargo, es posible realizar este análisis con cada factor por separado como parte de estudios futuros.
7. Adicionalmente, el fenómeno de termofluencia se presenta en condiciones muy específicas de presión, altas temperaturas y largos periodos de tiempo por lo cual no será abordado en este Árbol de Fallas.
8. De acuerdo con las *Disposiciones Administrativas de Carácter General que establecen los Lineamientos en materia de Seguridad Industrial, Seguridad Operativa y Protección al Medio Ambiente, para el transporte terrestre por medio de Ductos de Petróleo, Petrolíferos y Petroquímicos*, el Gas Natural pertenece a un fluido Categoría B<sup>11</sup>, para este tipo de fluido, y tomando en consideración la ruta propuesta, se puede considerar una Clase de Localización Tipo 2<sup>12</sup>, por este motivo y por fines prácticos no se considerará el riesgo por el incremento en la densidad poblacional en la vecindad del ducto. Esto se muestra en la siguiente figura, cuya línea roja representa el recorrido del ducto:

---

<sup>11</sup> Fluidos inflamables y/o tóxicos que son gases en condiciones de temperatura ambiente y presión atmosférica y que se transportan como gases y/o líquidos. Ejemplos típicos son el etano, gas licuado del Petróleo, (Tal como propano y butano, líquidos de Gas Natural)

<sup>12</sup> El área unitaria que cuenta con diez o menos construcciones ocupadas por personas y/o lugares con una densidad de población inferior a 50 habitantes por kilómetro cuadrado. Esta clase de localización refleja áreas como tierras baldías, tierras de pastoreo, tierras agrícolas y otras zonas escasamente pobladas.

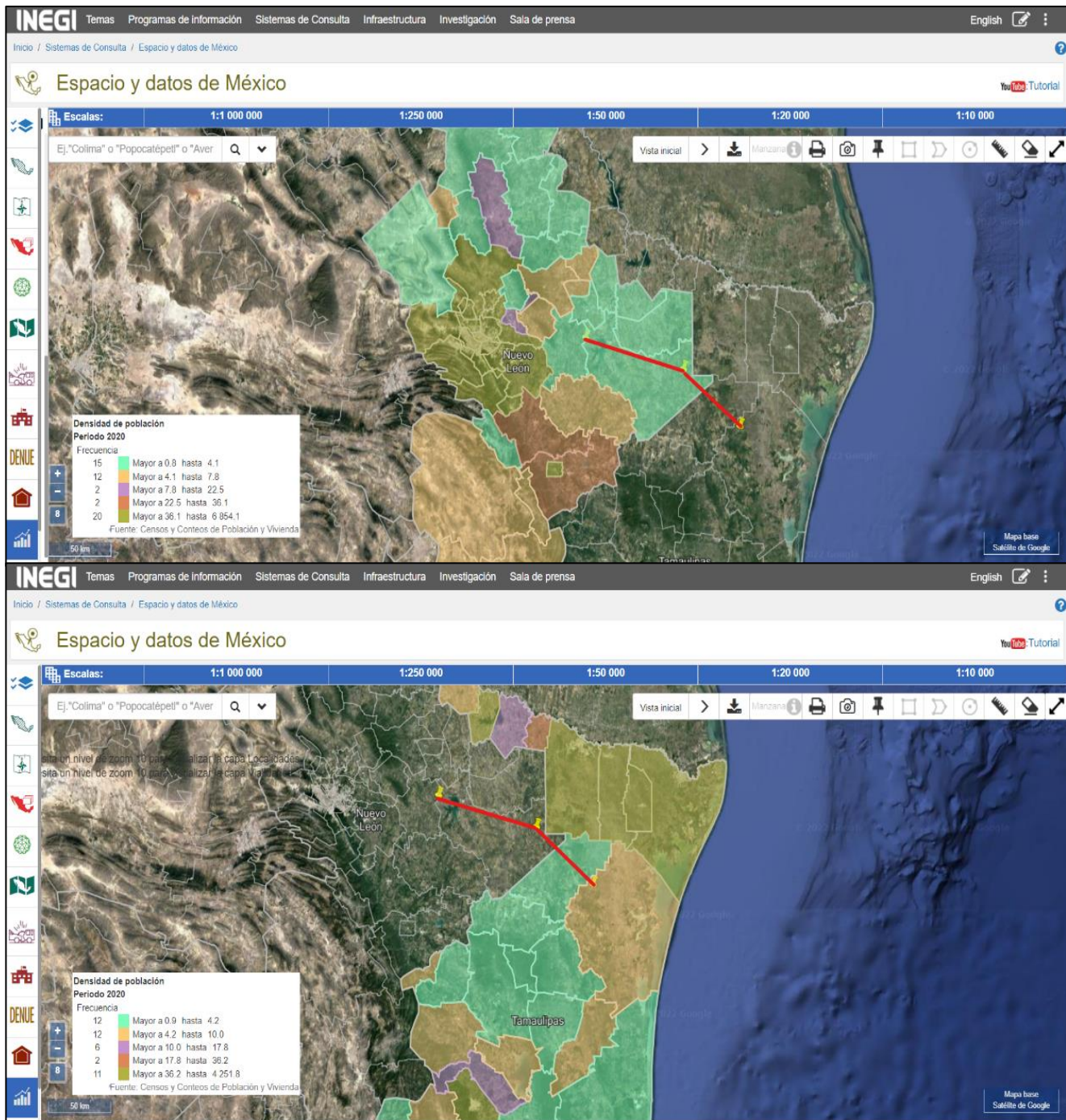


Figura 4.17 Densidad poblacional en el caso de estudio en los estados de Tamaulipas y Nuevo León. Fuente: Elaboración propia usando mapas del INEGI en <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/default.aspx>

Una vez realizadas estas consideraciones, en la Tabla 22 se muestran los eventos considerados para este caso de estudio y el Árbol de Fallas simplificado que le corresponde en la Figura 4.17:

Tabla 22. Eventos considerados para el Análisis de Riesgos en el caso de estudio propuesto.  
 Fuente: Elaboración Propia a partir de la Tabla 21.

Símbolo	Descripción	Símbolo	Descripción	Símbolo	Descripción	Símbolo	Descripción	Símbolo	Descripción
<b>F</b>	<b>Falla en ducto de transporte</b>								
<b>A1</b>	<b>Defectos de Tubería</b>	<b>X1</b>	<b>Defectos de Diseño</b>	<b>B1</b>	<b>Defectos de Fabricación</b>	<b>C1</b>	<b>Defectos en la tubería y componentes</b>	<b>X13</b>	Contaminación del metal
		<b>X14</b>	Grano grueso						
		<b>X15</b>	Mala microestructura						
		<b>X16</b>	Mala calidad de procesamiento						
		<b>X17</b>	Material no apto						
		<b>X18</b>	Grado de ovalidad excedido						
		<b>X19</b>	Métodos de soldadura incorrectos			<b>C2</b>	<b>Defectos en soldaduras</b>		
		<b>X20</b>	Mala calidad de materiales de soldadura						
		<b>X21</b>	Mal pretratamiento de la superficie a soldar						
		<b>X22</b>	Porosidad en la soldadura						
		<b>X23</b>	Falta de penetración						
		<b>X24</b>	Sobrecalentado						
		<b>X25</b>	Superficie por soldar con escoria			<b>C3</b>	<b>Defectos en soldaduras</b>		
		<b>X26</b>	Métodos de soldadura incorrectos						
		<b>X27</b>	Mala calidad de materiales de soldadura						
		<b>X28</b>	Mal pretratamiento de la superficie a soldar						
		<b>X29</b>	Porosidad en la soldadura						
		<b>X30</b>	Falta de penetración						
		<b>X31</b>	Sobrecalentado	<b>C4</b>	<b>Defectos en la instalación de la tubería</b>				
<b>X32</b>	Superficie por soldar con escoria								
<b>X33</b>	Desalineamiento								
<b>X34</b>	Doblez por flexión o pandeo								
<b>X35</b>	Daños en el recubrimiento anticorrosivo, protección catódica y de lastre								
<b>X36</b>	Daños en recubrimiento mecánico								
<b>X37</b>	Poca profundidad	<b>C5</b>	<b>Defectos en la construcción de la trinchera</b>						
<b>X38</b>	Inestabilidad de pendiente								
<b>X39</b>	Errores en el relleno de la trinchera								

Tabla 22. Eventos considerados para el Análisis de Riesgos en el caso de estudio propuesto.  
Fuente: Elaboración Propia a partir de la Tabla 21.

<i>Símbolo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Descripción</i>		
<b>A2</b>	<b>Daños por Terceros</b>	X2	Excavación, construcción u otras actividades de trabajo								
		<b>B3</b>	<b>Vandalismo, terrorismo, extracciones clandestinas</b>	X5	Malas relaciones públicas						
				X6	Inseguridad local						
				X7	Poca supervisión administrativa del regulado						
<b>A3</b>	<b>Peligros Naturales</b>	X3	Amenazas Geológicas								
		<b>B4</b>	<b>Clima extremo</b>	X8	Inundaciones						
				X9	Descarga eléctrica atmosférica						
<b>A4</b>	<b>Operaciones Incorrectas</b>	<b>B5</b>	<b>Operaciones fuera de las condiciones seguras</b>	X10	Procedimientos incorrectos						
				<b>C6</b>	<b>Errores humanos</b>	X40	Procedimientos no aplicados				
		X41	Falta de capacitación								
		<b>B6</b>	<b>Equipo defectuoso</b>	X11	Mal funcionamiento de equipos, componentes y accesorios						
				X12	Componente defectuoso o no funcional						
<b>A5</b>	<b>Corrosión, Erosión y Agrietamiento</b>	<b>B7</b>	<b>Corrosión interna</b>	<b>C7</b>	<b>Medio Ácido</b>	X42	Alto contenido de H <sub>2</sub> S				
						X43	Alto contenido de SO <sub>2</sub>				
						X44	Alto contenido de CO <sub>2</sub>				
						X45	Alto contenido de H <sub>2</sub> O (Agua)				
				<b>C8</b>	<b>Falla del recubrimiento interno</b>	X46	Sin recubrimiento interno				
						X47	Daño al recubrimiento interno				
				<b>C9</b>	<b>Ambiente corrosivo</b>	<b>D1</b>	<b>Suelo corrosivo</b>	X48	Otros metales		
								X49	Exceso de sulfuros		
		X50	Alto contenido en sales								
		X51	PH bajo								
		X52	Alta humedad								
		X53	Alto contenido de O <sub>2</sub>								
		X54	Corrosión microbiológica								
		<b>B8</b>	<b>Corrosión externa</b>	<b>C10</b>	<b>Falla de los sistemas de protección</b>	<b>D2</b>	<b>Sistema de Protección Catódica</b>	X55	Diseño o selección incorrecta		
								X56	Falla en el suministro de energía		
X57	Blindaje										
<b>D3</b>	<b>Recubrimiento Externo</b>	<b>X58</b>	Daño externo	X58	Daño externo						
				X59	Mal revestimiento en juntas						
				X60	Mala calidad de construcción						
				X61	Selección incorrecta del recubrimiento externo						
		X4	Agrietamiento								

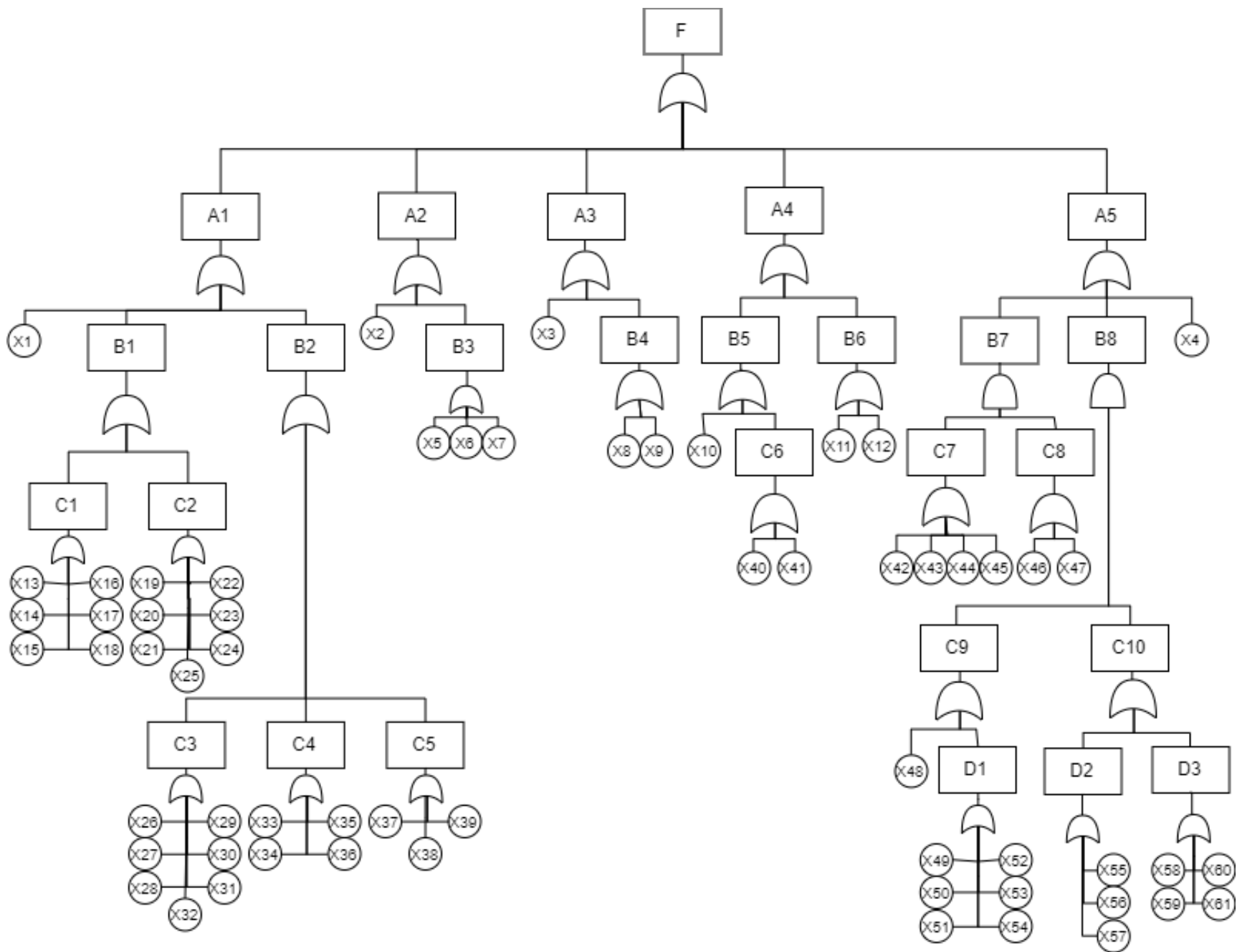


Figura 4.18 Árbol de Fallas para el Análisis de Riesgos en el caso de estudio propuesto.  
 Fuente: Elaboración propia en <https://www.diagrameditor.com/>

#### 4.4.2 Construcción de una Red Bayesiana

Una vez que contamos con el Árbol de Fallas presentado anteriormente procederemos a convertir esta estructura en una Red Bayesiana. Para realizar esto consideraremos algunas reglas planteadas que se muestran a continuación (Wang, y otros, 2017):

1. Ya que la estructura de la Red Bayesiana corresponde a un Árbol de Fallas, los eventos básicos, intermedios y el evento principal se representan como nodos raíz, nodos intermedios y el nodo hijo corresponde al evento que definimos como F: Falla en ducto de transporte. En este caso los nodos representados por una "X" serán los nodos raíz de la Red Bayesiana.
2. Los nodos de la Red Bayesiana están conectados de la misma forma que los eventos correspondientes del Árbol de Fallas, de manera que los eventos de entrada son los nodos padres y los eventos de salida son los nodos hijo.
3. Las probabilidades *a priori* de los nodos raíz de la Red Bayesiana son asignados según la probabilidad de ocurrencia de los eventos primarios en el Árbol de Fallas. En el próximo capítulo se describirán las probabilidades de ocurrencia de cada uno de los eventos considerados.
4. Las Tablas de Probabilidad Condicional de los nodos intermedios son asignados de acuerdo con el tipo de puerta ("Y" u "O"), en la siguiente figura se muestra gráficamente como cambia la estructura de puerta en los segmentos correspondientes de la Red Bayesiana:

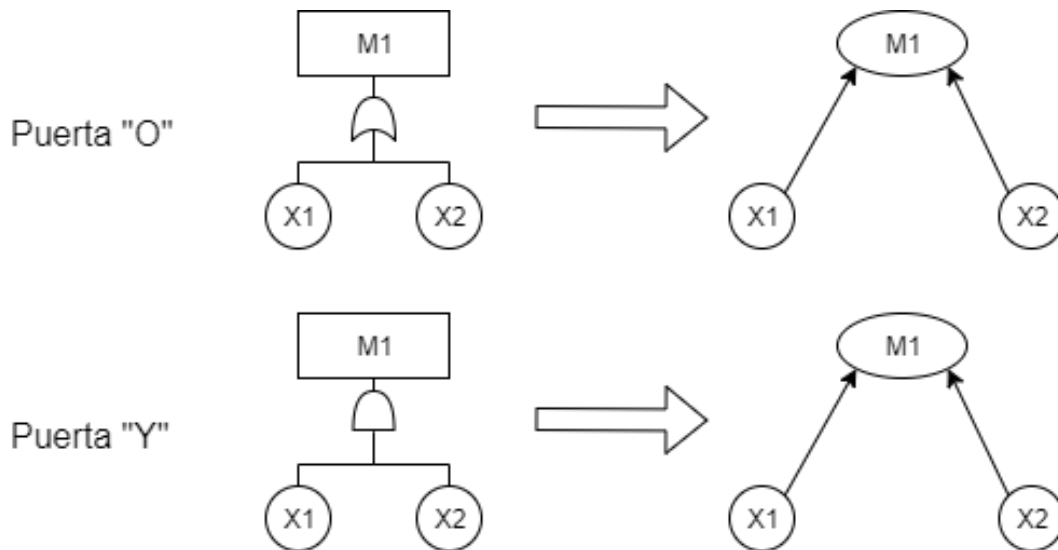


Figura 4.19 Conversión estructural para el Árbol de Fallas.  
 Fuente: Tomada de Wang, W., Shen, K., Wang, B., Dong, C., Khan, F., & Wang, Q. (2017). Failure probability analysis of the urban buried gas pipelines using Bayesian networks.

Si bien estructuralmente no parece haber distinción entre ambas puertas, las Tablas de Probabilidad que a continuación se muestran nos indican la relación que guardan dependiendo del tipo de puerta:

Tabla 23. Probabilidad Condicional de la Puerta "O".  
 Fuente: Elaboración propia.

Puerta "O"		
P(M1) si	X1=0	X1=1
X2=0	0	1
X2=1	1	1

Esto se describe como:

$$\begin{aligned}
 P(M1|X1 = 0, X2 = 0) &= 0 \\
 P(M1|X1 = 1, X2 = 0) &= 1 \\
 P(M1|X1 = 0, X2 = 1) &= 1 \\
 P(M1|X1 = 1, X2 = 1) &= 1
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

Lo anterior es para denotar que, en caso de presentarse cualquiera de los dos eventos ( $X1$  ó  $X2$ ) de forma independiente, resultaría en que se presentara el evento  $M1$ .

De forma análoga, para la puerta “Y”, la Tabla de Probabilidad Condicional sería:

Tabla 24. Probabilidad Condicional de la Puerta “Y”.  
Fuente: Elaboración propia.

Puerta “Y”		
P(M1) si	X1=0	X1=1
X2=0	0	0
X2=1	0	1

Esto se describe como:

$$\begin{aligned}
 P(M1|X1 = 0, X2 = 0) &= 0 \\
 P(M1|X1 = 1, X2 = 0) &= 0 \\
 P(M1|X1 = 0, X2 = 1) &= 0 \\
 P(M1|X1 = 1, X2 = 1) &= 1
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

Esto nos indica que el evento  $M1$  solo se presentaría cuando los dos eventos ( $X1$  ó  $X2$ ), se presenten al mismo tiempo.

Finalmente, con estas consideraciones presentadas, en la siguiente figura se muestra el resultado de la Red Bayesiana que será analizada en el Capítulo 5. Esta red fue desarrollada usando el software GeNIe, mismo que será utilizado para determinar la frecuencia de falla de los nodos intermedios de la red y el análisis de riesgos para el ducto de transporte de gas natural. Adicionalmente se establecerán los estados que puede tomar cada nodo, así como la probabilidad de ocurrencia de cada uno de ellos.

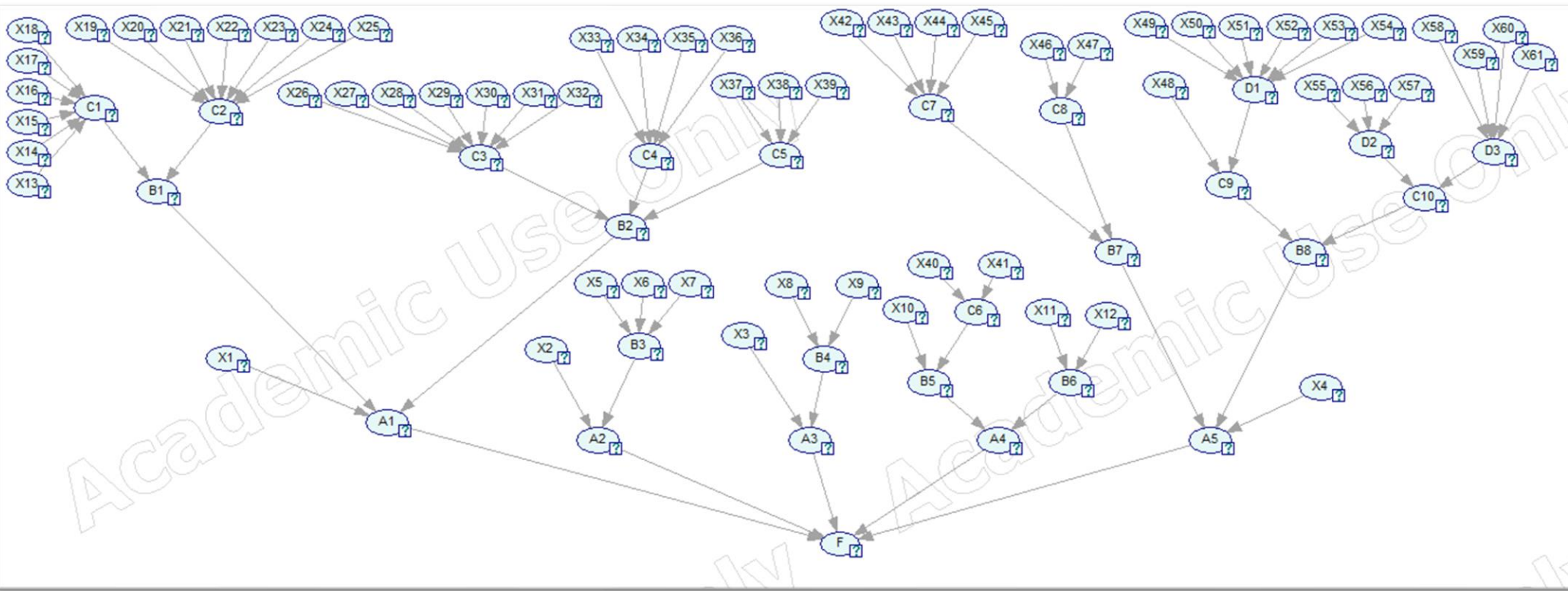


Figura 4.20 Red Bayesiana para el Análisis de Riesgos en ductos de transporte de gas natural.  
 Fuente: Elaboración propia usando el software GeNIeModeler®.

## Capítulo 5. Cuantificación y Análisis de la Red Bayesiana para el Análisis de Riesgo en el caso de aplicación

En el presente capítulo se realizará la revisión de la Red Bayesiana, comenzando por los nodos y una breve descripción de cada uno de ellos, adicionalmente se determinarán los estados que cada nodo puede tener en la Red Bayesiana para el Análisis de Riesgo en el ducto de transporte de gas natural.

Posteriormente, se mostrará la información histórica y fuentes estadísticas para la probabilidad de falla de cada nodo, se indicarán además los casos en los que la frecuencia de falla fue estimada, así como el contexto en el cual fue realizada dicha estimación.

Finalmente serán presentados los resultados producto de la información incorporada a la Red Bayesiana y la interpretación de las Tablas de Probabilidad Condicional relevantes para el caso de estudio analizado.

### 5.1 Identificación de los nodos

Una vez que tenemos la estructura la Red Bayesiana, es importante realizar una breve descripción de cada uno de los nodos que componen dicha red para evitar confusiones, ambigüedades y poder establecer los estados de cada uno de ellos.

En la siguiente tabla se enlista cada uno de los nodos que componen la Red Bayesiana mostrada en la Figura 4.19, así como una breve descripción de cada uno. Una vez definidos y explicados cada uno de estos nodos, se establecerán los posibles estados que cada nodo puede tener en la Red Bayesiana. Este modelo está definido para reflejar la probabilidad de falla del ducto de transporte en un periodo de un año.

Tabla 25. Descripción de los nodos para el Análisis de Riesgos.

Fuente: Elaboración propia.

<b>Símbolo</b>	<b>Nombre</b>	<b>Descripción</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Nombre</b>	<b>Descripción</b>
<b>F</b>	Falla en ducto de transporte	Es el evento culminante definido anteriormente, el cual puede ir desde una fuga hasta la ruptura total del ducto.	<b>B6</b>	Equipo defectuoso	Se refiere a la probabilidad de que exista alguna falla en alguno de los equipos asociados al ducto de transporte.
<b>A1</b>	Defectos de Tubería	Riesgo de falla debido a problemas internos en la tubería.	<b>B7</b>	Corrosión Interna	Se refiere a la probabilidad de que se presente corrosión dentro de las paredes internas del ducto.
<b>A2</b>	Daños por Terceros	Riesgo de falla debido a interferencias de terceros en la tubería.	<b>B8</b>	Corrosión Externa	Se refiere a la probabilidad de que se presente corrosión sobre las paredes externas del ducto.
<b>A3</b>	Peligros Naturales	Riesgo de falla debido a fenómenos naturales súbitos.	<b>C1</b>	Defectos en la tubería y componentes	Se refiere a la probabilidad de que la tubería presente cualquiera de los posibles errores de fábrica descritos en la red.
<b>A4</b>	Operaciones Incorrectas	Riesgo de falla debido a operación incorrecta del ducto debido a equipos, procesos o personal.	<b>C2</b>	Defectos en soldaduras (Durante fabricación)	Se refiere a la probabilidad de que se den errores en los procesos de soldadura durante la fabricación de la tubería.
<b>A5</b>	Corrosión, Erosión y Agrietamiento	Riesgo de falla por corrosión, erosión y/o agrietamiento por el tiempo de uso y desgaste de la tubería.	<b>C3</b>	Defectos en soldaduras (Durante construcción)	Se refiere a la probabilidad de que se den errores en los procesos de soldadura durante la construcción y ensamblado de la tubería en el sitio.
<b>B1</b>	Defectos de Fabricación	Se refiere a la probabilidad de que existan defectos en la tubería durante el proceso de fabricación.	<b>C4</b>	Defectos en la instalación de la tubería	Se refiere a la probabilidad de que se den errores en los procesos de construcción y ensamblado de la tubería en el sitio que no implican soldadura.
<b>B2</b>	Defectos de Construcción	Se refiere a la probabilidad de que existan defectos en la tubería durante la instalación y soldadura en el sitio.	<b>C5</b>	Defectos en la construcción de la trinchera	Se refiere a la probabilidad de que se den errores en los procesos de excavación y llenado de las trincheras donde es instalada la tubería.
<b>B3</b>	Vandalismo, terrorismo, extracciones clandestinas	Se refiere a la probabilidad de que la tubería sea dañada debido a interferencia por actos ilícitos.	<b>C6</b>	Errores humanos	Se refiere a cualquier error derivado de la intervención del personal durante la operación del ducto.
<b>B4</b>	Clima extremo	Se refiere a la probabilidad de ocurrencia de algún fenómeno climático grave para la integridad del ducto.	<b>C7</b>	Medio Ácido	Se refiere al conjunto de condiciones que puede propiciar un medio ácido dentro de la tubería.
<b>B5</b>	Operaciones fuera de las condiciones seguras	Se refiere a la probabilidad de llegar a operar en condiciones fuera de los límites seguros de diseño.			

Tabla 25. Descripción de los nodos para el Análisis de Riesgos.  
Fuente: Elaboración propia.

<b>Símbolo</b>	<b>Nombre</b>	<b>Descripción</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Nombre</b>	<b>Descripción</b>
<b>C8</b>	Falla del recubrimiento interno	Se refiere a la probabilidad de que el recubrimiento interno de la tubería se desgaste o permita el desarrollo de la corrosión interna debido a un medio ácido.	<b>X5</b>	Malas relaciones públicas	Se refiere a las condiciones de la empresa con el entorno social cercano a la ruta del ducto, lo que propicia actos de vandalismo, rechazo, entre otras.
<b>C9</b>	Ambiente corrosivo	Se refiere a la probabilidad de que el sitio donde está situada la tubería propicie la corrosión en las paredes externas.	<b>X6</b>	Inseguridad local	Se refiere a las condiciones de seguridad pública en la zona y el control de actos ilícitos mediante el uso de fuerza pública como robo de combustible, terrorismo, entre otras.
<b>C10</b>	Falla de los sistemas de protección	Se refiere a la probabilidad de fallo de los mecanismos con los que cuenta la tubería para prevenir la corrosión externa.	<b>X7</b>	Poca supervisión administrativa del regulado	Se refiere a la falta de control y monitoreo de las condiciones operativas del ducto como monitoreo de variables (presión, temperatura, flujo) para determinar posibles daños por terceros.
<b>D1</b>	Suelo corrosivo	Se refiere a la probabilidad de que las características del suelo donde está situada la tubería propicien la corrosión en las paredes externas.	<b>X8</b>	Inundaciones	Se refiere a la probabilidad de que una inundación cause falla en la tubería debido a cambios en la carga y el relleno de la trinchera.
<b>D2</b>	Sistema de Protección Catódica	Se refiere a la probabilidad de falla del sistema de protección catódica.	<b>X9</b>	Descarga eléctrica atmosférica	Se refiere a la probabilidad de que el impacto de un rayo sobre el suelo donde está enterrada la tubería ocasione una perforación o daños importantes a la tubería.
<b>D3</b>	Recubrimiento Externo	Se refiere a la probabilidad de que el recubrimiento externo de la tubería falle, ya sea por desgaste o incorrecta aplicación.	<b>X10</b>	Procedimientos incorrectos	Se refiere a errores establecidos en los manuales o procedimientos escritos de operación del ducto y que no son atribuibles a un error del personal operativo que los aplican.
<b>X1</b>	Defectos de Diseño	Son aquellos defectos que son originados por errores en el diseño del proyecto respecto a condiciones de variables, requisitos de materiales y límites de operación.	<b>X11</b>	Mal funcionamiento de equipos, componentes y accesorios	Se refiere a errores en la operación diaria de cualquiera de los equipos, componentes y accesorios relacionados con el funcionamiento del ducto como bombas, compresores, válvulas, medidores, etc.
<b>X2</b>	Excavación, construcción u otras actividades de trabajo	Son aquellos daños ocasionados por terceros durante trabajos de construcción de obras aledañas a la ruta del ducto.			
<b>X3</b>	Amenazas Geológicas	Son aquellas amenazas originadas por fenómenos sísmicos, desplazamiento del terreno, hundimientos y deslizamientos, entre otras.			
<b>X4</b>	Agrietamiento	Se refiere a la probabilidad de desarrollar grietas por desgaste y uso de la tubería.			

Tabla 25. Descripción de los nodos para el Análisis de Riesgos.  
Fuente: Elaboración propia.

<b>Símbolo</b>	<b>Nombre</b>	<b>Descripción</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Nombre</b>	<b>Descripción</b>
<b>X12</b>	Componente defectuoso o no funcional	Se refiere a la no disponibilidad de un componente que resultó defectuoso de fábrica de manera repentina como alarmas, válvulas de alivio de presión u otros dispositivos que no intervienen en la operación diaria.	<b>X22</b>	Porosidad en la soldadura	Se refiere a una soldadura de mala calidad que presenta poros, y por tanto, menor resistencia mecánica.
<b>X13</b>	Contaminación del metal	Se refiere a un metal que presenta impurezas de fábrica.	<b>X23</b>	Falta de penetración	Se refiere a una soldadura superficial que no permite la unión de ambas piezas.
<b>X14</b>	Grano grueso	Se refiere a un metal que fue fabricado con un grano de mayor grueso a lo especificado lo que resulta en una disminución de las propiedades mecánicas requeridas para los esfuerzos presentes en la tubería.	<b>X24</b>	Sobrecalentado	Se refiere a un calentamiento excesivo de la soldadura, lo que lleva a una debilidad del punto de unión de la soldadura.
<b>X15</b>	Mala microestructura	Se refiere a un metal cuya microestructura cuyo arreglo no satisface las propiedades mecánicas requeridas para los esfuerzos requeridos.	<b>X25</b>	Superficie por soldar con escoria	Se refiere a la presencia de impurezas y residuos en la soldadura, lo que provoca debilidad de la misma.
<b>X16</b>	Mala calidad de procesamiento	Se refiere a errores en el procesamiento del metal resultando en un metal de calidad menor y menor resistencia.	<b>X26</b>	Métodos de soldadura incorrectos	Se refiere errores durante el proceso de soldadura en el sitio.
<b>X17</b>	Material no apto	Se refiere al uso o proporciones incorrectas de materiales en la preparación de las aleaciones para las tuberías.	<b>X27</b>	Mala calidad de materiales de soldadura	Se refiere a materiales de baja calidad para realizar las soldaduras.
<b>X18</b>	Grado de ovalidad excedido	Se refiere a errores en la geometría óptima de la tubería durante su fabricación, lo cual reduce su resistencia mecánica.	<b>X28</b>	Mal pretratamiento de la superficie a soldar	Se refiere a una incorrecta preparación de la superficie donde se aplica la soldadura.
<b>X19</b>	Métodos de soldadura incorrectos	Se refiere errores durante el proceso de soldadura de fábrica.	<b>X29</b>	Porosidad en la soldadura	Se refiere a una soldadura de mala calidad que presenta poros, y, por tanto, menor resistencia mecánica.
<b>X20</b>	Mala calidad de materiales de soldadura	Se refiere a materiales de baja calidad para realizar las soldaduras.	<b>X30</b>	Falta de penetración	Se refiere a una soldadura superficial que no permite la unión de ambas piezas.
<b>X21</b>	Mal pretratamiento de la superficie a soldar	Se refiere a una incorrecta preparación de la superficie donde se aplica la soldadura.	<b>X31</b>	Sobrecalentado	Se refiere a un calentamiento excesivo de la soldadura, lo que lleva a una debilidad del punto de unión de la soldadura.
			<b>X32</b>	Superficie por soldar con escoria	Se refiere a la presencia de impurezas y residuos en la soldadura, lo que provoca debilidad de esta.
			<b>X33</b>	Desalineamiento	Se refiere a un mal alineamiento de las piezas de tubería al momento de ser instalada.

Tabla 25. Descripción de los nodos para el Análisis de Riesgos.  
Fuente: Elaboración propia.

<b>Símbolo</b>	<b>Nombre</b>	<b>Descripción</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Nombre</b>	<b>Descripción</b>
<b>X34</b>	Doble por flexión o pandeo	Se refiere a un doblez causado por daños al instalar la tubería.			azufre, el cual es un compuesto corrosivo.
<b>X35</b>	Daños en el recubrimiento anticorrosivo, protección catódica y de lastre	Se refiere a daños por impactos durante la instalación de la tubería provocado por la maquinaria, equipo o personal en las capas internas de protección de la tubería.	<b>X44</b>	Alto contenido de CO <sub>2</sub>	Se refiere a un gas con alto contenido de dióxido de carbono, el cual no es un compuesto corrosivo; sin embargo, en presencia de agua forma ácido carbónico el cual puede ser corrosivo para el acero de las tuberías.
<b>X36</b>	Daños en recubrimiento mecánico	Se refiere a daños por impactos durante la instalación de la tubería provocado por la maquinaria, equipo o personal en las capas externas de protección de la tubería.	<b>X45</b>	Alto contenido de H <sub>2</sub> O (Agua)	Se refiere a un gas con alto contenido de vapor de agua o moléculas de agua disueltas el gas.
<b>X37</b>	Poca profundidad	Se refiere a la instalación de una tubería a poca profundidad, lo cual al paso del tiempo expone al exterior a dicha tubería.	<b>X46</b>	Sin recubrimiento interno	Se refiere a la instalación de una tubería sin un recubrimiento anticorrosivo para las paredes internas.
<b>X38</b>	Inestabilidad de pendiente	Se refiere a una pendiente mal equilibrada en la instalación de la tubería.	<b>X47</b>	Daño al recubrimiento interno	Se refiere a los daños por desgaste del recubrimiento interno por el tiempo de uso.
<b>X39</b>	Errores en el relleno de la trinchera	Se refiere a un error en la compactación del terreno lo que implica que la tubería pueda tener fallas o desalineamientos por movimiento y uso de esta.	<b>X48</b>	Otros metales	Se refiere a la presencia de algunos metales pesados corrosivos en el suelo como el Cobre, Hierro, Níquel, Zinc, Manganeso, entre otros, que pudiera favorecer ambientes corrosivos.
<b>X40</b>	Procedimientos no aplicados	Se refiere a la omisión del personal operativo de realizar algún procedimiento establecido en los procedimientos escritos.	<b>X49</b>	Exceso de sulfuros	Se refiere a aquellos suelos con un contenido alto de compuestos inorgánicos con azufre.
<b>X41</b>	Falta de capacitación	Se refiere al desconocimiento de los procedimientos por el personal operativo ante los distintos eventos que pueden suceder durante el funcionamiento del ducto de transporte.	<b>X50</b>	Alto contenido en sales	Se refiere a aquellos suelos altamente salinos los cuales favorece la corrosión.
<b>X42</b>	Alto contenido de H <sub>2</sub> S	Se refiere a un gas con alto contenido de sulfuro de hidrógeno, el cual es un compuesto corrosivo.	<b>X51</b>	PH bajo	Se refiere a aquellos suelos con un PH bajo, resultando en un medio ácido que promueve la corrosión.
<b>X43</b>	Alto contenido de SO <sub>2</sub>	Se refiere a un gas con alto contenido de dióxido de	<b>X52</b>	Alta humedad	Se refiere a suelos con alta cantidad de agua absorbida que promueve un ambiente corrosivo.
			<b>X53</b>	Alto contenido de O <sub>2</sub>	Se refiere a aquellos suelos ricos en oxígeno el cual es un agente oxidante fuerte.
			<b>X54</b>	Corrosión microbiológica	Se refiere al fenómeno por el cual ciertas poblaciones de microorganismos en el

Tabla 25. Descripción de los nodos para el Análisis de Riesgos.

Fuente: Elaboración propia.

Símbolo	Nombre	Descripción	Símbolo	Nombre	Descripción
X55		suelo directamente oxidan el metal o producen residuos oxidantes como compuestos sulfurados o ácidos.	X58	Daño externo	Se refiere al daño por desgaste en el recubrimiento externo debido al tiempo de uso.
	Diseño o selección incorrecta	Se refiere al error del diseñador en la selección de los sistemas de protección catódica en cuanto a la capacidad o condiciones requeridas de funcionamiento.	X59	Mal revestimiento en juntas	Se refiere a la incorrecta aplicación del recubrimiento externo en las juntas de la tubería el cual permite que se acumulen compuestos corrosivos.
	Falla en el suministro de energía	Se refiere a un fallo en el suministro de energía eléctrica al sistema de protección catódica.	X60	Mala calidad de construcción	Se refiere a una calidad deficiente de aplicación del recubrimiento externo en la tubería lo que provoca desprendimiento o mayor desgaste.
	Blindaje	Se refiere al fenómeno por el cual el recubrimiento externo de la tubería bloquea el paso de la corriente eléctrica del sistema de protección catódica instalado evitando su funcionamiento.	X61	Selección incorrecta del recubrimiento externo	Se refiere a la selección de un recubrimiento externo el cual no es apto para las condiciones del suelo donde está instalado.

Una vez que conocemos de forma detallada los nodos que componen la Red Bayesiana, es conveniente aclarar que, cada nodo puede representar lo siguiente:

- Una variable aleatoria discreta con un número finito de estados en el cual cada estado tiene una probabilidad asociada de ocurrencia.
- Una variable aleatoria continua asociada a una función de densidad, la cual está determinada por un parámetro de media y varianza.

En el presente análisis solo se ocuparán variables aleatorias discretas.

Anteriormente, se introdujo el término Tabla de Probabilidad Condicional (TPC), esta tabla determina el nivel de interrelación de los nodos que conforman dicha tabla, posteriormente, en el presente capítulo, se presentarán las Tablas de Probabilidad Condicional.

Adicionalmente y para simplificar cálculos, se analizarán las probabilidades de cada nodo de forma binaria utilizando los siguientes criterios:

- Estado 0 / Falso: No ocurrencia del evento
- Estado 1 / Verdadero: Ocurrencia del evento

Sin embargo, cabe mencionar que, a diferencia de los Árboles de Fallas, las Redes Bayesianas no están restringidos a esto y se pueden incorporar estados intermedios para cada variable según se requiera y a juicio del equipo encargado del Análisis de Riesgo para una mayor precisión del modelo o de los nodos.

Finalmente, se menciona que el presente modelo ha sido definido para analizar las probabilidades de falla en un ducto para un periodo de un año en un segmento de un kilómetro de longitud.

## **5.2 Obtención de datos y probabilidades a priori para los nodos padre**

A partir de los nodos padre obtenidos, el siguiente paso es la obtención de datos para determinar la probabilidad de cada uno de los nodos de la red. Estos datos fueron obtenidos a través de información estadística de diversas fuentes, las cuales se presentarán a continuación.

En general, se tiene información disponible sobre muchas de las causas que propician la falla en ductos; sin embargo, en algunos casos nos referiremos al juicio de expertos en la bibliografía citada.

Las probabilidades citadas fueron tomadas de tres principales fuentes y adaptadas para el presente caso de estudio. Se menciona además que el presente modelo ha sido definido para analizar las probabilidades de falla en un ducto para un periodo de un año en un segmento de un kilómetro de longitud de acuerdo con la información consultada:

Las primeras dos fuentes fueron utilizadas para obtener las probabilidades relativas a los nodos referentes a defectos de diseño, fabricación y construcción en tuberías, así como a problemas operativos:

- da Cunha, S. B. (Noviembre de 2016). A review of quantitative risk assesment on onshore pipelines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 44, 282-298. doi:https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.09.016
- Wang, W., Shen, K., Wang, B., Dong, C., Khan, F., & Wang, Q. (2017). Failure probability analysis of the urban buried gas pipelines using Bayesian networks. *Process Safety and Environmental Protection*, 111, 678-686.

Para conocer la probabilidad de ocurrencia de ciertos fenómenos climatológicos o sociales, se recurrió al Atlas Nacional de Riesgos del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), que puede ser consultado en:

- <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/>

Tabla 26. Probabilidad de ocurrencia de los nodos para el Análisis de Riesgos.  
 Fuente: *Elaboración Propia a partir de diversas fuentes citadas en el presente trabajo.*

<b>Símbolo</b>	<b>Nombre</b>	<b>Probabilidad de ocurrencia</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Nombre</b>	<b>Probabilidad de ocurrencia</b>
<b>X1</b>	Defectos de Diseño	3.10E-03	<b>X30</b>	Falta de penetración	4.13E-04
<b>X2</b>	Excavación, construcción u otras actividades de trabajo	6.50E-03	<b>X31</b>	Sobrecalentado	5.67E-04
<b>X3</b>	Amenazas Geológicas	1.24E-04	<b>X32</b>	Superficie por soldar con escoria	8.72E-04
<b>X4</b>	Agrietamiento	1.22E-03	<b>X33</b>	Desalineamiento	2.20E-03
<b>X5</b>	Malas relaciones públicas	1.12E-03	<b>X34</b>	Doble por flexión o pandeo	2.15E-03
<b>X6</b>	Inseguridad local	3.35E-03	<b>X35</b>	Daños en el recubrimiento anticorrosivo, protección catódica y de lastre	4.56E-03
<b>X7</b>	Poca supervisión administrativa del regulado	3.60E-04	<b>X36</b>	Daños en recubrimiento mecánico	4.48E-03
<b>X8</b>	Inundaciones	4.14E-03	<b>X37</b>	Poca profundidad	1.09E-03
<b>X9</b>	Descarga eléctrica atmosférica	5.22E-05	<b>X38</b>	Inestabilidad de pendiente	9.41E-04
<b>X10</b>	Procedimientos incorrectos	2.20E-04	<b>X39</b>	Errores en el relleno de la trinchera	1.82E-03
<b>X11</b>	Mal funcionamiento de equipos, componentes y accesorios	5.48E-04	<b>X40</b>	Procedimientos no aplicados	3.42E-03
<b>X12</b>	Componente defectuoso o no funcional	7.34E-04	<b>X41</b>	Falta de capacitación	6.04E-03
<b>X13</b>	Contaminación del metal	5.54E-04	<b>X42</b>	Alto contenido de H <sub>2</sub> S	2.28E-02
<b>X14</b>	Grano grueso	7.25E-04	<b>X43</b>	Alto contenido de SO <sub>2</sub>	6.24E-04
<b>X15</b>	Mala microestructura	8.65E-04	<b>X44</b>	Alto contenido de CO <sub>2</sub>	1.35E-03
<b>X16</b>	Mala calidad de procesamiento	2.42E-03	<b>X45</b>	Alto contenido de H <sub>2</sub> O (Agua)	1.09E-02
<b>X17</b>	Material no apto	5.19E-04	<b>X46</b>	Sin recubrimiento interno	1.16E-04
<b>X18</b>	Grado de ovalidad excedido	6.35E-04	<b>X47</b>	Daño al recubrimiento interno	6.73E-03
<b>X19</b>	Métodos de soldadura incorrectos	3.84E-04	<b>X48</b>	Otros metales	1.36E-03
<b>X20</b>	Mala calidad de materiales de soldadura	6.78E-04	<b>X49</b>	Exceso de sulfuros	2.28E-03
<b>X21</b>	Mal pretratamiento de la superficie a soldar	6.21E-04	<b>X50</b>	Alto contenido en sales	2.08E-03
<b>X22</b>	Porosidad en la soldadura	9.92E-04	<b>X51</b>	PH bajo	2.14E-03
<b>X23</b>	Falta de penetración	4.13E-04	<b>X52</b>	Alta humedad	4.11E-03
<b>X24</b>	Sobrecalentado	5.67E-04	<b>X53</b>	Alto contenido de O <sub>2</sub>	2.16E-03
<b>X25</b>	Superficie por soldar con escoria	8.72E-04	<b>X54</b>	Corrosión microbiológica	1.79E-03
<b>X26</b>	Métodos de soldadura incorrectos	3.84E-04	<b>X55</b>	Diseño o selección incorrecta	1.42E-03
<b>X27</b>	Mala calidad de materiales de soldadura	6.78E-04	<b>X56</b>	Falla en el suministro de energía	2.10E-04
<b>X28</b>	Mal pretratamiento de la superficie a soldar	6.21E-04	<b>X57</b>	Blindaje	6.69E-03
<b>X29</b>	Porosidad en la soldadura	9.92E-04	<b>X58</b>	Daño externo	6.61E-03
			<b>X59</b>	Mal revestimiento en juntas	1.28E-02
			<b>X60</b>	Mala calidad de construcción	1.67E-03
			<b>X61</b>	Selección incorrecta del recubrimiento externo	1.53E-02

### 5.3 Probabilidades a posteriori

Una de las ventajas de las Redes Bayesianas es la posibilidad de realizar razonamiento bidireccional, es decir, una Red Bayesiana es útil tanto para el análisis predictivo como para el análisis diagnóstico. En este caso nos ocupa, solo realizaremos el análisis predictivo para la frecuencia de falla del segmento de ducto de transporte de gas natural propuesto.

Las Redes Bayesianas se han vuelto un método mucho más viable para realizar este tipo de análisis gracias a los recientes avances tecnológicos que han permitido el desarrollo de software con algoritmos más complejos destinados al cálculo de la propagación de evidencia en cada uno de los nodos de la red.

El cálculo de las probabilidades a posteriori de la Red Bayesiana se hizo mediante el algoritmo “Junction Tree” (Árboles de derivación) usando el software de acceso libre llamado *GenieModeler* versión 3.0.R2<sup>13</sup> de la empresa *BayesFusion, LLC*® (Figura 5.1). Este algoritmo sirve para convertir la gráfica dirigida acíclica mostrada en la figura 4.20 en un árbol de derivación y calcular las probabilidades a posteriori para el análisis de frecuencia de falla en el segmento de ducto.



Figura 5.1 Logotipo de BayesFusion, LLC®

A continuación, se describirán las distribuciones a posteriori para cada uno de los nodos para el análisis de falla del segmento de ducto de transporte. Inicialmente, se mostrarán las subsecciones A1, A2, A3, A4 y A5 de la Red Bayesiana en las figuras 5.2, 5.3, 5.4, 5.7 y 5.8 respectivamente para mayor detalle. Las figuras fueron realizadas en el software GeNIe para determinar las probabilidades a posteriori. Se menciona además que, posterior a la propagación de evidencia, los nodos padre en la red no cambian respecto a las probabilidades a priori debido a que no hay un proceso de propagación de mensajes.

---

<sup>13</sup> Descargado para fines académicos en <https://www.bayesfusion.com/>

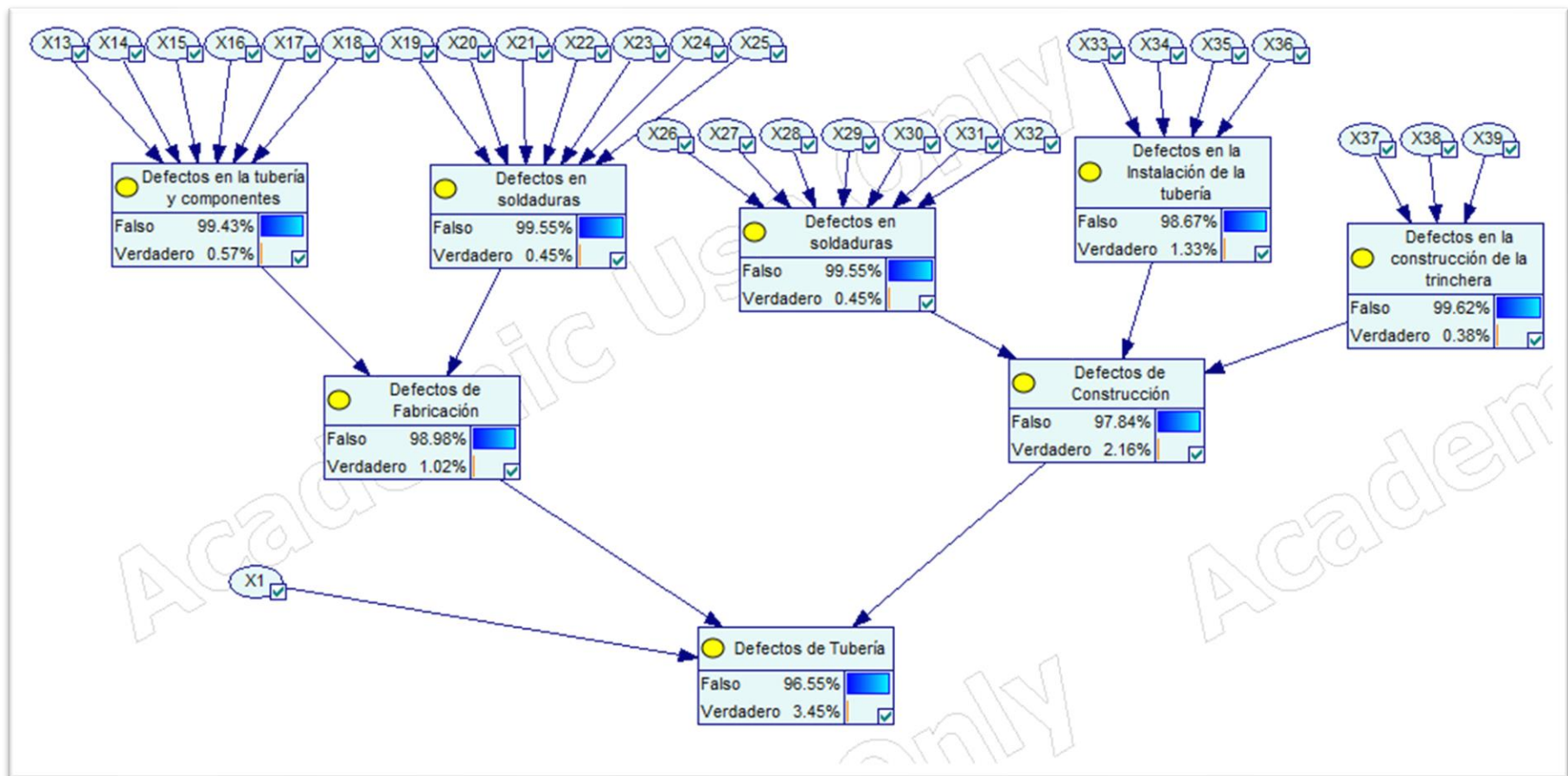


Figura 5.2 Diagrama para el Nodo A1: “Defectos de Tubería”.  
 Fuente: Elaboración propia usando el software GeNIeModeler®.

En esta sección de la Red Bayesiana (Figura 5.2), se puede observar una probabilidad de ocurrencia de 3.45% de que existan “Defectos de tubería” derivado de cualquiera de los nodos intermedios anteriores, los cuales son “Defectos de fabricación” o “Defectos de construcción” (en sitio), con una probabilidad de 1.02% y 2.16% de ocurrencia respectivamente, esto tiene sentido dado que los procedimientos de construcción e instalación de la tubería en el sitio están sujetos tienen un margen de error mucho mayor que los procedimientos de fabricación de componentes en fábrica.

Adicionalmente, también se puede observar que existe una probabilidad de ocurrencia de 1.33% de “Defectos en la instalación” de la tubería lo que es mucho mayor a los otros nodos intermedios “Defectos en soldaduras” y “Defectos en la construcción de trinchera”, los cuales tienen una probabilidad de 0.45% y 0.38% respectivamente. Esto nos indica que durante la construcción son relativamente más comunes los errores por desalineamiento, pandeo, flexión en tuberías, impactos por la misma actividad, etc., que los errores causados por problemas relacionados con procesos de soldadura o de relleno de las trincheras de tuberías.

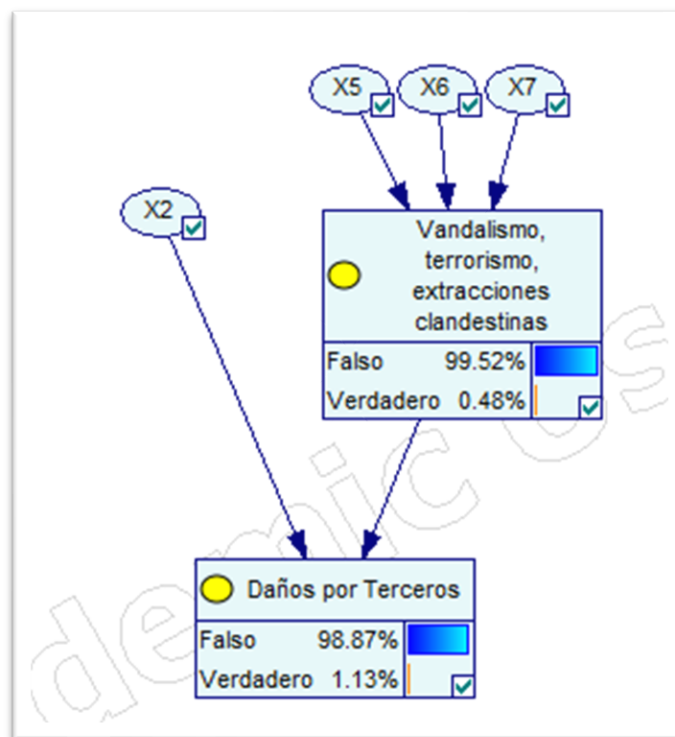


Figura 5.3 Diagrama para el Nodo A2: “Daños por Terceros”.  
Fuente: Elaboración propia usando el software GeNIeModeler®.

Continuando a la siguiente sección de la Red Bayesiana (Figura 5.3), se describe una probabilidad de ocurrencia de 1.13% de que existan “Daños por Terceros” derivado de dos nodos anteriores, los cuales son “Excavación, construcción u otras actividades de trabajo” o “Vandalismo, terrorismo, extracciones clandestinas”, con una probabilidad de 0.65% (Ver Tabla 26) y 0.48% de ocurrencia respectivamente.

Dichos valores son relevantes para considerar, ya que de acuerdo con (da Cunha, 2016) los principales daños en tuberías son causados por interferencia externa (intencional o accidental) de los ductos. Sin embargo, es importante mencionar que para el presente caso de estudio no son mayores los valores, debido a que no es común el robo de gas natural en ductos de transporte en México, adicionalmente la ruta seleccionada no cruza zonas densamente pobladas por lo que el impacto de estos nodos se disminuye. Cabe mencionar que para otros tramos de ducto estos valores podrían aumentar debido que la probabilidad de esto aumenta en zonas de mayor concentración poblacional.

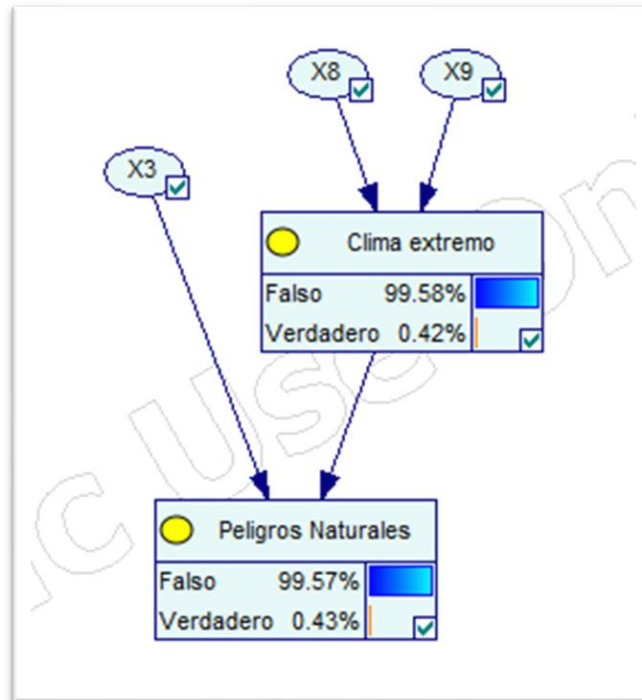


Figura 5.4 Diagrama para el Nodo A3: "Peligros Naturales".  
Fuente: Elaboración propia usando el software GeNIeModeler®.

Por otro lado, en esta sección de la Red Bayesiana (Figura 5.4), se muestra una probabilidad de ocurrencia de 0.43% de que existan "Peligros Naturales" derivado de dos nodos anteriores, los cuales son "Amenazas Geológicas" o "Clima Extremo", con una probabilidad de 0.012% (Ver Tabla 26) y 0.42% de ocurrencia respectivamente. Se puede notar una amplia diferencia entre el nodo "Amenazas Geológicas" y "Clima Extremo", esto se explicará a continuación.

Se tomó un valor de 0.012% de falla para el nodo de "Amenazas Geológicas" debido a que la ruta seleccionada pasa a través de los estados de Tamaulipas y Nuevo León, los cuales se encuentran clasificados en una zona de bajo riesgo sísmico como se aprecia en la siguiente figura:



Figura 5.5 Mapa de riesgo sísmico en México.

Fuente: Tomada de la página:

<https://www.altonivel.com.mx/actualidad/mexico/estas-las-zonas-mayor-riesgo-sismico-la-ciudad-mexico/>

Adicionalmente el nodo “Clima Extremo” se compone de dos nodos padre los cuales son “Inundaciones” con una probabilidad de 0.41% de ocurrencia y “Descargas eléctricas atmosféricas” con una probabilidad de 0.005% de ocurrencia. Como se puede ver, es alto el riesgo relativo por inundación respecto a otros fenómenos naturales de la zona. Esto se muestra en la siguiente figura, ya que el tramo de ducto de transporte que recorre esta zona es altamente susceptible a sufrir inundaciones con daños importantes.

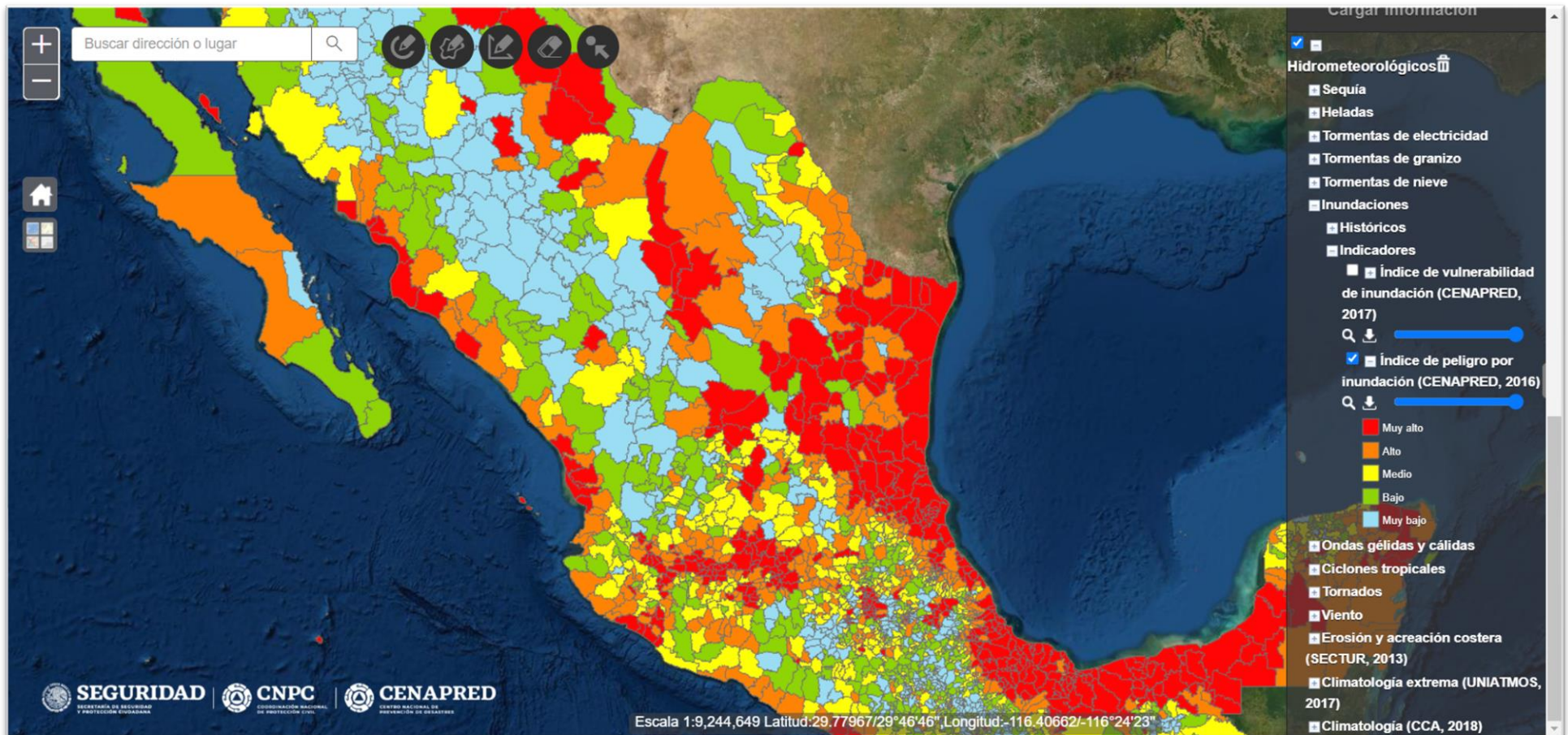


Figura 5.6 Índice de Peligro por Inundación en México.  
 Fuente: Tomado del Atlas Nacional de Riesgos de CENAPRED en  
<http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/portal/fenomenos/>

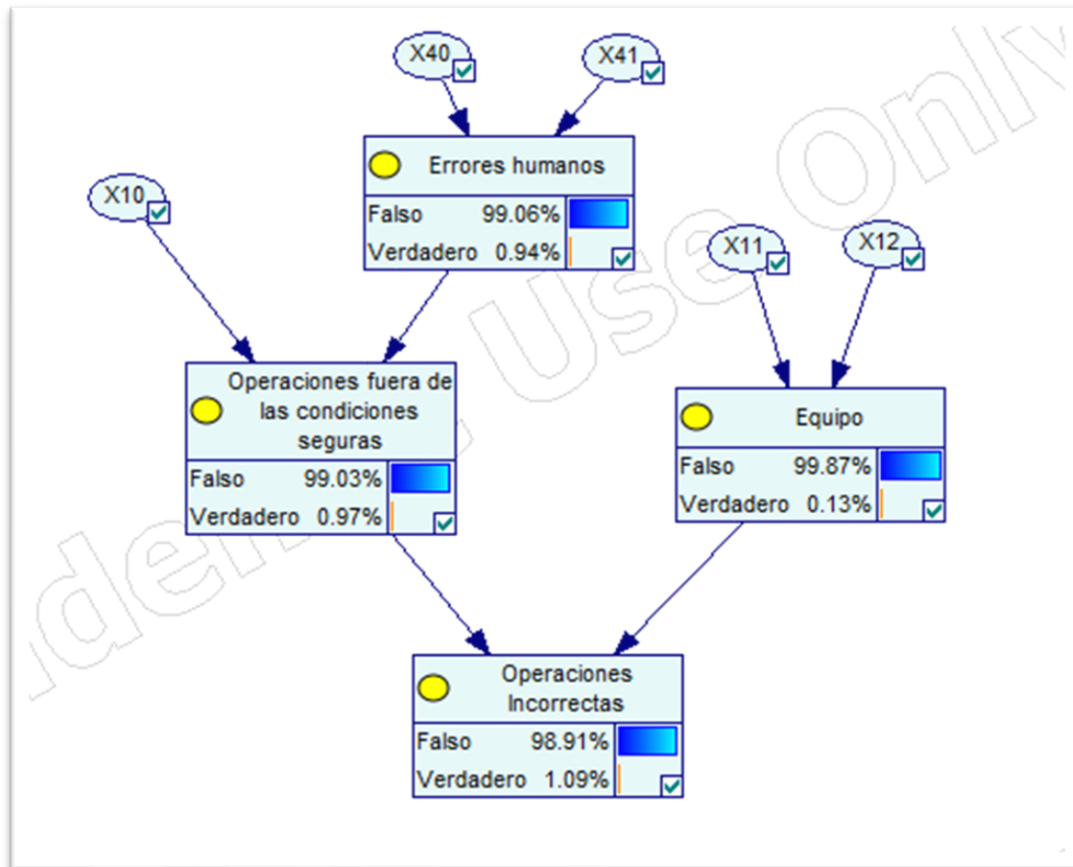


Figura 5.7 Diagrama para el Nodo A4: "Operaciones Incorrectas".  
Fuente: Elaboración propia usando el software GeNIeModeler®.

Pasando a la siguiente sección de la Red Bayesiana (Figura 5.7), se muestra que para el nodo "Operaciones Incorrectas" se tiene una probabilidad de ocurrencia de 1.09% de que se presente el escenario. Lo anterior causado por "Operaciones fuera de las condiciones seguras" o debido a falla del "Equipo". El nodo "Operaciones fuera de las condiciones seguras" tiene una probabilidad de ocurrencia de 0.97% debido la ocurrencia de cualquiera de los nodos "Procedimientos incorrectos" o "Errores Humanos" y el nodo "Equipo" tiene una probabilidad de ocurrencia de 0.13%. De esto se puede inferir que la mayor causa de que el ducto se exponga a falla por operaciones incorrectas es debido a errores humanos el cual tiene una probabilidad de ocurrencia de 0.94%, lo cual revela la importancia de contar con procedimientos y manuales de capacitación adecuados para prevenir este tipo de escenarios.

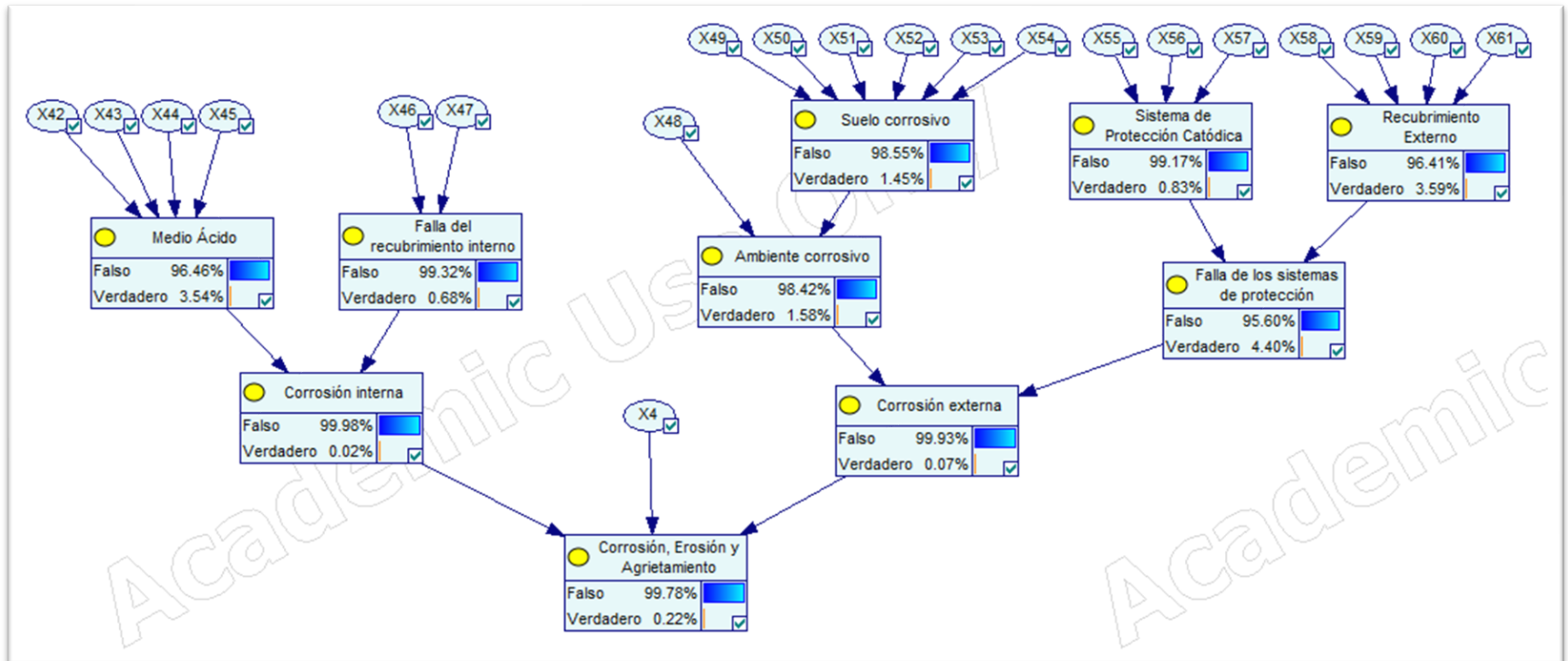


Figura 5.8 Diagrama para el Nodo A5: "Corrosión, Erosión y Agrietamiento".

Fuente: Elaboración propia usando el software GeNIeModeler®.

Para finalizar, la última sección de la Red Bayesiana (Figura 5.8), hace referencia a la frecuencia de falla debido a "Erosión, Corrosión y Agrietamiento" resultando una probabilidad de ocurrencia de 0.19% de que se presente cualquiera de estos fenómenos y resulte en una falla que resulte en ruptura o fuga de la tubería. Lo anterior debido a los efectos conjuntos de los nodos "Corrosión Interna", "Corrosión Externa" y "Agrietamiento". Se denota que no se están tomando los efectos de la erosión debido a que se trata de una tubería enterrada.

Sobre el nodo “Corrosión interna” se menciona que tuvo una probabilidad de ocurrencia de 0.02%. La razón de esto es porque este es el primero de los dos nodos de la Red Bayesiana que está definido por una compuerta “Y”, esto quiere decir que los nodos que lo integran deben presentarse simultáneamente para que exista el fenómeno de corrosión interna en el ducto. En otras palabras, se necesita que exista un “Medio ácido” al interior del ducto y que, además, exista una falla del “Recubrimiento interno” del ducto. Dichos nodos tienen una probabilidad de ocurrencia de 3.54% y 0.68% respectivamente, lo cual explica que disminuya aún más la probabilidad de que se presenten ambos eventos al mismo tiempo.

Este resultado nos indica que, incluso en condiciones que favorecen la aparición de corrosión interna como el manejo de un gas con un alto contenido de compuestos oxidantes ( $H_2S$ ,  $SO_2$ ,  $CO_2$  o  $H_2O$ ), las medidas de protección correctas en el recubrimiento interno garantizan la preservación de la integridad estructural del ducto.

De forma análoga, el nodo “Corrosión externa” tuvo una probabilidad de ocurrencia de 0.07%. Este es el segundo de los dos nodos de la Red Bayesiana que está conformado por una compuerta “Y”, lo que implica que los nodos que lo integran deben presentarse simultáneamente para que exista el fenómeno de corrosión externa en el ducto. Para que suceda esto, se necesita que exista un “Ambiente corrosivo” en el suelo donde se entierra el ducto y que, además, exista una “Falla de los sistemas de protección” del ducto. Dichos nodos tienen una probabilidad de ocurrencia de 1.58% y 4.40% respectivamente.

Cabe mencionar que resulta mayor la probabilidad de ocurrencia del fenómeno de corrosión externa que interna debido a que la región (Estados de Tamaulipas y Nuevo León) por la que cruza el tramo de ducto seleccionado para el presente caso de estudio es altamente salino y corrosivo.

Como se puede observar, las medidas de protección, tanto para corrosión externa e interna son de suma importancia en la preservación de la integridad del ducto. Estas medidas de protección se encuentran establecidas principalmente en la **NOM-007-ASEA-2017**, *Transporte de gas natural, etano y gas asociado al carbón mineral por medio de ductos*, y son mencionadas también como sujetas a monitoreo en la **NOM-009-ASEA-2017**, *Administración de la integridad de ductos de recolección, transporte y distribución de hidrocarburos, petrolíferos y petroquímicos*.

Finalmente, y una vez que se cuenta con la evidencia para cada uno de los nodos anteriores, se obtiene que la frecuencia de falla para el segmento de ducto **San Fernando - Los Ramones** es de **0.062 km<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>** como se observa en la Figura 5.9 que muestra la Red Bayesiana resultante:

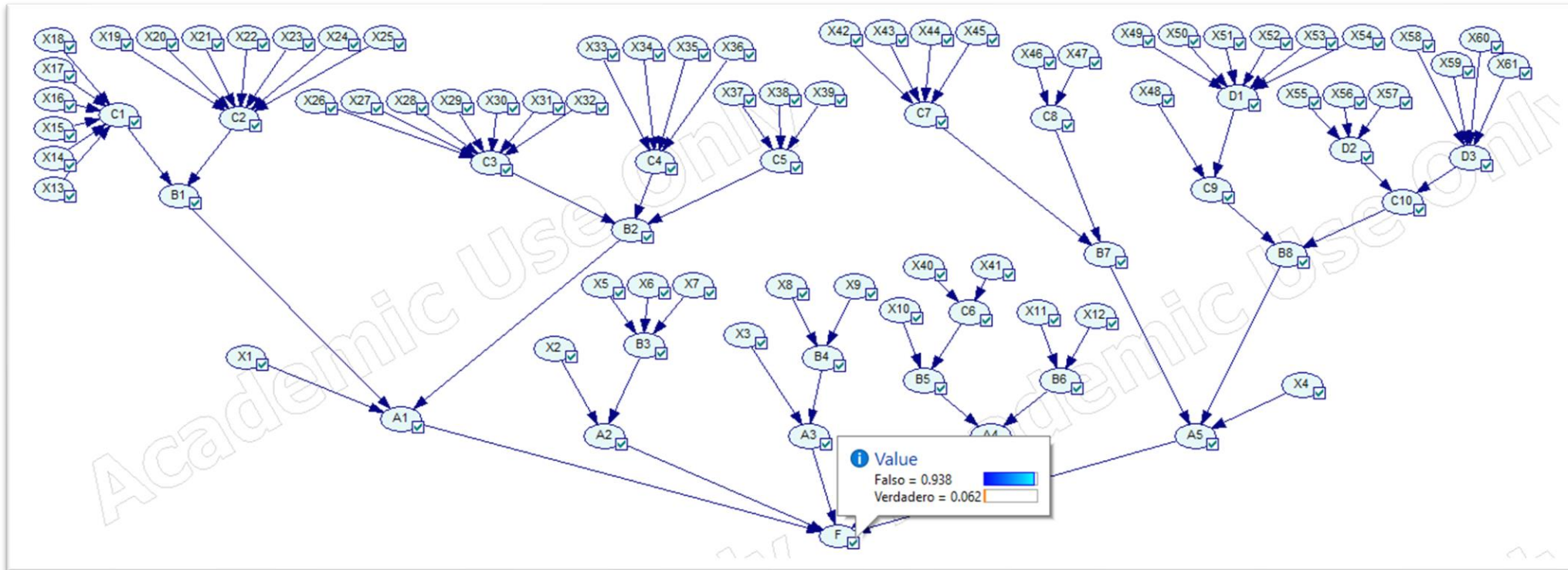


Figura 5.9 Red Bayesiana para la Frecuencia de Falla para el caso de estudio.  
Fuente: Elaboración propia usando el software GeNIeModeler ®.

Una frecuencia de falla entre 0.0001 y 0.00015 km<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> es considerada una mejor práctica internacional aceptable para los ductos de transporte de gas natural (da Cunha, 2016); sin embargo, el valor obtenido para este análisis resulta ser mucho mayor al deseado. Por este motivo, es esencial identificar los factores más críticos para reducir esta probabilidad de falla. Estos factores se discutirán a continuación.

En la Tabla siguiente se presentarán de forma ordenada los nodos que más probabilidad de ocurrencia tuvieron en este análisis:

*Tabla 27. Probabilidad de ocurrencia de los nodos principales.*  
Fuente: Elaboración propia.

<b>Nodo</b>	<b>Nombre</b>	<b>Probabilidad de Ocurrencia</b>
<b>A1</b>	Defectos de Tubería	3.45%
<b>A2</b>	Daños por Terceros	1.13%
<b>A4</b>	Operaciones Incorrectas	1.09%
<b>A3</b>	Peligros Naturales	0.43%
<b>A5</b>	Corrosión, Erosión y Agrietamiento	0.22%

De este análisis, resultó que el evento con mayor probabilidad de ocurrencia para causar una falla en el segmento de ducto indicado fueron los relacionados con los “Defectos de Tubería” con una probabilidad de 3.45%, en particular la razón de esto está relacionada con los procedimientos de construcción de la tubería.

Le sigue a este evento los “Daños por terceros” con una probabilidad de 1.13%, propiciado principalmente por una deficiente seguridad pública y por problemas con la determinación de las ubicaciones donde pueden ser instalados otro tipo de proyectos, que a menudo causan daños durante la ejecución de sus obras. Además de esto, es importante mencionar que no es información de carácter público la ubicación específica de las rutas por las que es transportado el gas natural, a diferencia de otros países como Estados Unidos y Canadá donde es posible consultar dicha información para prevenir este tipo de accidentes.

Continuando con esto, el siguiente evento de relevancia hace referencia a “Operaciones incorrectas”, con una probabilidad de ocurrencia de 1.09%, las cuales están en su mayoría asociadas a errores humanos. Dichos problemas pueden ser atendidos mediante mejores disposiciones operativas y controles más estrictos en cuanto a capacitación del personal y la elaboración de mejores manuales de operación.

El evento para analizar que le sigue a este es el referente a “Peligros naturales”, con una probabilidad de ocurrencia de 0.43%, si bien es relativamente baja la probabilidad de que ocurra, las fallas ocasionadas por este tipo de eventos tienden a ser de las que mayor impacto tienen para las operaciones del ducto. En este caso, es importante darle mayor atención y monitoreo a los eventos de inundaciones dado el riesgo que supone para la integridad del ducto.

Por último, y a pesar de que el evento “Corrosión, erosión y agrietamiento” resulta ser el de menor probabilidad con un valor de 0.22%, cabe mencionar que se está considerando para el caso de estudio una tubería de nueva fabricación e instalación. A menudo los procesos de corrosión son los que mayor frecuencia de falla provocan en las tuberías con un mayor tiempo de antigüedad ya que se presentan con el uso y desgaste de la tubería, lo que resalta la importancia de los sistemas de protección externa e interna contra la corrosión.

Finalmente, es importante mencionar que, para el presente caso de estudio, esta Red Bayesiana puede ser actualizada conforme se vaya presentando nueva o mejor evidencia, un atributo que la distingue de otros métodos cuantitativos para el Análisis de Riesgo. Adicionalmente, como parte de estudios a futuro es posible utilizar nodos de múltiples estados, no necesariamente binarios, para mejorar la precisión de los resultados.

## Conclusiones

Hoy en día, es innegable que el método más eficiente para transportar el gas natural disponible actualmente es a través de ductos. A pesar de que en general no son frecuentes los accidentes a nivel mundial, cuando estos accidentes llegan a ocurrir resultan en pérdidas de contención que pueden tener consecuencias muy severas a nivel económico, social y ambiental. Es por esto que el uso de nuevas y mejores herramientas para el análisis de riesgos es una tendencia mundial para mantener la integridad estructural y la seguridad en la operación de estos ductos.

La motivación principal de este estudio yace en la necesidad que existe en el país de adoptar estas mejores prácticas internacionales y pasar de metodologías y análisis de carácter subjetivo a metodologías con un mayor grado de objetividad. Lo anterior debido a que México ha tenido importantes accidentes a nivel industrial, lo que implica una revisión a fondo de las áreas de oportunidad que existen desde la prevención y análisis en materia de riesgos.

Con esto en mente, se presentaron brevemente las metodologías que existen para realizar Análisis de Riesgos actualmente, junto con las consideraciones que cada una de ellas requiere para ser desarrollada. Además de esto, se presentó el marco jurídico y normativo en materia de riesgos que existe.

Después, se presentaron las bases sobre las cuales se sustenta la teoría bayesiana para demostrar la compatibilidad del uso de Redes Bayesianas en el Análisis de Riesgos para el caso de estudio presentado, y se mostró el procedimiento general mediante el cual se construyen dichas redes bayesianas. Se explicó la forma en la que la evidencia causal incorporada en dicha red nos aporta conclusiones útiles sobre el comportamiento de los eventos basados en distribuciones a priori y probabilidades condicionales. En línea con esto, se explicó sobre el tipo de evidencia que puede ser incorporada en la red, ya sea a partir de la información estadística disponible o de la opinión de expertos para cada uno de los nodos que conforman la red.

Se ha presentado también el panorama general del mercado de gas natural a nivel mundial y a nivel nacional resaltando su importancia en ambos contextos como el energético predominante para las siguientes décadas. Sumado a esto se presentó la infraestructura existente en el país mediante la cual se conduce dicho energético y el marco normativo específico para el desarrollo de dicha actividad.

A partir de esto, se definió el tramo seleccionado para el caso de estudio presentado: indicando las particularidades, ruta, materiales y otras características necesarias, de acuerdo con lo establecido en el marco normativo aplicable, esto con la finalidad de desarrollar un caso lo más apegado posible a la realidad. Se explicaron también los posibles peligros que existen en las fases de desarrollo del proyecto, desde el diseño hasta la operación. Además de esto se presentó la metodología mediante la cual se construyó el Análisis de Árbol de Fallas para el

caso de estudio, así como las consideraciones pertinentes para hacer la conversión del Árbol de Fallas a una Red Bayesiana. El Árbol de Fallas desarrollado aportó la estructura lógica de los factores principales que pueden causar el escenario de una falla en un ducto de transporte de gas natural. Dicho Árbol de Fallas sirvió como la base para construir la Red Bayesiana con la cual fue posible desarrollar el presente análisis.

Finalmente, se establecieron y se definieron los nodos resultantes para la Red Bayesiana y se aportó la información estadística que fue implementada como evidencia para el cálculo de las distribuciones a posteriori del análisis de frecuencia de falla del tramo de ducto seleccionado. Una vez que se calcularon dichas distribuciones a posteriori para los nodos intermedios y se obtuvo la probabilidad de ocurrencia de falla en el ducto de transporte, se realizó una discusión de los resultados obtenidos, detallando las causas y posibles soluciones relacionadas con cada uno de los eventos propuestos.

A través de este análisis predictivo, se determinó la probabilidad de falla del segmento de ducto seleccionado, cuyo valor resultó mayor al recomendado por las prácticas internacionales. Con esto se demuestra la importancia de realizar este tipo de análisis en forma preventiva de manera que se esté preparado para eventos que pudieran resultar con consecuencias severas.

Finalmente, el presente estudio demuestra la aplicación de la Red Bayesiana en un análisis de frecuencia de falla en ducto de transporte de gas natural. La flexibilidad que aporta la metodología nos permite tener un marco de referencia que puede incorporar evidencia histórica, así como el juicio de expertos en el mismo análisis.

Gracias a esto, en estudios futuros relacionados con el tema, se puede realizar un análisis de sensibilidad para identificar las variables específicas que tienen mayor impacto; modelar nodos o variables de múltiples estados; corregir las probabilidades a priori de los nodos basándose en la ocurrencia de uno o más eventos en la misma Red Bayesiana; modificar los nodos de la red para otros segmentos de ducto que se requiera analizar; o, realizar un análisis de severidad de los eventos y consecuencias probables usando la misma metodología.

En otros contextos, esta misma metodología puede servir como herramienta para realizar Análisis de Riesgos en otro tipo de instalaciones del sector hidrocarburos siguiendo los mismos pasos descritos, ya sean plantas de almacenamiento, distribución, estaciones de servicio, e incluso refinerías o pozos de producción de petróleo.

Dentro del contexto regulatorio de la ASEA, incluso sería posible adoptar esta metodología como una forma de desarrollar y mejorar la normatividad existente gracias a la facilidad y precisión del método, además de poder aprovechar la disponibilidad de información que tiene la institución gracias a las atribuciones que le confiere la ley. De esta forma se puede asegurar la protección de las personas, del medio ambiente y de las instalaciones a través de una mejor regulación.

## Bibliografía

- Agencia Nacional de Seguridad Industrial y de Protección al Medio Ambiente del Sector Hidrocarburos. (13 de Mayo de 2016). DISPOSICIONES administrativas de carácter general que establecen los Lineamientos para la conformación, implementación y autorización de los Sistemas de Administración de Seguridad Industrial, Seguridad Operativa y Protección al Medio Ambiente aplicables. Ciudad de México, México.
- Agencia Nacional de Seguridad Industrial y de Protección al Medio Ambiente del Sector Hidrocarburos. (11 de julio de 2018). Guía para la Elaboración del Análisis de Riesgo del Sector Hidrocarburos. Ciudad de México. Obtenido de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/343905/GUIA\\_ANALISIS\\_DE\\_RIESGO.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/343905/GUIA_ANALISIS_DE_RIESGO.pdf)
- Arendt, J., & Lorenzo, D. (2000). *Evaluating Process Safety: A User's Guide to Quantitative Risk Analysis*. New York: American Institute of Chemical Engineers.
- Bedford, T., & Cooke, R. (2001). *Probabilistic Risk Analysis: Foundations and Methods*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Bhattacharyya, S. C. (2011). *Energy Economics: Concepts, Issues, Market and Governance*. London: Springer-Verlag London.
- Birnbaum, A. (1962). On the Foundations of Statistical Inference. *Journal of the American Statistical Association*(57), 269-362.
- BP p.l.c. (2020). *Statistical Review of World Energy 2020*. London: BP p.l.c.
- Casal, J., Montiel, H., Planas, E., & Vílchez, J. A. (1998). *Análisis del Riesgo en Instalaciones Industriales*. Barcelona: Edicions UPC.
- Comisión Reguladora de Energía. (4 de Marzo de 2010). NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SECRE-2010, Especificaciones del gas natural. Ciudad de México.
- Conca, J. (25 de enero de 2018). Natural Gas And The New Deathprint For Energy. *Forbes*. Obtenido de <https://www.forbes.com/sites/jamesconca/2018/01/25/natural-gas-and-the-new-deathprint-for-energy/?sh=6e8b3f4f5e19>
- da Cunha, S. B. (Noviembre de 2016). A review of quantitative risk assesment on onshore pipelines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 44, 282-298. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.09.016>
- Dávila Aragón, G. (2014). Uso de Redes Bayesianas para medir el Riesgo Operacional, un caso de aplicación (Tesis Doctoral). México: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.
- Dávila Aragón, G., Ortiz Arango, F., & Cruz Aranda, F. (2016). Cálculo del valor del riesgo operacional mediante Redes Bayesianas para una empresa financiera. *Contaduría y Administración*(61), 176-201.
- Duan, R. X., & Zhou, H. L. (2012). A New Fault Diagnosis Method Based on Fault Tree and Bayesian Networks. *Energy Procedia*, 17-B, 1376-1382. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.02.255>
- EFE. (19 de enero de 2019). *México: recuerda las principales tragedias por explosión*. Obtenido de Telemundo Washington: <https://www.telemundowashingtondc.com/noticias/local/principales->

tragedias-por-explosion-ocurridas-en-mexico-recuento-gas-pirotecnica-gasolina/471/

- Elizondo, A., & Dussauge, M. (octubre de 2018). ASEA: Un Nuevo Modelo de Institución del Estado Mexicano. Ciudad de México: ASEA y CIDE, Centro de Investigación y Docencia Económicas, A.C.
- ESTATUTO Orgánico del Centro Nacional de Control del Gas Natural. (25 de julio de 2016). *Diario Oficial de la Federación*. México.
- Francis, R., Guikema, S., & Henneman, L. (Octubre de 2014). Bayesian Belief Networks for predicting drinking water distribution system pipe breaks. *Reliability Engineering & System Safety*, 130, 1-11.
- Hossain, M., & Muromachi, Y. (March de 2012). A Bayesian network based framework for real-time crash prediction on the basic freeway segments of urban expressways. *Accident Analysis & Prevention*, 45, 373-381.
- International Energy Agency. (2009). World Energy Outlook. Paris: IEA.
- Jordan, M. I. (16 de Noviembre de 2004). Statistical Learning Theory. *The Junction Tree Algorithm*. California, Estados Unidos: University of Berkeley.
- Kabir, G., Tesfamariam, S., Francisque, A., & Sadiq, R. (1 de Enero de 2015). Evaluating risk of water mains failure using a Bayesian belief network model. *European Journal of Operational Research*, 220-234.
- Kaplan, S., & Garrick, B. J. (1981). On the quantitative definition of risk. *Risk Analysis*(1), 11-27.
- Khakzad, N., Khan, F., & Amyotte, P. (Agosto de 2011). Safety analysis in process facilities: Comparison of fault tree and Bayesian network approaches. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(8), 925-932.
- LEY de Hidrocarburos. (11 de Agosto de 2014 (Última Reforma DOF 20-05-2021)). *Diario Oficial de la Federación*. México.
- LEY Orgánica de la Administración Pública Federal. (29 de diciembre de 1976 (Última reforma DOF 20-10-2021)).
- Marsh & McLennan Companies. (2020). *100 Largest Losses in the Hydrocarbon Industry 1974-2019*. Marsh.
- Martins, M. R., Schleder, A. M., & Droguett, E. L. (2014). A methodology for risk analysis based on hybrid Bayesian networks: application to the regasification system of liquefied natural gas on board a floating storage and regasification unit. *Risk Analysis*(34), 2098-2120.
- Massa Roldán, R. (2018). Regulación por riesgo en el sector de hidrocarburos mexicano. En ASEA, A. Laguna Elizondo, & M. I. Dussauge (Edits.), *ASEA: Un Nuevo Modelo de Institución del Estado Mexicano* (págs. 89-113). Ciudad de México, México: ASEA y CIDE.
- NOM-007-ASEA-2017, Transporte de gas natural, etano y gas asociado al carbón mineral por medio de ductos. (5 de marzo de 2018). *Diario Oficial de la Federación*.
- Palaniappan, V. (2018). Pipeline Risk Assesment Using Dynamic Bayesian Network (DBN) for Internal Corrosion (Tesis de Maestría). Estados Unidos de América: Texas A&M University.
- Pearl, J. (1985). Bayesian networks: a model of self-activated memory for evidential reasoning. *Conference of the Cognitive Science Society* (págs. 329-334). California: University of California.

- Robles Forcada, V. (2003). Clasificación Supervisada basada en Redes Bayesianas. (Tesis Doctoral). Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
- Secretaría de Energía. (2017). *Balance Nacional de Energía*. México. Obtenido de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/414843/Balance\\_Nacional\\_de\\_Energ\\_a\\_2017.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/414843/Balance_Nacional_de_Energ_a_2017.pdf)
- Secretaría de Energía. (2018). *Prospectiva de Gas Natural 2018-2032*. México.
- Secretaría de Energía. (01 de octubre de 2019). *Infraestructura de gas natural en México*. Obtenido de Secretaría de Energía: <https://www.gob.mx/sener/es/articulos/infraestructura-de-gas-natural-en-mexico>
- Senado. (09 de noviembre de 2010). Obtenido de Gaceta del Senado: [https://www.senado.gob.mx/64/gaceta\\_del\\_senado/documento/27511](https://www.senado.gob.mx/64/gaceta_del_senado/documento/27511)
- Surbhi, S. (27 de Enero de 2016). *Key Differences: Difference Between Risk and Uncertainty*. Obtenido de Key Differences: <https://keydifferences.com/difference-between-risk-and-uncertainty.html>
- Tan, Q., Chen, G., Zhang, L., Fu, J., & Li, Z. (Noviembre de 2014). Dynamic accident modeling for high-sulfur natural gas gathering station. *Process Safety and Environmental Protection*, 92(6), 565-576.
- Wang, W., Shen, K., Wang, B., Dong, C., Khan, F., & Wang, Q. (2017). Failure probability analysis of the urban buried gas pipelines using Bayesian networks. *Process Safety and Environmental Protection*, 111, 678-686.
- Wu, J., Zhou, R., Xu, S., & Wu, Z. (2017). Probabilistic analysis of natural gas pipeline network accident based on Bayesian Network. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 46, 126-136.
- Yun-Tao Li, X.-N. H. (15 de septiembre de 2021). Risk analysis and maintenance decision making of natural gas pipelines with external corrosion based on Bayesian network. *Petroleum Science*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.petsci.2021.09.016>
- Zadeh, L. (2009). Toward extended fuzzy logic - A first step. *Fuzzy Sets and Systems*, 160(21), 3175-3181. doi:[doi:10.1016/j.fss.2009.04.009](https://doi.org/10.1016/j.fss.2009.04.009).