



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**PROCESO DE DEFINICIÓN DE PROYECTOS DE DUCTOS APLICANDO  
MEJORES PRÁCTICAS DE LA INDUSTRIA**

**TRABAJO ESCRITO VÍA EDUCACIÓN CONTINUA  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA:  
ELÍAS ALEJANDRO NAVARRO LEÓN**



**MÉXICO, D.F.**

**2015**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:** Profesora: Leticia Lozano Ríos

**VOCAL:** Profesor: Alfonso Durán Moreno

**SECRETARIO:** Profesor: Oscar Humberto López Tesillos

**1er. SUPLENTE:** Profesor: Francisco Arturo González Saavedra

**2° SUPLENTE:** Profesor: Jorge Rafael Martínez Peniche

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:** FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM

**ASESOR DEL TEMA:** ING. OSCAR HUMBERTO LÓPEZ TESILLOS  
(Nombre y firma)

**SUSTENTANTE:** ELÍAS ALEJANDRO NAVARRO LEÓN  
(Nombre y firma)

# Índice

## Contenido

1	Introducción .....	6
1.1	Resumen ejecutivo .....	6
1.2	Problemática .....	7
2	Discusión .....	16
2.1	¿Qué es un proyecto de un gasoducto?.....	16
2.2	Componentes principales de un proyecto de gasoductos .....	17
2.2.1	Infraestructura requerida en un proyecto de un gasoducto. ....	18
2.2.2	Diseño del gasoducto .....	29
2.2.3	Construcción e instalación .....	31
2.2.4	Otros componentes críticos para un proyecto de ductos.....	33
2.3	Mejores prácticas para el desarrollo de un proyecto de gasoductos .....	35
2.4	Ciclo de vida de un proyecto de ductos .....	41
2.5	Índice para medir el nivel de definición de un proyecto de ductos (PDRI).....	45
3	Conclusiones.....	65
4	Apéndice caso de estudio .....	68
5	Bibliografía .....	77

## Índice de figuras

Figura 1 Demanda nacional de gas natural 2002 – 2027 (Secretaría de Energía, 2013) .....	8
Figura 2 Nueva red de gasoductos 2002 – 2027 (Secretaría de Energía, 2013) .....	10
Figura 3 Gráfica de variación del programa de obra (Modificada de Bingham, et al. 2011)..	15
Figura 4 Gráfica de rendimiento promedio del costo (Modificada de Bingham, et al.2011)...	16
Figura 5 Esquema general de la producción y distribución de gas. ....	18
Figura 6 Esquema típico de un gasoducto de distribución. ....	18
Figura 7 Diablo (Inspection Intelligence NDT Global, 2015). ....	26
Figura 8 Trampas de envío y recepción de diablos (Kennedy, 1993).....	27
Figura 9 Esquema típico de la instalación de un probador en línea (Kennedy, 1993). ....	29
Figura 10 Impacto de la definición de elementos clave durante el desarrollo de un proyecto (Construction Industry Institute, 2008) .....	37
Figura 11 Diagrama de elementos de efectividad en un proyecto (Independent Project Analysis, Inc., 2009).....	38
Figura 12 Componentes del FEL para ductos (Independent Project Analysis, Inc., 2009) ....	39
Figura 13 Etapas del ciclo de vida de un proyecto de gasoductos (Construction Industry Institute, 2010) .....	41
Figura 14 Modelo de FEL para ductos.....	42
Figura 15 Diagrama de secciones del PDRI (Construction Industry Institute, 2010). ....	53
Figura 16 Gráfico de puntajes de las 10 categorías más importantes del PDRI de infraestructura (Construction Industry Institute, 2010).....	57
Figura 17 Niveles de definición en el PDRI y sus ponderaciones (Construction Industry Institute, 2010). ....	60
Figura 18 Empleo del PDRI durante el ciclo de vida de un proyecto (Construction Industry Institute, 2010). ....	61
Figura 19 Equivalencia de las etapas de planeación durante el ciclo de vida de un proyecto de ductos respecto a las secciones de desarrollo del PDRI para proyectos de infraestructura. ....	62
Figura 20 Diagrama del PDRI para proyectos de infraestructura. ....	64

## Índice de tablas

Tabla 1 Características de los diferentes tipos de proyecto (Construction Industry Institute, 2010). .	12
Tabla 2 Resistencias de los tipos de tubería más usados en ductos de transporte de hidrocarburos (Kennedy, 1993). .....	19
Tabla 3 Secciones del PDRI de infraestructura divididas por categoría y elementos (Construction Industry Institute, 2010).....	51
Tabla 4 Ponderación de cada una de las secciones del PDRI de infraestructura (Construction Industry Institute, 2010).....	52
Tabla 5 Ponderación de cada una de las categorías del PDRI de infraestructura (Construction Industry Institute, 2010).....	54
Tabla 6 Ponderación de cada una de las categorías del PDRI de infraestructura (Construction Industry Institute, 2010).....	61
Tabla 7 Lista de verificación de elementos más importantes del PDRI que definen el alcance de un proyecto .....	68
Tabla 8 Lista de verificación de elementos más importantes del PDRI que definen el alcance de un proyecto (Continuación) .....	69
Tabla 9 Lista de verificación de elementos más importantes del PDRI que definen el alcance de un proyecto (Continuación) .....	70
Tabla 10 Lista de verificación de elementos más importantes del PDRI que definen el alcance de un proyecto (Continuación) .....	71
Tabla 11 Lista de verificación de elementos más importantes del PDRI que definen el alcance de un proyecto (Continuación) .....	72
Tabla 12 Lista de verificación de elementos más importantes del PDRI que definen el alcance de un proyecto (Continuación) .....	73
Tabla 13 Lista de verificación de elementos más importantes del PDRI que definen el alcance de un proyecto (Continuación) .....	74
Tabla 14 Lista de verificación de elementos más importantes del PDRI que definen el alcance de un proyecto (Continuación) .....	75

## **1 Introducción**

### **1.1 Resumen ejecutivo**

La presente tesina consiste en el análisis de las mejores prácticas<sup>1</sup> de administración de proyectos empleadas en la industria para definir el alcance de proyectos de ductos, y de manera específica se presenta un ejemplo de aplicación a un proyecto hipotético de un gasoducto.

El ciclo de vida de un proyecto de ductos es muy particular ya que en el mismo existen variables que son distintas a otro tipo de proyectos. Si éstas no son administradas correctamente, la probabilidad de éxito se reduce drásticamente. Lo anterior debido a que dichas variables son esenciales para una adecuada definición del alcance, que a su vez representa uno de los factores más críticos para el éxito de cualquier tipo de proyecto.

Las variables que distinguen a los proyectos de ductos y que generalmente ocasiona los mayores problemas en su ciclo de vida de planeación y ejecución son la obtención de los permisos de paso y derechos de vía. Ambos muy relacionados con circunstancias políticas, sociales, culturales y ambientales intrínsecas al sitio en el cual se desea llevar a cabo el proyecto.

Este trabajo analiza las mejores prácticas empleadas en la industria de ductos para definir el alcance en la etapa previa a la construcción de este tipo de proyectos, para medir el nivel de definición empleando índices específicamente

---

<sup>1</sup> Mejores prácticas: También denominadas buenas prácticas, son aquellas prácticas profesionales que resultan ser las mejores de entre todas las que se realizan para lograr los resultados esperados en la ejecución de proyectos de ingeniería. Puede ser una acción sencilla o un conjunto de acciones de mayor complejidad y magnitud.

diseñados para tal propósito, y mejorar su desempeño en términos del cumplimiento de sus objetivos de negocio, operativos y de competitividad respecto a su alcance, programa y costo.

Así pues el objetivo de esta tesina es analizar la esencia de las herramientas empleadas por empresas líderes que hacen la diferencia para que un proyecto de ductos pueda ser exitoso, y mostrar en forma práctica el uso de las mismas en un ejemplo de un proyecto hipotético de un gasoducto. Adicionalmente se proponen recomendaciones para su implantación.

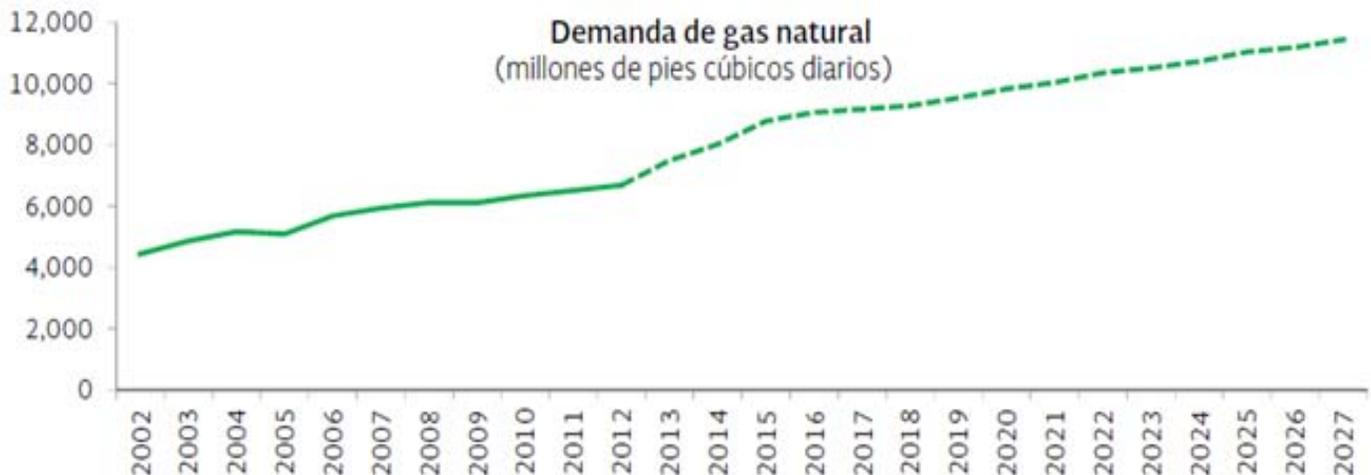
## **1.2 Problemática**

Los proyectos de infraestructura para el transporte de gas natural adquieren relevancia al conocer la importancia que tienen los gasoductos para el desarrollo económico e industrial en México. Considerando los principales factores que afectan la evolución del consumo sectorial así como el desarrollo del consumo regional, nacional e internacional, puede obtenerse una prospectiva del aumento de demanda de este recurso energético como principal fuente de energía para procesos industriales y consumo público en nuestro país.

Por otra parte, aunado al aumento de la demanda de gas natural como recurso energético, se estima un aumento de la oferta de dicho hidrocarburo basándose en la cartera de proyectos de extracción de hidrocarburos de Petróleos Mexicanos (PEMEX). Dicha estimación es la base de la proyección de la oferta (Secretaría de Energía, 2013) de gas seco y gas L.P.

La Secretaría de Energía realizó un análisis sobre el futuro del mercado nacional de gas natural en el que concluye que la tendencia esperada en el consumo de este combustible como fuente de energía irá a la alza durante los próximos 12 años. Se estima un crecimiento promedio de la demanda nacional de gas natural de 3.6% anual, pasando de 6,678.4 mmpcd en 2012 a 11,424.9 millones de pies cúbicos diarios (mmpcd) en 2027 (véase figura 1). El sector eléctrico será el principal consumidor de gas natural en 2027, con una participación de 57.6%.

El segundo en orden de importancia será el consumo del sector petrolero, con 22.2%, seguido del sector industrial, con 18.6% del total nacional. Estos tres sectores concentrarán en promedio 98.4% de la demanda nacional de gas natural durante el periodo de proyección (Secretaría de Energía, 2013). Esto quiere decir, que en un futuro, el aumento de infraestructura para la distribución, almacenamiento y transporte de gas natural se volverá de vital importancia para cubrir la demanda de dicho combustible.



**Figura 1** Demanda nacional de gas natural 2002 – 2027 (Secretaría de Energía, 2013)

En materia de suministro de gas natural, PGPB incrementará la capacidad de transporte del Sistema de Transporte Nacional Integrado (STNI), para estar en posibilidades de transportar un mayor flujo de gas natural del norte del país y atender el incremento de la demanda de gas natural de las zonas centro y occidente del país. La principal obra de infraestructura de esta estrategia consiste en la construcción de tres proyectos de transporte de gas natural por ducto: Los Ramones Fase I, Los Ramones Fase II Norte y Los Ramones Fase II Sur.

El Gobierno Federal, busca impulsar la expansión de la capacidad de transporte en el marco de la Estrategia de Suministro de Gas Natural. La estrategia tiene el objetivo de garantizar un abastecimiento seguro y confiable de gas natural en el mediano y largo plazo, a fin de fomentar el crecimiento y la competitividad del sector industrial y generar empleos. En la siguiente figura se muestra la expansión de la red de transporte de gas natural que se proyecta para la prospección de gas natural para el 2027 (Secretaría de Energía, 2013).



**Figura 2** Nueva red de gasoductos 2002 – 2027 (Secretaría de Energía, 2013)

A corto plazo, la estrategia contempla el incremento de importaciones de GNL (Gas Natural Licuado) y en el mediano plazo expandir la capacidad de transporte de este hidrocarburo y convirtiendo al STNI en un activo estratégico para el desarrollo de México.

La nueva infraestructura tendrá como objetivo lograr una mayor integración con los sectores productivos del país y con el mercado de gas natural del sur de Estados Unidos. Entre otros, incluye una serie de proyectos en el corto, mediano y largo plazo:

- Corto plazo: Incrementar la importación de GNL por los puertos de Manzanillo y Altamira.
- Mediano plazo: Incrementar la capacidad de transporte en los gasoductos del sur de Estados Unidos que se interconectan en la frontera mexicana en Tamaulipas.
- Largo plazo: Desarrollar cinco gasoductos (Ramones Fase I, Ramones Fase II Norte, Ramones Fase II Sur, Agua Dulce-Frontera y Tucson-Sásabe), y construir la estación de compresión Soto La Marina (Secretaría de Energía, 2013).

Los proyectos de ductos están clasificados por el Construction Industry Institute (CII) como proyectos de infraestructura y son considerados diferentes a proyectos de edificios y proyectos de plantas industriales porque poseen características especiales y particulares que se deben tomar en cuenta desde la fase inicial de su desarrollo. Los proyectos de infraestructura, dentro de los cuales se incluyen carreteras, líneas de conducción eléctrica, vías de ferrocarril y ductos, generalmente cubren una extensa área geográfica y afectan múltiples jurisdicciones y grupos de interesados (Construction Industry Institute, 2010). Debido a lo anterior los proyectos de ductos alcanzan una alta complejidad que comúnmente lleva a enfrentar riesgos de exceder los costos y tiempos de ejecución programados o a realizar cambios costosos que impactan en gran medida en el cumplimiento de los objetivos de negocio.

En la tabla 1 se pueden observar las principales diferencias entre un proyecto de infraestructura (dentro de cuya clasificación están considerados los proyectos de ductos) respecto a los proyectos de edificios y de plantas industriales.

**Tabla 1** Características de los diferentes tipos de proyecto (Construction Industry Institute, 2010).

<b>Características</b>	<b>Proyectos de infraestructura</b>	<b>Proyectos de edificios</b>	<b>Proyectos Industriales</b>
<i>Diseñador primario</i>	Ingeniero Civil	Arquitecto	Ing. Químico, Ing. Mecánico, Ing. Industrial.
<i>Orientación del proyecto</i>	Horizontal	Vertical	Vertical
<i>Sistema</i>	Vector	Nodo	Nodo
<i>Utilización</i>	Transporte	Uso funcional	Transformación
<i>Operación</i>	Flujo dinámico conectado por una red	Terminación nodal	Producción y consumos
<i>Interacción con el público</i>	Extenso	Moderado	Mínimo
<i>Impacto ambiental</i>	Extenso	Moderado	Extenso
<i>Costo primario</i>	Tierra, materiales, estructuras asociadas.	Construcción, sistema de construcción	Tubería, mecánica, equipos.
<i>Costo de equipo instalado</i>	Mínimo	Moderado	Extenso
<i>Costo de tierras</i>	Moderado a alto	Bajo a alto	Bajo a moderado
<i>Interfaz de jurisdicción</i>	Extenso	Moderado	Moderado

Por otra parte estudios realizados por el Construction Industry Institute (CII) demuestran que la falta de definición del alcance previo al inicio de la construcción es la causa principal de problemas de retrasos, sobrecostos e incumplimiento de los objetivos operativos y de negocio en un proyecto (Construction Industry Institute, 2011).

La definición del alcance de un proyecto de ductos está directamente ligada a la cantidad y calidad de la información con la que se cuente al comienzo del proyecto. Lo anterior es debido a que esta información reflejará los aspectos técnicos que gobernarán el diseño del mismo. Dichos datos básicos serán el soporte técnico que servirá como sustento del proyecto.

La importancia de la información inicial es tal, que se vuelve necesario proporcionarle un paquete de datos básicos al equipo que desarrollará el proyecto o bien ser la primera tarea que se le asigne. Si los datos básicos son erróneos, el proyecto presentará serios problemas: se presentarán cambios mayores, las instalaciones no funcionarán como se espera, o podrían llegar a ser inseguras (Independent Project Analysis, Inc., 2009).

La información básica necesaria para emprender un proyecto de ductos se enlista a continuación:

- Propiedades reológicas del fluido a transportar.
- Condiciones del terreno y análisis de suelo.
- Cruzamientos y sus características.
- Problemas e inestabilidades asociados a la ruta del ducto.

- Requerimientos de excavación y zanjas.
- Análisis Hidráulico.
- Permisos.
- Análisis Económico.
- Identificación temprana de problemas sociales y políticos que se presentan en la ruta seleccionada.

La falta de un protocolo para la definición, generación y el control de esta información básica provoca que la mayoría de los dueños de los proyectos<sup>2</sup> pierdan de vista los elementos más importantes de un proyecto de gasoductos. Esto ocasiona que se tengan que hacer cambios mayores durante la ejecución por factores no contemplados desde un inicio. Dichos cambios impactan en costo, calidad y tiempo, y a su vez ocasionan que el proyecto no opere de la manera deseada y de forma segura.

Además de lo anterior, análisis efectuados por el CII a un grupo de proyectos de infraestructura que ya había concluido, indican que aquellos proyectos que tienen una pobre definición del alcance, presentan más desviaciones respecto al presupuesto, programa y órdenes de cambio que los que tienen una buena definición del alcance.

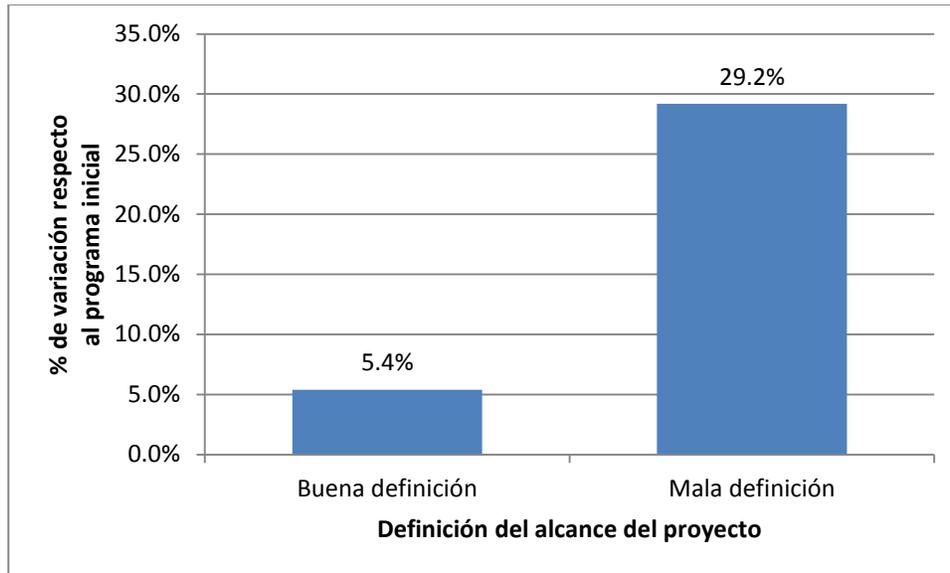
De acuerdo al CII los proyectos con una buena definición del alcance generalmente varían sólo un 5.4% respecto al programa original, mientras que los

---

<sup>2</sup> Dueño de proyecto: Entidad (persona o grupo de personas) que se encarga de establecer los objetivos del proyecto, financiarlo, definir responsabilidades y obligaciones contractuales y además se beneficia directamente de las ganancias.

proyectos con una mala definición del alcance, exceden el programa casi en un 30% (Construction Industry Institute, 2011).

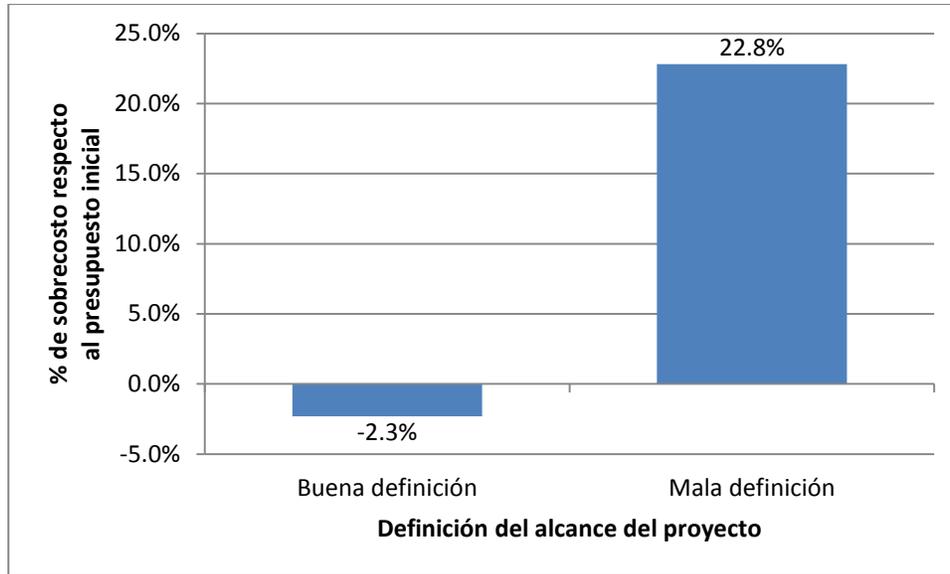
Lo anterior se puede observar en las siguientes gráficas:



**Figura 3** Gráfica de variación del programa de obra (Modificada de Bingham, et al. 2011).

De la misma forma el CII encontró que los proyectos cuyo alcance es bien definido, presentan un mejor desempeño en cuanto a costo ya que son los que más se acercan a quedar igual o por debajo del presupuesto inicial.

Los proyectos con mejor definición de alcance se quedan en promedio un 2.3% por debajo del presupuesto inicial, mientras que aquellos que poseen una pobre definición lo sobrepasan hasta en un 22.8% (Construction Industry Institute, 2011).



**Figura 4** Gráfica de rendimiento promedio del costo (Modificada de Bingham, et al.2011).

## 2 Discusión

### 2.1 ¿Qué es un proyecto de un gasoducto?

Es un conjunto de acciones coordinadas y relacionadas cuyo fin común es proveer un medio de transporte de gas desde un punto inicial a un punto final, a través de una tubería o sistema de tuberías.

El CII considera que los proyectos de gasoductos, como todos los proyectos de infraestructura, son únicos en varios rasgos clave. Mientras que los proyectos industriales y de edificios poseen una orientación vertical, la orientación natural de los proyectos de gasoductos es horizontal. Esta característica ocasiona que sean más costosos debido al precio de las tierras y permisos especiales y a la longitud de los mismos.

Otra cualidad que los hace diferentes es que implican una amplia interacción con la sociedad y además tienen un gran impacto ambiental

En general existen 2 tipos de gasoductos que difieren por el propósito para el cual son diseñados y construidos:

1. Gasoductos de recolección: Estos ductos se encargan de conectar los pozos de extracción que se encuentran en los campos de producción con las plantas tratadoras de gas o líneas de sistemas de transporte más grandes.
2. Gasoductos de distribución: El gas que ha sido tratado y se encuentra listo para su consumo se transporta a través de estos ductos a ciudades, negocios, fábricas y/o residencias (Kennedy, 1993).

## **2.2 Componentes principales de un proyecto de gasoductos**

Un sistema de gasoductos está conformado por varios elementos indispensables que integran la red de distribución y transporte. En la siguiente figura se esquematiza una red de distribución de gas desde su extracción hasta su entrega a los usuarios finales.



fabricada de acuerdo a las especificaciones del Instituto Americano del Petróleo (API, por sus siglas en inglés de American Petroleum Institute), la especificación aplicable es la API Spec 5L, que abarca tubería con y sin costura. Además de la especificación, a la tubería se le atribuyen diferentes grados que dependen de la resistencia a la deformación que el material presente a la presión máxima permisible de operación. La resistencia del material se expresa como la fuerza de tensión mínima ( $\text{lb/in}^2$ ) requerida para producir una elongación permanente en una muestra del metal.

**Tabla 2** Resistencias de los tipos de tubería más usados en ductos de transporte de hidrocarburos **(Kennedy, 1993)**.

<b>Grado API para tuberías</b>	<b>Resistencia a la deformación <math>\text{kg/cm}^2</math> (<math>\text{lb/in}^2</math>)</b>
A	2,019 (30,000)
B	2,460 (35,000)
X42	2,953 (42,000)
X60	4,218 (60,000)

Algunas líneas de transporte son recubiertas internamente para protegerlas contra la corrosión. El recubrimiento interno depende de qué tan corrosivo sea el gas que se va a transportar, la vida útil esperada para la tubería y demás factores. Cuando los gasoductos van enterrados, también son recubiertos exteriormente para minimizar la corrosión. Un recubrimiento efectivo de tuberías contra la corrosión necesita varias propiedades, entre las que se encuentran:

1. Facilidad de aplicación
2. Buena adhesión a la tubería

3. Buena resistencia al impacto
4. Flexibilidad
5. Resistencia al desgaste provocado por el tipo de suelo
6. Resistencia al agua
7. Resistencia eléctrica
8. Estabilidad química
9. Resistencia a bacterias y organismos marinos
10. Resistencia a la corrosión por agentes electroquímicos

**Estaciones de compresión.** Al igual que la línea de transporte, las estaciones de compresión son de vital importancia para lograr desplazar el gas y existen dos tipos diferentes, la estación de origen, que se encuentra en el punto de inicio del gasoducto y es generalmente la más compleja, y las estaciones de recompresión que se encuentran a lo largo del gasoducto y contienen menos equipamiento. La cantidad, localización y tamaño de las estaciones de recompresión se determina durante la etapa de diseño del sistema del gasoducto y depende del largo de la tubería y de la cantidad de energía que es necesario suministrar al gas para transportar el volumen requerido a la presión deseada de descarga. Mientras más larga es la red de transporte, más estaciones de recompresión se necesitan. Dentro de una estación de compresión se encuentran equipos de medición de flujo y composición, especialmente cuando se realiza una transferencia de custodia, o dicho en otras palabras, el producto cambia de propietario. En algunas otras estaciones, generalmente en las estaciones de origen, un separador que remueve líquidos y sedimentos del gas es colocado a la entrada del compresor para

prevenir algún daño al equipo. Adicionalmente a estos componentes clave, una estación de compresión posee arreglos de válvulas para redirigir el fluido que entra o sale de la estación en caso de alguna contingencia o sólo para permitir dejar fuera de operación un equipo para mantenimiento y/o reparación. Algunas de estas válvulas son operadas manual o automáticamente por un sistema que monitorea las condiciones de operación. La recopilación de datos en todo el sistema le permite reaccionar automáticamente y de diferente manera ante cualquier emergencia o situación inesperada. Un sofisticado sistema de control computarizado y de adquisición de datos (SCADA por sus siglas en inglés de Supervisory Control and Data Acquisition) se encarga de realizar esta tarea y forma parte de todo el gasoducto.

El equipamiento de una estación de compresión varía en tamaño y tipo dependiendo del volumen y las propiedades del gas que se desea transportar, el tipo de sistema de control y monitoreo que se utilizará, dependerá de lo lejano que se encuentre la estación y el entorno, entre otros.

- **Compresor.** Los compresores son equipos mecánicos que suministran la energía necesaria al gas para hacerlo fluir a través de la tubería. Están divididos generalmente en dos tipos, centrífugos y reciprocantes y cada uno tiene características diferentes. Por ejemplo, los compresores reciprocantes generalmente operan a velocidades más bajas que los compresores centrífugos y son usados en aplicaciones donde se requieren altas presiones. Producen flujo pulsante y su instalación debe ser diseñada para evitar que el equipo se dañe debido a las pulsaciones y vibraciones.

Los cilindros del compresor reciprocante contienen válvulas de succión y descarga para permitir el flujo de gas dentro y fuera del cilindro. El gas que fluye hacia dentro del cilindro a través de la válvula de succión, a la temperatura y presión de succión, es comprimido dentro del cilindro y descargado a una presión más alta a través de la válvula de descarga. El volumen de gas que los equipos pueden comprimir depende del tamaño del cilindro entre otras cosas. Muchos de los compresores reciprocantes que son usados para dar servicio a tuberías de gas natural son equipos integrales, es decir, el impulsor o motor principal y el compresor se encuentran dentro de la misma unidad. La elección del tipo de motor principal depende de la potencia requerida, la eficiencia, disponibilidad y el tiempo estimado de mantenimiento y reparaciones. Los tipos de motores principales generalmente son elegidos de entre motores eléctricos, turbinas de gas o motores reciprocantes de combustión interna.

Es muy común que un compresor incluya más de una etapa de compresión, conectando en serie e individualmente cada uno de los cilindros del compresor, si el rango de compresión es mayor a 5, puede ser utilizado un arreglo de 2 o más compresores en serie.

En un compresor centrífugo, la energía es suministrada al gas por la rotación de un impulsor en lugar de su confinamiento y compresión. Estos equipos descargan gas a velocidades más altas dentro de un difusor, donde la velocidad del gas es reducida y su energía cinética convertida a presión. Los compresores centrífugos tienen menos partes móviles que un compresor

reciprocante. Sólo el eje de transmisión rota, por lo tanto, los compresores centrífugos tienen costos de mantenimiento más bajos comparados con los compresores reciprocantes. Por otra parte, debido a la poca vibración que presentan, los compresores centrífugos son mayormente utilizados en plataformas marinas. Aunque no tienen rangos de compresión tan altos como los equipos reciprocantes, los compresores centrífugos son utilizados en serie para contrarrestar esta deficiencia y así poder alcanzar las presiones deseadas (Kennedy, 1993).

- **Interenfriadores:** El gas es generalmente comprimido por etapas, proceso en donde se libera calor. El calor de compresión tiene que ser removido entre cada una de las etapas y para este propósito es necesario instalar interenfriadores.

Los enfriamientos entre cada etapa de compresión se pueden llevar a cabo por refrigeración con aire, con agua o gas dentro de un intercambiador de calor. Típicamente los enfriadores con aire consisten en un serpentín horizontal con gas caliente fluyendo entre cada una de las etapas de compresión. Un ventilador hace pasar aire sobre el arreglo de tubos para enfriar el gas antes de entrar a la succión del siguiente compresor.

Cuando se intercambia calor con agua o con gas generalmente se utiliza un intercambiador de calor de tubos y coraza, haciendo pasar el gas por dentro de los tubos y el agua o gas de enfriamiento por la coraza.

Dependiendo del tipo de gas, separadores pueden ser necesarios entre cada una de las etapas de compresión para remover cualquier líquido que se haya condensado durante el interenfriamiento. Si llega a entrar líquido al compresor, puede ocasionar daños severos al equipo ya que los líquidos son fluidos incompresibles y además podrían remover el aceite lubricante de las paredes de los cilindros interiores. El diseño de los interenfriadores involucra el dimensionamiento de los equipos intercambiadores de calor calculando el flujo de energía a intercambiar por los incrementos de temperatura y el dimensionamiento de los recipientes para remover el líquido condensado (Kennedy, 1993).

- **Sistema de control supervisorio y adquisición de datos (SCADA):** El objetivo primario de un sistema de control en ductos, es obtener el más alto rendimiento al más bajo costo sin que se excedan los límites de presión en el sistema y entregando el volumen requerido a tiempo. El bombeo, la compresión y otras operaciones son monitoreadas para reducir los costos de mantenimiento. Hoy en día, el mantenimiento preventivo es una forma de reducir los costos de operación.

La detección de fugas también es una parte importante de la operación de un ducto de transporte de hidrocarburos. Una detección temprana de fugas puede reducir considerablemente la pérdida de producto, el riesgo de contaminación y las probabilidades de que ocurra un accidente.

El sistema de control y supervisión de datos de un ducto regula presiones de paro y arranque de bombas y compresores, monitorea el estatus de dichos

equipos y verifica la apertura o cierre de válvulas a lo largo del ducto, todo desde una red centralizada de datos que opera remotamente.

Los sistemas de control supervisorio y adquisición de datos son sistemas computarizados que llevan a acciones de control y monitoreo de las variables de proceso. En ductos de gas y petróleo el sistema de control también puede ayudar a rastrear producto, detectar fugas y almacenar información.

Además de controlar el flujo, presión, accionamiento de válvulas y otras variables de operación, el sistema de control es también aplicado para proveer un mecanismo de administración de actividades de almacenamiento, transporte y ventas. Por otra parte, el sistema SCADA también puede ser utilizado para optimizar la eficiencia motor/compresor al disminuir el consumo de combustible controlando el torque, proporción de aire-combustible, tiempo de ignición, paro y arranque.

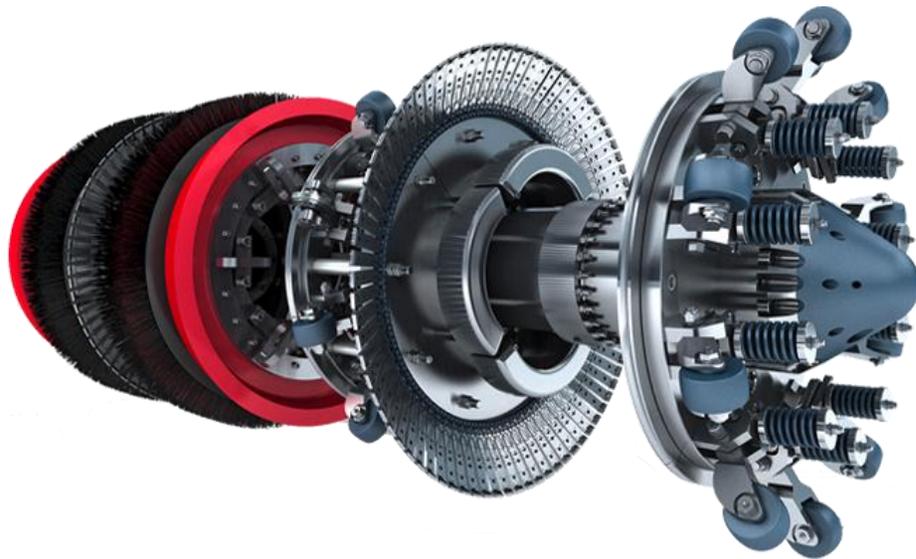
La redundancia en los sistemas de control es una práctica común para incrementar la confiabilidad. Es el uso duplicado de un elemento del sistema de tal forma que si alguno llegara a fallar, exista un reemplazo que pueda llevar a cabo las mismas tareas. En los sistemas más redundantes, si un elemento falla, su reemplazo entra en acción automáticamente sin la intervención de ningún operador y sin alterar las condiciones del sistema. La redundancia es útil para incrementar la confiabilidad de un sistema de control pero debe ser diseñada cuidadosamente después de considerar los efectos o consecuencias de una falla en los componentes de control (Kennedy, 1993).

- **Trampas de diablos:** Trampas de diablos y/o esferas son usadas en líneas de transporte de hidrocarburos para una gran variedad de propósitos.

Las trampas de diablos son dispositivos utilizados para fines de envío o recibo del diablo de inspección o de limpieza. Es decir, son los arreglos de válvulas y tuberías que permiten introducir este dispositivo para que viaje a lo largo de la tubería a través de un by-pass para no detener la operación de la línea. Otras trampas de diablos son instaladas al final de las líneas de transporte o en algunos segmentos de ellas para retirar los diablos de las tuberías y descargar la información recopilada durante su transporte (Kennedy, 1993).

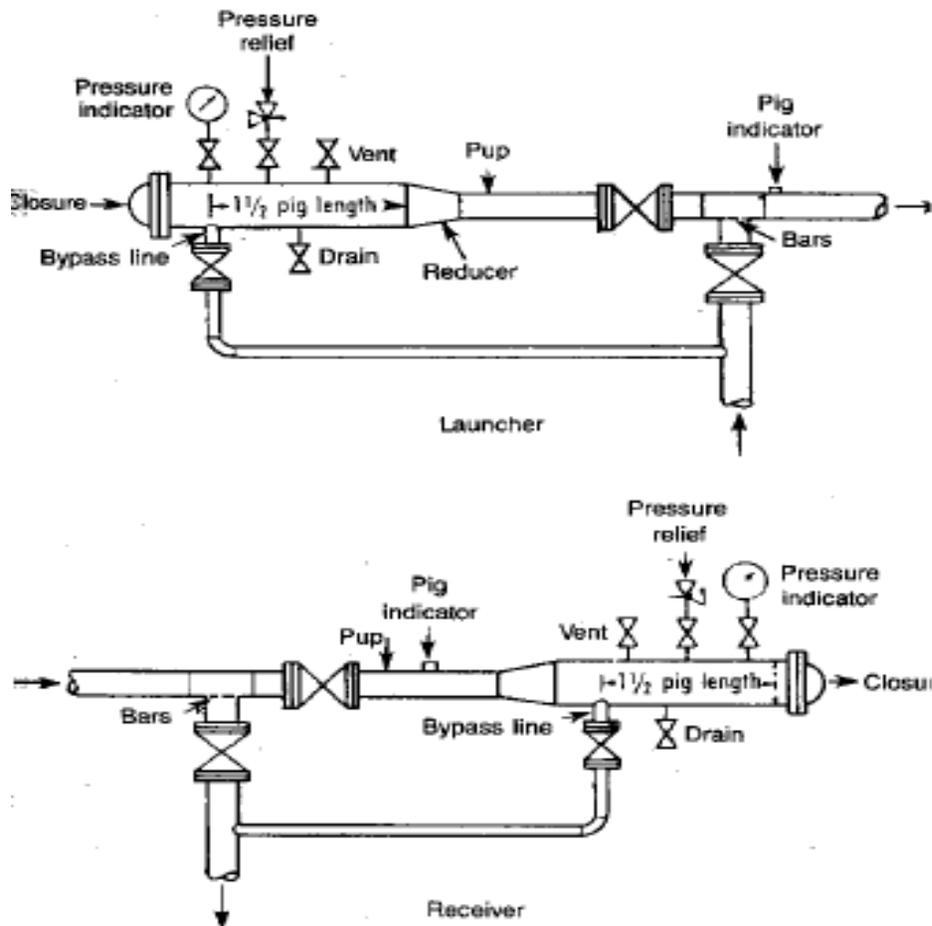
Actualmente, diablos instrumentados son usados para monitorear las condiciones de la tubería y detectar problemas que podrían llevar a una falla.

Un diablo mecánico, es un dispositivo de acero recubierto de un plástico especial que permite sellar los espacios contra las paredes internas de la tubería. Para mover el diablo a lo largo de la tubería se requiere de una diferencia de presión que empuje el diablo y lo transporte desde una estación de envío hasta una estación de recepción.



**Figura 7** Diablo (Inspection Intelligence NDT Global, 2015).

- **Válvulas de seccionamiento:** Dispositivo instalado en la tubería para bloquear el flujo de gas hacia cualquier sección del sistema de transporte. Generalmente son instaladas para aislar secciones de ducto que se encuentran en cruces de caminos, puentes, ríos o tramos largos (Secretaría de Energía, 2011).



**Figura 8** Trampas de envío y recepción de diablitos (Kennedy, 1993).

- **Medición y almacenamiento:** La medición del flujo de gas siempre ha sido parte importante de la operación de un sistema de ductos. En cada transferencia de custodia el comprador y el vendedor tienen que estar

seguros de la cantidad exacta de volumen transferido. Los medidores de desplazamiento positivo son los más utilizados para medir el flujo de gas. En estos equipos, el fluido pasa continuamente a través del medidor en cantidades aisladas llenando y vaciando un espacio de volumen conocido. Un contador registra la cantidad total de fluido pasando a través del medidor. Algunos de estos medidores tienen dispositivos que indican la velocidad de flujo además del indicador total de volumen transferido. La manera de asegurar que el medidor de flujo en línea funciona correctamente es mediante probadores de medidores. Estos probadores son capaces de medir con exactitud un volumen específico de fluido y compararlo con el flujo que el medidor de desplazamiento positivo cuenta. Los probadores típicos constan de una longitud de tubería que contiene sensores de posición que detectan el paso de una esfera. El volumen que se encuentra entre los dos detectores es conocido con precisión. Los sensores están conectados electrónicamente a un dispositivo que mide el tiempo en el que el volumen conocido se desplaza a través de los dos sensores. El flujo que el medidor cuenta durante el tiempo en el que la esfera se desplaza de sensor a sensor es comparado con el flujo que se conoce del probador (Kennedy, 1993).



1. Se determina una presión de entrega requerida en el punto final de la tubería. Esta presión tiene que fijarse por el usuario final, si se trata de una ramificación se establece por la presión requerida al final de la unión con la línea principal para permitir el flujo dentro de la misma.
2. Las pérdidas de presión por fricción y la presión requerida para vencer los cambios de elevación se suman a la presión necesaria en el punto de entrega y así se hace posible su cálculo. La caída de presión en la línea que debe vencer el compresor es esencialmente la pérdida por fricción más la presión ejercida por la columna de gas, cuya altura es la diferencia de elevaciones entre el punto inicial y el punto final. El método de la prueba y error puede ser utilizado cuando es necesario elegir un diámetro de tubería tentativo para calcular pérdidas de presión. Si la caída de presión es muy alta, la presión de entrada puede exceder el rango de presiones de trabajo de la tubería o bien provocar que se requiera un trabajo excesivo de compresión. En este caso, se debe elegir una tubería de diámetro más grande y repetir los cálculos. El objetivo es seleccionar un diámetro de tubería que permita operar eficientemente a una presión permitida por las normas y regulaciones aplicables.
3. Con el diámetro de la tubería y la presión de operación determinadas, la potencia de compresión necesaria para entregar el volumen requerido a una presión específica puede calcularse de forma aproximada. Si se requiere más de una estación de compresión a lo largo de la línea, el tamaño y localización de una estación adicional se establece calculando la caída de presión en el

resto de la tubería y la potencia necesaria para mantener la presión de operación.

4. En la mayoría de los casos, es necesario llevar a cabo cálculos económicos de diferentes escenarios para poder comparar combinaciones de diámetros de tubería, presiones de operación, y potencia de equipos que permitan elegir el mejor sistema (Kennedy, 1993).

### **2.2.3 Construcción e instalación**

Los métodos de construcción difieren dependiendo del área geográfica en la que serán construidos, el terreno, el medio ambiente, el tipo de gasoducto y las restricciones y estándares impuestas por el gobierno y diferentes agencias regulatorias. Las técnicas de construcción pueden clasificarse en 3 tipos diferentes:

- Técnicas de construcción en suelo firme.
- Técnicas de construcción de líneas mar adentro.
- Técnicas de construcción de líneas en suelo ártico.

Considerando estos tipos de obra, el costo de construcción generalmente es de alrededor 40% del costo total de la inversión.

A pesar de que existen muchas diferencias entre las distintas técnicas de construcción, entre ellas poseen algunas características en común:

- a) Criterios de diseño establecidos por órganos gubernamentales y agencias regulatorias para garantizar la operación segura del gasoducto y el personal que las operará.

- b) Estudios de impacto ambiental tienen que llevarse a cabo antes de iniciar el trámite de los permisos de construcción. Con ellos, los planos generales de construcción deben entregarse para establecer planes de protección de los distintos escenarios ambientales, vida salvaje, sitios arqueológicos y otros bienes inmuebles que puedan estar involucrados.
- c) La mayoría de los ductos que transportan hidrocarburos son construidos soldando tramos cortos de tubería o uniéndolos a través de juntas.
- d) Los soldadores deben ser constantemente evaluados así como las soldaduras que realizan.
- e) Generalmente los ductos de transporte de hidrocarburos se instalan debajo del nivel del suelo, si son terrestres, o en el fondo del mar, si son marítimos.
- f) Todos los ductos son sometidos a pruebas de presión antes de la puesta en marcha. El método más conocido es la prueba hidrostática.
- g) Todos los ductos son recubiertos exteriormente para prevenir la corrosión.
- h) Las líneas de distribución deben tener una o más estaciones de compresión a lo largo de la ruta de la tubería para proveer al fluido de la energía necesaria para moverse.
- i) La construcción de cualquier ducto sigue la siguiente secuencia general: diseño y selección de la ruta, obtención de los derechos de vía, instalación, alineación desde el punto de origen al punto final, construcción de instalaciones de servicio como estaciones de compresión, servicios auxiliares, control y medición, etc.

Dentro de la obra la construcción de una línea de transporte de gas, una de las maniobras más importantes es la instalación del ducto. La primera actividad que se realiza es la limpieza del derecho de vía usando bulldozers o maquinaria pesada similar, el propósito es facilitar el movimiento y transporte del equipo de construcción a lo largo de la ruta.

La zanja o trinchera donde se instalará, comúnmente se cava a un costado del centro del derecho de vía y el espacio mínimo que debe ser cubierto entre el nivel se suelo y el ducto debe ser de 1 metro. Normalmente la tubería se entrega sobre el derecho de vía y es acomodada a un costado de la zanja a lo largo de la ruta para iniciar las labores de soldadura. Le soldadura se aplica en diferentes “camas”, correspondiéndole a un soldador diferente una cama distinta hasta cubrir completamente el espesor de la tubería. Una vez que se han terminado de soldar todas las uniones y se han inspeccionado, y además la tubería se ha recubierto con el agente anticorrosivo, la tubería es suspendida sobre la zanja y colocada lentamente dentro para después ser cubierta con la tierra extraída durante la excavación (Kennedy, 1993).

#### **2.2.4 Otros componentes críticos para un proyecto de ductos.**

Adicionalmente a lo ante descrito se debe considerar lo siguiente:

##### **Estudios.**

1. Para la elaboración y análisis de las alternativas de trazo para los ductos, considerando imágenes satelitales y recorridos físicos de las posibles rutas.

2. Evaluación de riesgos políticos, sociales y económicos en la zona donde cruzará el ducto.
3. Evaluación de la viabilidad técnica y económica de cada opción para seleccionar la que mejor cumpla los objetivos del negocio.
4. De factibilidad de uso de suelo.
5. De suelo.
  - a. Topográficos.
  - b. Geotécnicos.
  - c. Geofísicos.
6. Análisis del perfil hidráulico de los trazos.
7. Análisis de riesgos operativos y de seguridad al diseño del ducto.

#### **Plan de obtención de permisos**

1. Permisos a tramitar ante la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
  - a. Manifiesto de impacto ambiental
  - b. Estudio de análisis de riesgo
  - c. Trámites del derecho de vía
2. Permisos a tramitar ante la Secretaría de Energía y la Comisión Reguladora de Energía.
3. Permisos a tramitar ante la Secretaría de Comunicaciones y Transporte
4. Permisos a tramitar ante la Comisión Nacional de Agua

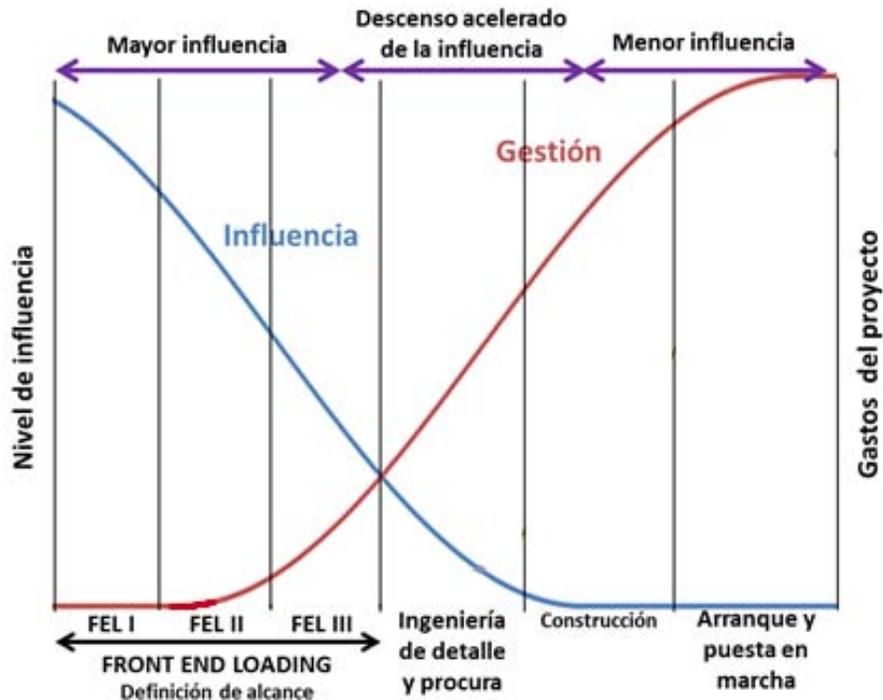
### **2.3 Mejores prácticas para el desarrollo de un proyecto de gasoductos**

Una mejor práctica se define como un proceso o método que promueve el mejoramiento del desempeño de un proyecto siempre y cuando se emplee efectivamente. La Independent Project Analysis (IPA) es una compañía consultora especializada en estudios referenciales (benchmarks) de proyectos de inversión. La IPA señala que la mejor práctica seguida por empresas líderes y que es imprescindible para el desarrollo de un proyecto de ductos es la generación o adquisición de un paquete de información básica previo al inicio de la construcción. Dicha práctica se denomina FEL (Front End Loading) o definición inicial del alcance de un proyecto.

El FEL es el proceso con el cual una compañía desarrolla la definición detallada de un proyecto para alcanzar los objetivos de negocio (Independent Project Analysis, Inc., 2009).

Su objetivo es definir la línea base sobre la cual se fundamenta el desarrollo general del proyecto, sirve para definir qué es lo que se quiere hacer, y la forma en que la gente que lo realizará pueda llevarlo por el camino más efectivo para el negocio. En otras palabras es el proceso por medio del cual se desarrolla suficiente información estratégica para que los dueños del negocio identifiquen los riesgos, definan una estrategia para mitigarlos y con esto puedan comprometer recursos maximizando la probabilidad de que el proyecto sea exitoso. La definición y generación del paquete de información inicial está estrechamente ligada al alcance de un proyecto ya que congela la magnitud del mismo y establece qué se encuentra dentro de su jurisdicción y qué no.

El Instituto de la Industria de la Construcción (CII por sus siglas en inglés de Construction Industry Institute) ha comprobado a través de diversos estudios que la definición inicial de un proyecto utilizando la metodología FEL tiene un impacto significativo en el resultado de proyectos de inversión (Construction Industry Institute, 1994). La metodología FEL debe implementarse casi al mismo tiempo que la concepción de la idea de negocio, cuando los gastos son relativamente bajos y el potencial de influenciar en el valor de un proyecto es grande. En otras palabras, una característica importante del FEL es que está diseñado para influir en las decisiones clave que se deben tomar durante la etapa de planeación y que impactarán los resultados finales de un proyecto. Esto cuando los gastos son aun relativamente pequeños, en lugar de impactarlo durante la etapa de ejecución u operación, cuando los gastos son mayores y un cambio (ocasionado por una indefinición del alcance) a esas alturas tendría como consecuencias costos y retrasos muy elevados.

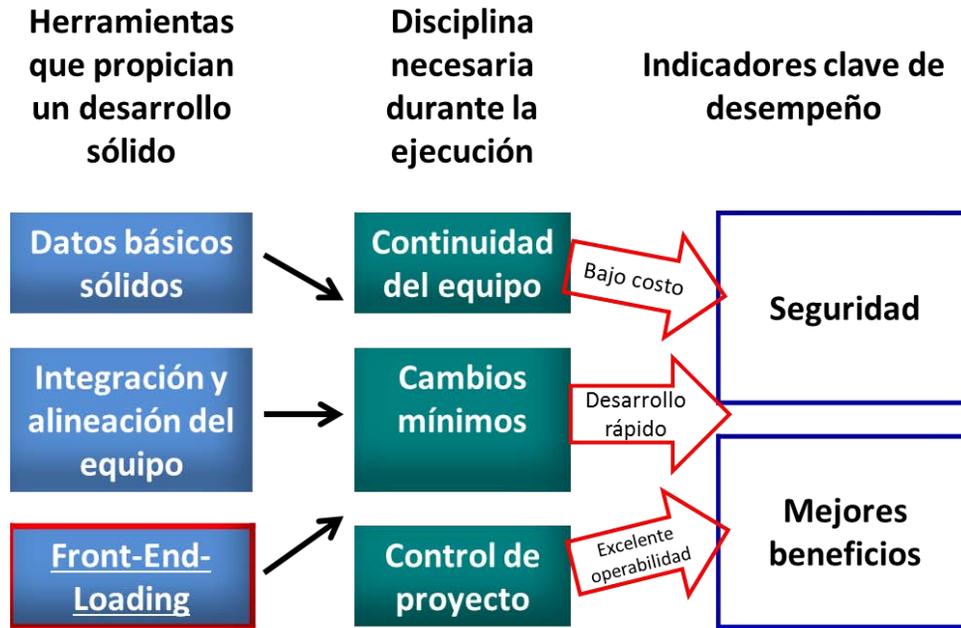


**Figura 10** Impacto de la definición de elementos clave durante el desarrollo de un proyecto (Construction Industry Institute, 2008)

La gráfica anterior muestra el gran impacto de la planeación y la influencia del FEL durante la etapa inicial del proyecto, y la disminución de la misma conforme se incrementan las actividades de gestión.

De acuerdo al siguiente diagrama, la metodología FEL forma parte de los factores clave que guían y orientan a un proyecto a cumplir los objetivos de negocio y su efectividad operativa. En ella se destacan las medidas adicionales que se deben tomar (darle continuidad al equipo de proyecto, realizar el menor número de cambios, llevar un control de proyecto) además de las buenas prácticas<sup>3</sup>, para tener éxito en un proyecto.

<sup>3</sup> Ver nota 1.



**Figura 11** Diagrama de elementos de efectividad en un proyecto (Independent Project Analysis, Inc., 2009).

Por otro lado, la IPA también destaca que si la metodología FEL se implementa de manera correcta, se pueden obtener las siguientes ventajas competitivas respecto a los proyectos en los cuales no se utilizan buenas prácticas:

- Reducción del costo total del proyecto hasta en un 20%.
- Variaciones y cambios mínimos respecto al alcance inicial, costo, programa y operatividad autorizados.
- Mayor probabilidad de lograr los objetivos de negocio y cumplir con las expectativas y requerimientos de los dueños.
- Mejora la identificación de riesgos o puntos vulnerables y permite la creación de planes o estrategias para su mitigación.

- Permite la elección de la mejor alternativa de proyecto asegurando el éxito del caso de negocio<sup>4</sup>.

El paquete de información básica que debe generarse durante el FEL está compuesto por tres rubros generales:



**Figura 12** Componentes del FEL para ductos (Independent Project Analysis, Inc., 2009)

1. Factores del sitio.

- a) Definición de la ruta
- b) Condiciones del suelo y del terreno
- c) Requerimientos ambientales
- d) Requerimientos de seguridad y salud
- e) Derechos de vía
- f) Problemas sociales con los terrenos.

2. Definición de ingeniería:

- a) Alcance detallado
- b) Características del fluido

<sup>4</sup> Un caso de negocio es la justificación persuasiva para la iniciativa y emprendimiento de un proyecto, incluye detalles preliminares de la necesidad, el alcance, los recursos necesarios, el calendario de implementación, los beneficios cuantificables y no cuantificables, así como el retorno al corto y largo plazo.

- c) Especificación de la tubería
- d) Análisis hidráulico
- e) Requerimientos de excavación y zanjas
- f) Método de instalación
- g) Requerimientos de perforaciones direccionadas
- h) Requerimientos de soldadura e inspección
- i) Estimado de costos
- j) Participación y aceptación del proyecto por
  - Operación
  - Mantenimiento
  - Planeación del negocio

### 3. Plan de ejecución del proyecto

- a) Estrategia de contratación
- b) Participantes en el equipo de proyecto y roles
- c) Programa integrado
  - Ruta crítica
  - Identificación de paros y libranzas para interconexiones
  - Requerimientos de tiempo extra
- d) Planes
  - Comisionamiento (recepción y prueba de las instalaciones)
  - Entrenamiento
  - Arranque
  - Operación
  - Mano de obra

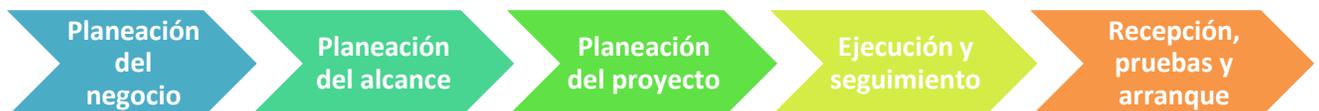
- Aseguramiento de la calidad
- e) Control de costo y programa

Las tres secciones de información que se mencionan anteriormente muestran las variables clave que deberán definirse durante las distintas fases de desarrollo de un proyecto de gasoducto, desde la concepción de las ideas de negocio y la elección de la más viable, hasta la materialización del producto terminado.

La definición inicial de un proyecto a través del uso de la metodología FEL, es el proceso mediante el cual se organiza y establece el ciclo de vida del mismo para asegurarse de que los objetivos del proyecto cumplan con los del negocio y los intereses de los dueños. El FEL permite considerar la participación ordenada de todas las áreas involucradas a lo largo del ciclo de vida de un proyecto con el objetivo de definir el alcance del mismo e identificar problemas potenciales.

#### 2.4 Ciclo de vida de un proyecto de ductos

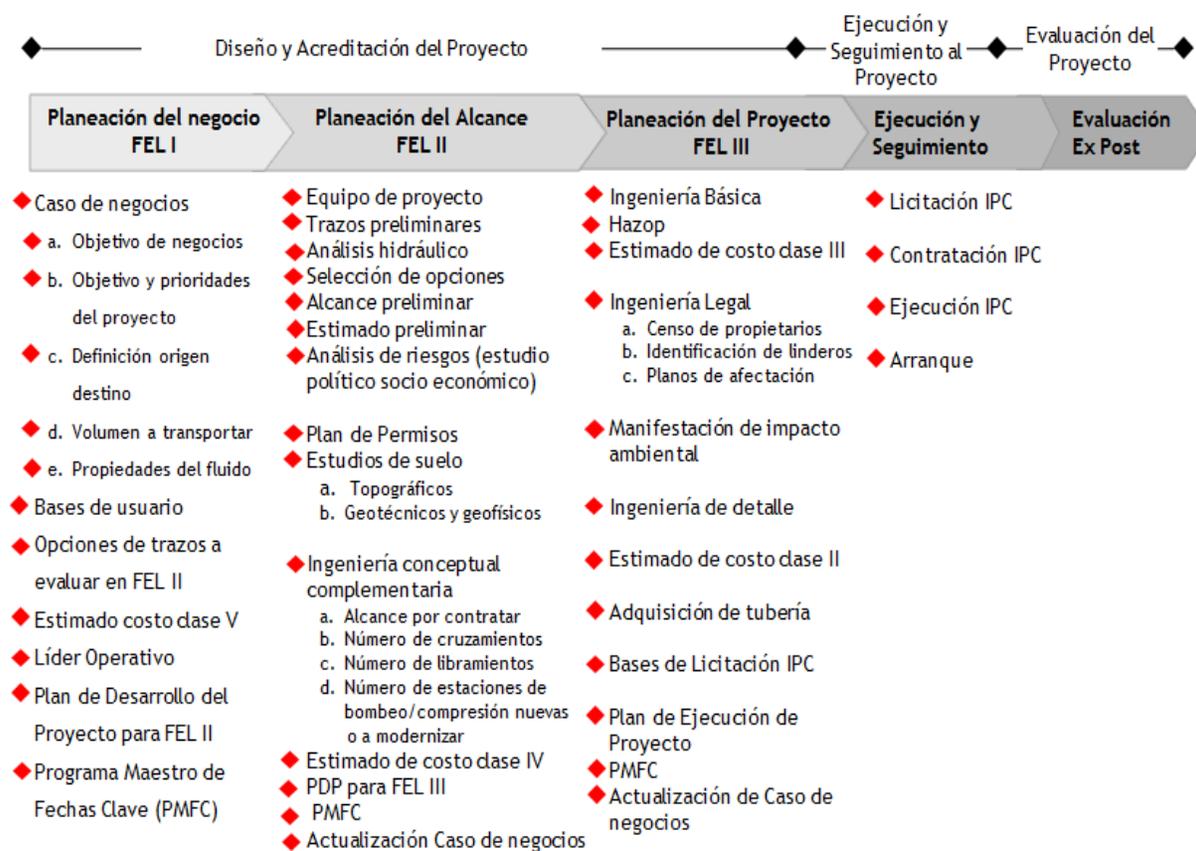
Las buenas prácticas de ingeniería especifican que los proyectos deben tener un proceso definido que relacione las actividades requeridas como una sucesión ordenada de tareas y trabajos para alcanzar los objetivos del proyecto en un tiempo determinado. Esta secuencia se llama ciclo de vida e incluye todas las actividades, desde el nacimiento de un proyecto hasta su finalización.



**Figura 13** Etapas del ciclo de vida de un proyecto de gasoductos (Construction Industry Institute, 2010)

En el establecimiento del ciclo de vida de un proyecto, la metodología FEL define el trabajo técnico que debe realizarse en cada fase, quiénes deben estar involucrados y qué información debe generarse en cada una de ellas.

El ciclo de vida de un proyecto de gasoductos se divide en fases que cubren un objetivo parcial del proyecto. Cada fase se caracteriza por generar un conjunto de salidas concretas y medibles (entregas o hitos) que se materializan en documentación y en resultados. La metodología FEL crea y ordena las etapas de planeación y desarrollo de un proyecto, tal y como se muestra en la siguiente imagen:



**Figura 14** Modelo de FEL para ductos

- Planeación del negocio: Esta etapa se lleva a cabo principalmente para elegir el mejor caso de negocio y establecer la viabilidad y los objetivos prioritarios, el origen y el destino del gasoducto, el volumen a transportar y las propiedades del gas. Se definen las opciones de trazos de rutas que serán evaluados durante el FEL II, se efectúa un programa maestro<sup>5</sup> de fechas clave con los hitos<sup>6</sup> más importantes y se realizan estimados de costos preliminares que permiten tomar decisiones de factibilidad económica.
- Planeación del alcance: Una vez que se ha seleccionado el caso de negocio a desarrollar se determina y organiza el equipo de trabajo del proyecto. Posteriormente se procede a realizar la ingeniería conceptual en donde se definen los alcances preliminares con el objetivo de efectuar un estimado de costos más aproximado, se trazan rutas generales, se realizan análisis hidráulicos, se practican estudios políticos, sociales y económicos de las regiones geográficas involucradas, se propone un plan de permisos, se llevan a cabo estudios de suelo, se define el número de cruzamientos así como el número de estaciones de compresión necesarias, se efectúa el análisis de riesgos, evaluación económica de alternativas y se elige la opción que mejor

---

<sup>5</sup> Un programa maestro es el documento a través del cual la gerencia de un proyecto y su equipo de trabajo coordinarán los esfuerzos y las acciones de los diferentes entes internos y externos al proyecto con el fin de materializar los objetivos del proyecto en la fecha establecida. Un plan maestro está conformado por los siguientes elementos:

- Descripción clara del alcance.
- Diseño del modelo organizacional.
- Personal de staff requerido y equipo de trabajo.
- Desglose estructurado del trabajo.
- Descripción detallada de cada actividad.
- Consideraciones legales.
- Plan financiero.
- Identificación y descripción de riesgos.
- Programa técnico de ejecución y puesta en marcha.

<sup>6</sup> Un hito es un punto de referencia que marca un evento específico importante a lo largo de la línea del tiempo de un proyecto y se usa para supervisar el progreso del mismo. Estos eventos señalan puntos de anclaje tales como fechas de arranque y finalización, entrega de documentación entre otras. Los hitos no tienen impacto en la duración de un proyecto, estos sólo son utilizados para visualizar el progreso y los puntos clave que deben cubrirse para alcanzar el éxito.

cumpla con los objetivos de negocio. Una vez que se ha elegido la mejor opción, se llevan a cabo los estudios de sitio y se realiza la ingeniería básica.

- Planeación del proyecto: En esta etapa se genera la información básica complementaria para constituir un plan de ejecución del proyecto que permita elaborar planes de contingencia ante posibles eventos o desviaciones y de esta manera minimizar los riesgos de falla. En esta fase se lleva a cabo la ingeniería básica extendida y de detalle, planes de procura, ingeniería legal (Plan de obtención de permisos), censo de propietarios, identificación de linderos, manifestación de impacto ambiental, adquisición de tubería, planos de afectación y un estimado de costos más preciso.
- Ejecución y seguimiento: Durante esta etapa se realiza la procura y construcción y se monitorea constantemente al avance de la ejecución de acuerdo a la planeación semanal, se identifican las necesidades de recursos como: información, planos, equipos, materiales, personal técnico, obreros, procedimientos, por mencionar algunos ejemplos. Se detectan retrasos, causas y las posibles consecuencias. Los productos de esta etapa son los cálculos de avances reales vs o programados, el pronóstico de una fecha de terminación, el cálculo de rendimientos, pronóstico de necesidades de recursos, las desviaciones respecto al programa y la elaboración de planes de recuperación.
- Recepción, pruebas y arranque: En esta etapa se inicia la operación. Se deben realizar secuencias de arranque, precomisionamiento y pruebas. Durante la planeación del proyecto, para esta etapa se debieron haber establecido los requerimientos mínimos indispensables para la puesta en

marcha y se tuvieron que haber definido las responsabilidades de cada uno de los participantes. Los siguientes requerimientos para la terminación sustancial del proyecto deben ser identificados:

- Garantía, permisos, seguros
- Soporte tecnológico durante el arranque
- Pruebas de arranque para equipos y sistemas
- Inspecciones finales
- Calibraciones
- Verificaciones
- Documentación
- Requerimientos de entrenamientos para todos los sistemas
- Lista de faltantes para finalización y tiempos de ejecución
- Certificado de terminación sustancial
- Otros definidos por el usuario

## **2.5 Índice para medir el nivel de definición de un proyecto de ductos (PDRI)**

El FEL eslabona en un ciclo de vida la secuencia de las actividades que deben realizarse para definir el alcance de un proyecto y asegurar que se cumplan los objetivos de negocio. Lo anterior representa un método de control y administración que otorga una visión clara y completa de las necesidades y requerimientos y al mismo tiempo mide qué tan completa está la información inicial generada y si es suficiente para garantizar el éxito.

La conclusión de una fase del ciclo de vida de un proyecto generalmente implica una revisión de los entregables claves y del nivel de definición del proyecto alcanzado hasta ese momento. El Project Definition Rating Index, (PDRI por sus

siglas en inglés) es un acrónimo que se le da a una herramienta desarrollada por el CII para medir y cuantificar el nivel de definición del alcance de un proyecto.

Las herramientas de control y administración de proyectos como el PDRI permiten determinar si el proyecto ya cuenta con el suficiente nivel de definición para continuar a la siguiente fase del ciclo de vida.

El PDRI registra y describe cada elemento crítico del paquete de información que ayuda a definir el alcance. Al hacer una evaluación del nivel de definición de cada uno de los elementos, el PDRI permite al equipo de proyecto identificar rápidamente los factores que requieren más trabajo en su definición para evitar los riesgos de indefiniciones que impidan que se cumplan las metas de costo, programa y operación.

En un principio, el PDRI fue concebido como un instrumento que contribuía a la toma de decisión para financiar la ingeniería de detalle y la ejecución de una obra, sin embargo, el CII establece que esto depende del tamaño y complejidad del proyecto, ya que puede ser utilizado para evaluar si alcanzó o no el adecuado nivel de definición en cada una de las etapas del desarrollo de un proyecto para poder avanzar a la siguiente.

El PDRI para proyectos de infraestructura consta de tres secciones principales:

- Sección I: Bases para la decisión de negocio
- Sección II: Bases del diseño
- Sección III Plan de ejecución

La sección I está dividida en 5 categorías, la II en 4 y la III en 4. En total las 3 secciones contienen 68 elementos. Cada elemento tiene un peso ponderado dependiendo de su importancia relativa respecto al resto de los demás elementos y suman 1000 puntos en total. Entre mayor peso tenga un elemento y una categoría, mayor importancia tendrá su definición e impacto en el alcance y costo del proyecto.

El PDRI engloba, describe y enlista cada una de las actividades que se deben llevar a cabo a lo largo del desarrollo de un proyecto de infraestructura para disminuir al máximo la probabilidad de fracaso. Cada categoría representa un paquete de los elementos más importantes que son necesarios para definir el alcance de un proyecto de ductos y éstos se describen a continuación:

#### A. Estrategia de proyecto

Se establecen necesidades a cubrir a través de análisis de propuestas de casos de negocio. Se analizan las opciones y la viabilidad de cada uno de ellos mediante estudios de inversión y benchmarking. Por otra parte, se eligen a los miembros clave del equipo de proyecto asegurándose de establecer una coordinación entre ellos que permita la alineación de todos con los objetivos de negocio.

#### B. Filosofía del dueño u operador

En esta categoría se deben asentar los requerimientos de operación, mantenimiento y de diseño con los que el proyecto debe cumplir.

### C. Planeación y financiamiento

Se establecen los planes de financiamiento y una programación de proyecto preliminar que permita visualizar posibles problemas. Una vez identificados los hitos más importantes, los posibles riesgos, los financiamientos solicitados y el número de personas a trabajar en el proyecto para cumplir con las fechas de entrega, se define un plan de contingencias asociado a un primer estimado de costos.

### D. Requerimientos del proyecto

Esta categoría ayuda a definir las prioridades y los objetivos principales del proyecto para cumplir con los objetivos específicos de negocio en cuanto a calidad, seguridad, costo, tecnología, capacidad, entre otros. Para cumplir con todos estos objetivos, en esta categoría se evalúan las condiciones ambientales y las características de sitio iniciales que hacen posible determinar un alcance de trabajo.

### E. Análisis de valor

Se definen los procedimientos de ingeniería que son necesarios durante el diseño y la construcción de un proyecto. De la misma forma, se determinan los procedimientos necesarios para llevar a cabo simplificaciones a través de la identificación de actividades o estrategias que permitan reducir el número de pasos necesarios para llevar a cabo un proceso.

#### F. Información del sitio

Se especifican los estudios requeridos para recaudar información geológica, geotécnica, geográfica, ambiental, política, social y económica asociada a los sitios propuestos. La concentración y el análisis de esta información permitirán escoger la mejor de las opciones disponibles de sitio.

#### G. Localización y geometría

A través de planos esquemáticos se precisa la localización, la geometría, la alineación horizontal y vertical del ducto, el número y tipo de cruzamientos así como la clase de área en la que se encuentran los sitios de construcción proyectados.

#### H. Estructuras asociadas y equipamiento

Se delimita el número, tipo y clase de estructuras asociadas que el proyecto requiere para operar seguro, eficiente y manteniendo los estándares de calidad deseados. Ejemplo, puentes, cimientos, caminos, drenajes, accesos, bardas y edificios, entre otros. De la misma manera se define el tipo, calidad y cantidad de servicios auxiliares que se necesitan para operar.

#### I. Parámetros de diseño

En esta categoría se especifica la capacidad del proyecto y se establecen los parámetros que se tienen que cubrir en la etapa de diseño por parte de las distintas disciplinas de ingeniería así como de seguridad y mantenimiento con el fin de cumplir con la capacidad deseada.

#### J. Estrategias de adquisición de terrenos

Se crea una estrategia de adquisición de los terrenos involucrados en el derecho de vía autorizado, analizando aspectos legales, sociales, de negocio y políticos.

#### K. Estrategia de procuración

Se elabora un plan de procura tomando en cuenta estrategias contractuales, tiempos de entrega de equipos críticos o especiales, e hitos o fechas importantes del programa general de proyecto tales como arranques, libranzas y comisionamientos.

#### L. Control de proyecto

Con el nivel de definición que se tiene en esta etapa de desarrollo del proyecto se elaboran estimados de costos y de horas hombre a emplear por unidad de trabajo que permitirán llevar un control comparando lo estimado vs lo real y así establecer planes de contingencia o mitigación en caso de ser necesario.

#### M. Plan de ejecución del proyecto

Se establecen los requerimientos y características que tienen cumplir los documentos y la información que se generará y se entregará como parte del proyecto. Se desarrolla un programa de entrega de documentación, diseño y construcción. También se establecen los acuerdos de trabajo entre dueños y proveedores. En la siguiente tabla se presentan las categorías que integran cada una de las secciones del PDRI y el puntaje que se les asigna de

acuerdo a su nivel de importancia, en ella se destacan los elementos de más peso (letras rojas) y por lo tanto mayor prioridad.

**Tabla 3** Secciones del PDRI de infraestructura divididas por categoría y elementos (Construction Industry Institute, 2010).

<b>SECCIONES</b>	<b>Categorías</b>	<b>Peso</b>
<b>SECCIÓN I</b> <b>Bases para la decisión de un proyecto</b>	A. Estrategia de proyecto	<b>112</b>
	B. Filosofía del dueño u operador	67
	C. Planeación y financiamiento	70
	D. Requerimientos del proyecto	<b>143</b>
	E. Análisis de valor	45
<b>SECCIÓN II</b> <b>Bases de diseño</b>	F. Información del sitio	<b>119</b>
	G. Localización y geometría	47
	H. Estructuras asociadas y equipamiento	47
	I. Parámetros de diseño	<b>80</b>
<b>SECCIÓN III</b> <b>Programa de ejecución</b>	J. Estrategias de adquisición de terrenos	60
	K. Estrategia de procuración	47
	L. Control de proyecto	<b>83</b>
	M. Plan de ejecución del proyecto	<b>80</b>

En la sección I, que está constituida por las categorías A-E, se debe generar la información necesaria para identificar la necesidad a satisfacer y así establecer los objetivos de negocio, los requerimientos necesarios para cumplirlos, el análisis de valor y establecimiento de distintas opciones de negocio que cumplan con los objetivos para finalmente elegir la mejor opción de negocio.

Una vez que se han definido los objetivos de negocio e identificado la mejor alternativa de proyecto; en la Sección II, que está integrada por las categorías F-I, se deben analizar los elementos técnicos, políticos y sociales involucrados, los riesgos que éstos representan para el cumplimiento de los objetivos de negocio y la posibilidad de evitarlos o mitigarlos. En esta sección se establecen los parámetros de diseño para cada una de las principales disciplinas de ingeniería que encabezan la ingeniería de detalle. Simultáneamente se elabora un plan de ejecución de proyecto en el que se definen los procedimientos de seguridad, requerimientos, documentación a generar, software a utilizar, entre otros.

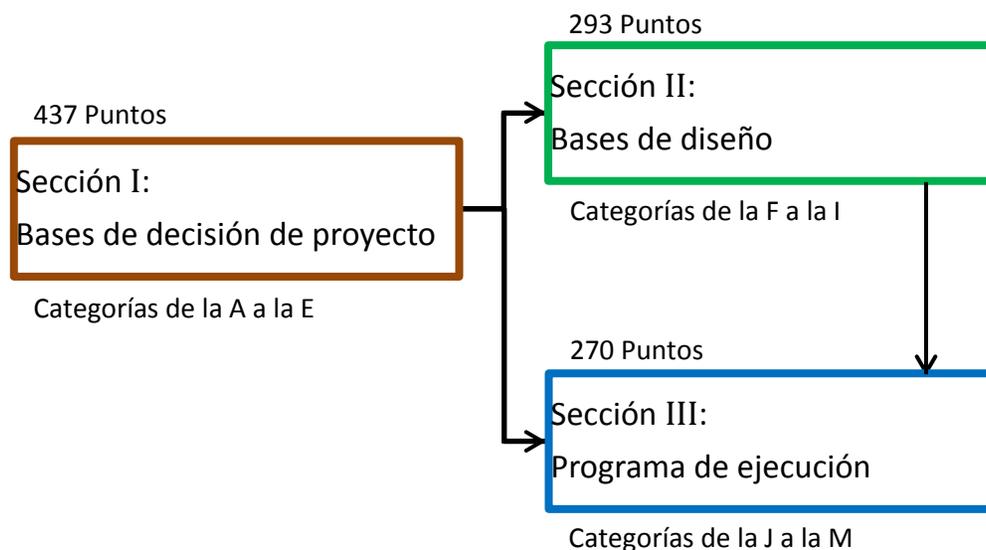
En la Sección III que va de la categoría J-M, se complementa el plan de ejecución, se determinan las estrategias de adquisición de terrenos y la estrategia de procuración plasmando en documentos la manera en que se van a cumplir los objetivos de negocio, cómo se va administrar el proyecto y cómo se va a controlar. En la tabla que se muestra a continuación se resume la importancia de cada una de las secciones del PDRI.

**Tabla 4** Ponderación de cada una de las secciones del PDRI de infraestructura (Construction Industry Institute, 2010).

<b>Categoría</b>	<b>Peso</b>	<b>%</b>
Bases de decisión de proyecto	437	43.7%
Bases de diseño	293	29.3%
Programa de ejecución	270	27.0%

Las bases para la decisión de un proyecto (SECCIÓN I) representan casi la mitad de los puntos totales (43.7%) y corresponden a la sección de más peso ya que

completar y recopilar toda la información que se genera en esta etapa determina la alineación del equipo de trabajo requerida para alcanzar los objetivos de negocio. Si esta sección no está bien definida, se corre el riesgo de fracasar al no tener una idea clara de lo que se quiere lograr con el proyecto, por ejemplo, cuál es el flujo que tiene que transportarse en el ducto, cuál es punto de origen, cuál es el destino, entre otros.



**Figura 15** Diagrama de secciones del PDRI (Construction Industry Institute, 2010).

Dentro de las secciones, no todas las categorías poseen el mismo peso en el PDRI ya que no todas tienen la misma relevancia en la definición del alcance de un proyecto de infraestructura. Esto quiere decir que las categorías de más peso son las que corresponden a los elementos del alcance más importantes y ejercen mayor influencia en el éxito de un proyecto y por lo tanto, una buena definición de las mismas es indispensable. En la siguiente tabla se muestran las categorías que

de acuerdo a su peso, son las más importantes para la definición del alcance de un proyecto.

**Tabla 5** Ponderación de cada una de las categorías del PDRI de infraestructura (Construction Industry Institute, 2010).

<b>Categoría</b>	<b>Peso</b>
<b>D. Requerimientos del proyecto</b>	<b>137</b>
<b>F. Información del sitio</b>	<b>119</b>
<b>A. Estrategia de proyecto</b>	<b>112</b>
M. Plan de ejecución del proyecto	83
I. Parámetros de diseño	80
L. Control de proyecto	80
C. Planeación y financiamiento	70
B. Filosofía del dueño u operador	67
J. Estrategias de adquisición de terrenos	60
G. Localización y geometría	47
H. Estructuras asociadas y equipamiento	47
K. Estrategia de procuración	47
E. Análisis de valor	45

Dada la naturaleza y las características especiales de los proyectos de infraestructura, las categorías que más peso tienen son:

- *D. Requerimientos del proyecto*: Definir los requerimientos de un proyecto es indispensable, en esta categoría se establecen los objetivos y prioridades para fijar la estrategia de negocio, incluyendo las necesidades

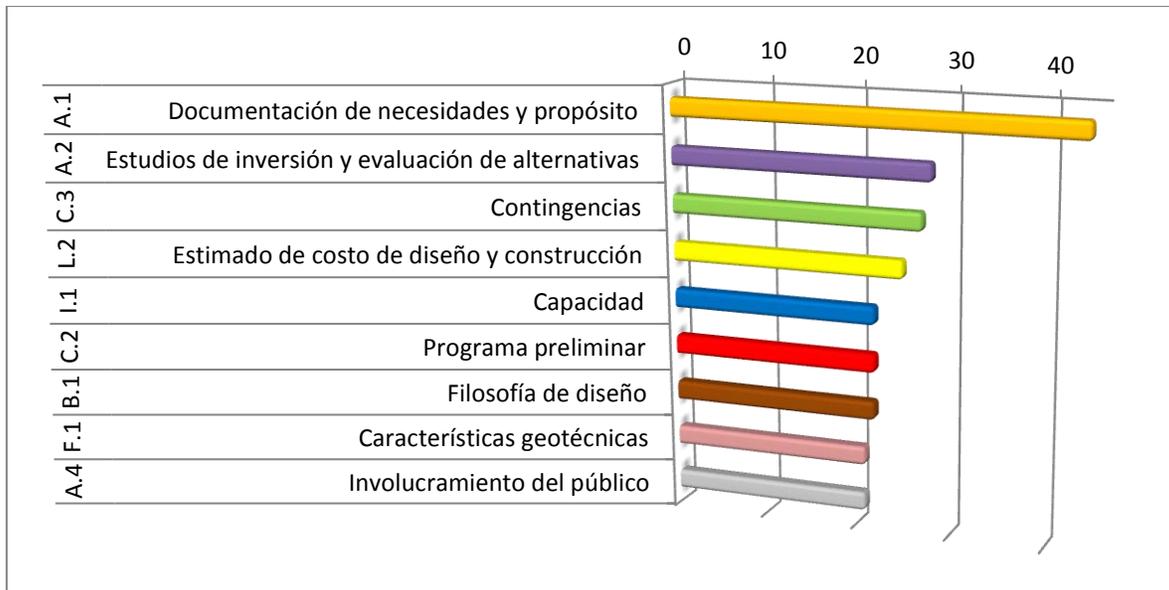
del proyecto y su propósito. Entre los requerimientos más importantes a definir se encuentran el origen y destino del ducto, el flujo a transportar, las posibles rutas, las condiciones ambientales y la evaluación del impacto ambiental así como el método a emplear para minimizarlo, la comparación de las características con las que cuenta el sitio versus a las requeridas, requerimientos de obra civil, servicios auxiliares, entre otros.

Si los requerimientos del proyecto no son bien establecidos desde un inicio, se corre el riesgo de que al término del mismo no se cumplan con los objetivos de negocio y con las expectativas del cliente, o bien que durante la ejecución tengan que realizarse cambios costosos para alinearse a los requerimientos de usuario que no se hubiesen considerado oportunamente.

- *F. Información del sitio:* La segunda categoría más importante para un proyecto de ductos es la definición de la información del sitio dada su naturaleza horizontal al ser un proyecto de infraestructura. En esta categoría deben investigarse las características geotécnicas del suelo, hidrológicas, permisos y derechos de vía requeridos, propietarios de los terrenos involucrados, problemas políticos-sociales asociados a dichos terrenos y otros factores básicos imprescindibles. Si esta categoría no está bien definida, se corre el riesgo de elevar los costos del proyecto debido a cambios mayores durante la ejecución ocasionados por no tomar en cuenta estos factores trascendentales durante el diseño y desarrollo del proyecto.
- *A. Estrategia de proyecto:* La tercera categoría más importante a definir en un proyecto de ductos es la estrategia del proyecto. En esta categoría es donde surge la identificación de una necesidad para la elaboración de un

caso de negocio. Es necesario realizar varios estudios que permitan evaluar y escoger la mejor alternativa de negocio. Estos estudios deben mostrar si el proyecto se justifica o no económicamente o si los impactos ambientales y sociales son tan grandes que no es viable. La temprana identificación de estos factores ayuda a prevenir gastos innecesarios en la fase de ingeniería preliminar, confirma la viabilidad del proyecto para proceder a la selección del mejor caso de negocio.

Por otra parte, existen ciertos elementos que individualmente poseen un peso importante y que por esa razón, su definición se vuelve un factor crítico para el éxito de un proyecto, esto quiere decir que al igual que en las categorías, no todos los elementos tienen la misma relevancia y dependen de la naturaleza del proyecto. Los elementos que pesan más que otros tienen una mayor importancia e impacto para el éxito de un proyecto. Esta característica del PDRI concede al equipo evaluador tener un amplio margen de flexibilidad a la hora de valorar cada uno de los elementos permitiendo calificar al proyecto de acuerdo a cada una de sus particularidades. En la siguiente gráfica se muestran los 10 elementos más importantes de los 68 que conforman el PDRI y cuya definición es indispensable para definir el alcance de un proyecto de infraestructura de acuerdo al PDRI:



**Figura 16** Gráfico de puntajes de las 10 categorías más importantes del PDRI de infraestructura (Construction Industry Institute, 2010).

La importancia de los factores mencionados en la gráfica anterior radica en las características que se presentan a continuación y que los hacen imprescindibles para un proyecto de gasoductos:

**A.1 Documentación y necesidades de propósito:** La necesidad de un proyecto debe ser identificada y determinada por las necesidades del mercado y futuros crecimientos. El propósito y el potencial de un proyecto deben ser documentados y demostrados. Esto servirá para identificar, comparar y seleccionar cuál de todas las alternativas de casos de negocio es la más rentable.

**A.2 Estudios de inversión y evaluación de alternativas:** Estos estudios demuestran si el proyecto es económicamente justificable, o si debido al alto

impacto ambiental y social no es viable. La determinación temprana de estos problemas previene gastos innecesarios.

**C.3 Contingencias:** Los riesgos del proyecto deben ser identificados y entendidos para poder asignar recursos que permitan mitigar problemas imprevistos. En este elemento se usan estimados de costo para planear y presupuestar un monto de capital adecuado para mitigar o minimizar cualquier evento inesperado que al presentarse pueda llevar al fracaso del proyecto.

**L.2 Estimado de costo de diseño y construcción:** Los estimados de costo del proyecto deben incluir toda la inversión necesaria para terminar un proyecto y así evitar sobrecostos por elementos que no se hayan tomado en cuenta durante la estimación.

**I.1 Capacidad:** Estos estudios proveen una descripción de los flujos de proceso relacionados y sus interacciones, permitiendo al equipo de planeación dimensionar el tamaño de las instalaciones adecuadas para la capacidad que se desea.

**C.2 Programa preliminar:** Un programa preliminar debe desarrollarse enfocándose en los factores de mayor riesgo. Tiene que actualizarse periódicamente durante el transcurso del proyecto y sirve para programar detalladamente las actividades de diseño y construcción.

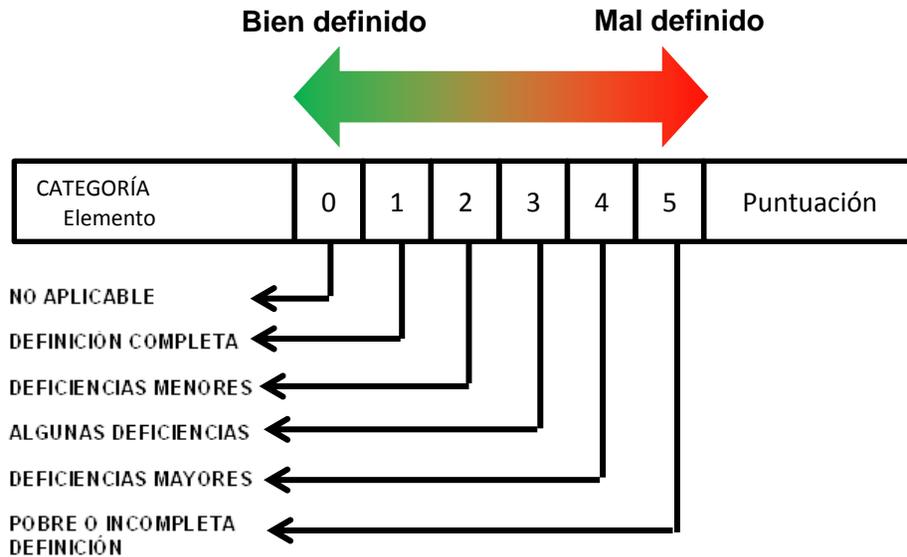
**B.1 Filosofía de diseño:** Una lista general de principios de diseño debe ser especificada para lograr que el proyecto cumpla con los requerimientos funcionales.

**F.1 Características geotécnicas:** Se refiere a los estudios de suelo y geotecnia de los terrenos en los que se pretende construir el proyecto. Deben considerarse todas las afectaciones geotécnicas que pudiesen alterar las instalaciones del proyecto.

**A.4 Involucramiento del público:** El nivel de involucramiento del público y la transparencia de las operaciones dependen de factores sociales, económicos y ambientales a los que se les añade el tipo y complejidad del proyecto. El involucramiento del público, su contribución y la interacción con él son componentes importantes de una planeación exitosa.

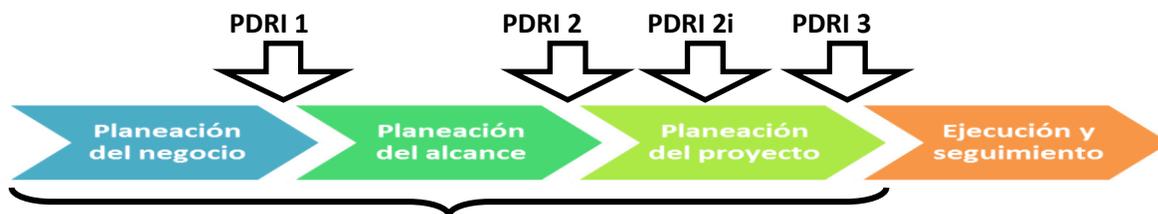
Cada uno de los 68 elementos debe ser calificado numéricamente del 0 al 5. Los elementos que se califican con el número 0 son aquellos que no aplican, el 1 se considera para los elementos cuyo alcance está totalmente definido y el 5 para los que están incompletos o pobremente definidos. Los elementos que están lo mejor definido posible deben recibir la calificación de 1. Los elementos que no están completamente definidos deben calificarse con 2, 3, 4 o 5 dependiendo del nivel de definición establecido por el equipo de proyecto. Una calificación de 2 indica deficiencias menores, 3 algunas deficiencias y 4 deficiencias mayores. Cada nivel de definición otorga una puntuación que tendrá que sumarse al final para todos y

cada uno de los elementos, y el resultado será el que determine el nivel de definición global del alcance del proyecto.



**Figura 17** Niveles de definición en el PDRI y sus ponderaciones (Construction Industry Institute, 2010).

El PDRI de infraestructura es tan versátil que puede ser escalado o modificado para cumplir con las necesidades de cualquier proyecto. Puede ser utilizado en etapas clave durante la planeación para asegurar una alineación continua y un enfoque constante sobre las prioridades del proyecto. El tamaño del proyecto, complejidad y duración determinan si el PDRI debe ser utilizado más de una vez como prueba de aceptación para pasar a través de cada una de las etapas del desarrollo de un proyecto.



**Figura 18** Empleo del PDRI durante el ciclo de vida de un proyecto (Construction Industry Institute, 2010).

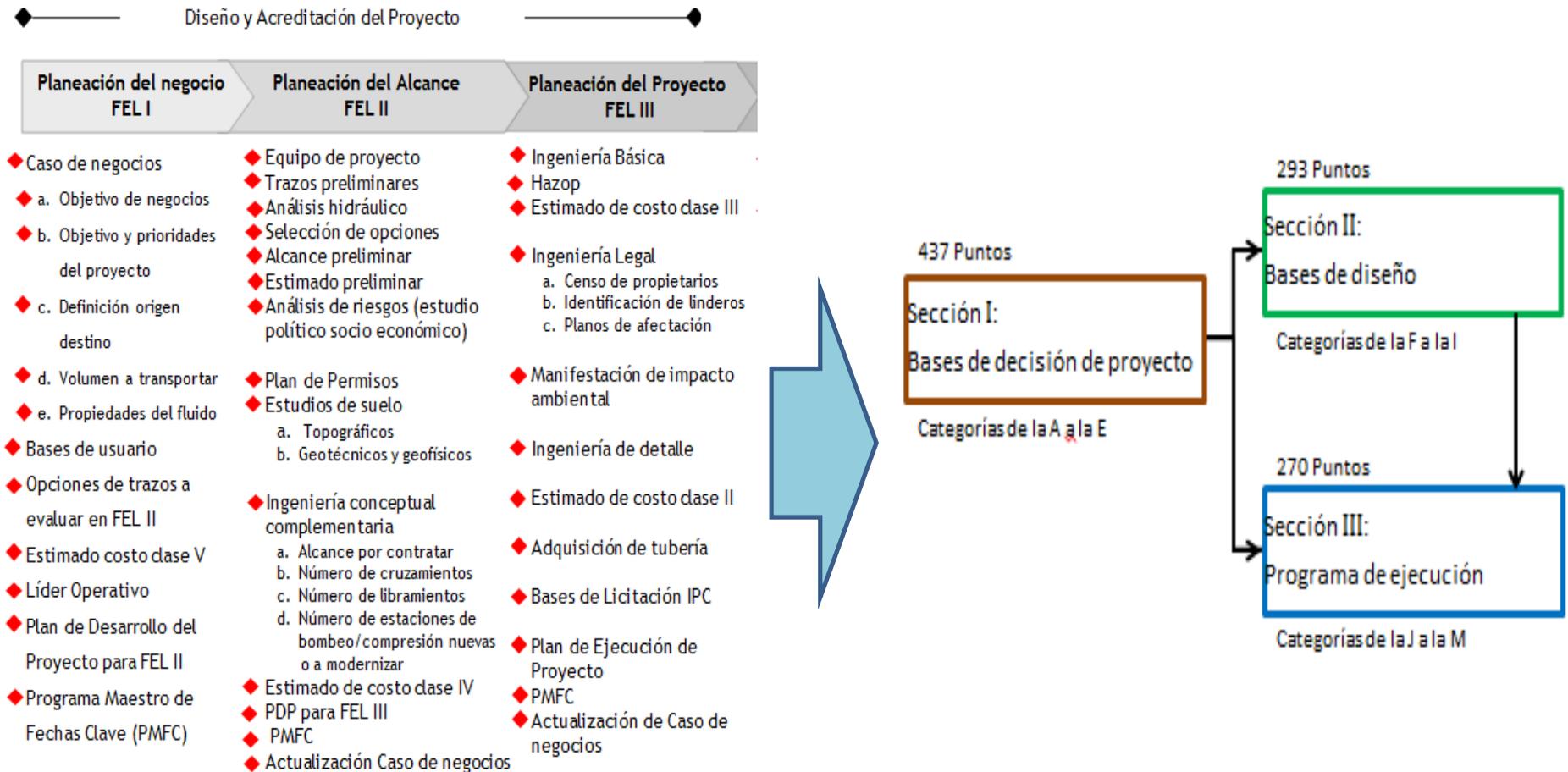
En la tabla 6 se detallan los diferentes periodos de evaluación y los puntajes esperados para continuar desarrollando el proyecto a través de cada una de las etapas de planeación.

**Tabla 6** Ponderación de cada una de las categorías del PDRI de infraestructura (Construction Industry Institute, 2010).

No. De revisión	Evaluación	Puntaje típico
<b>PDRI 1</b>	Evaluación de alto nivel para determinar la viabilidad del proyecto.	<b>550-800</b>
<b>PDRI 2</b>	Se lleva a cabo al finalizar el desarrollo conceptual del proyecto. La Sección I del PDRI debe estar bien definida.	<b>450-600</b>
<b>PDRI 2i</b>	Evaluación intermedia durante la afinación del alcance del proyecto (al fin de la ingeniería básica). La Sección II y la Sección III deben estar bien definidas.	<b>300-450</b>
<b>PDRI 3</b>	Evaluación final que determina si es adecuado o no pasar a la etapa de ejecución del proyecto (al fin de la ingeniería FEED).	<b>150-250</b>

La aplicación del PDRI está directamente relacionada con el ciclo de vida de un proyecto de ductos establecido por el FEL ya que desglosa, estructura y organiza mediante un diagrama de flujo lógico, las primeras etapas de planeación en las que se lleva a cabo la definición del alcance de un proyecto de ductos.

Cada sección del PDRI corresponde a cada una de las etapas del FEL, tal y como se muestra a continuación:



**Figura 19** Equivalencia de las etapas de planeación durante el ciclo de vida de un proyecto de ductos respecto a las secciones de desarrollo del PDRI para proyectos de infraestructura.

El PDRI fija el orden de las actividades requeridas para la definición del alcance, las pondera por categorías permitiendo una mejor visión y enfoque a las más importantes e incluso determina tareas que pueden llevarse a cabo simultáneamente.

Es así como una buena práctica de planeación de un proyecto como lo es la metodología FEL, puede ser complementada con una herramienta como el PDRI ya que éste reúne de manera ordenada y secuencial, las principales actividades requeridas para definir el alcance de un proyecto y disminuir los riesgos e incertidumbres acerca del cumplimiento de los objetivos de negocio en tiempo, costo y calidad. Como resultado del uso conjunto de estas mejores prácticas, al completar la planeación de un proyecto se obtiene lo siguiente

1. Entendimiento de objetivos y prioridades
2. Identificación de la solución óptima
3. Alcance de proyecto definido
4. Alineación de dueños y demás participantes
5. Identificación de riesgos
6. Estimados y programas realistas
7. Sólido caso de negocio
8. Un plan de proyecto efectivo y alcanzable

El uso del PDRI, garantiza el cumplimiento de cada uno de estos puntos a lo largo de la planeación y desarrollo del proyecto gracias al diagrama de flujo en el que se describen los elementos y la secuencia necesaria para definir un proyecto.

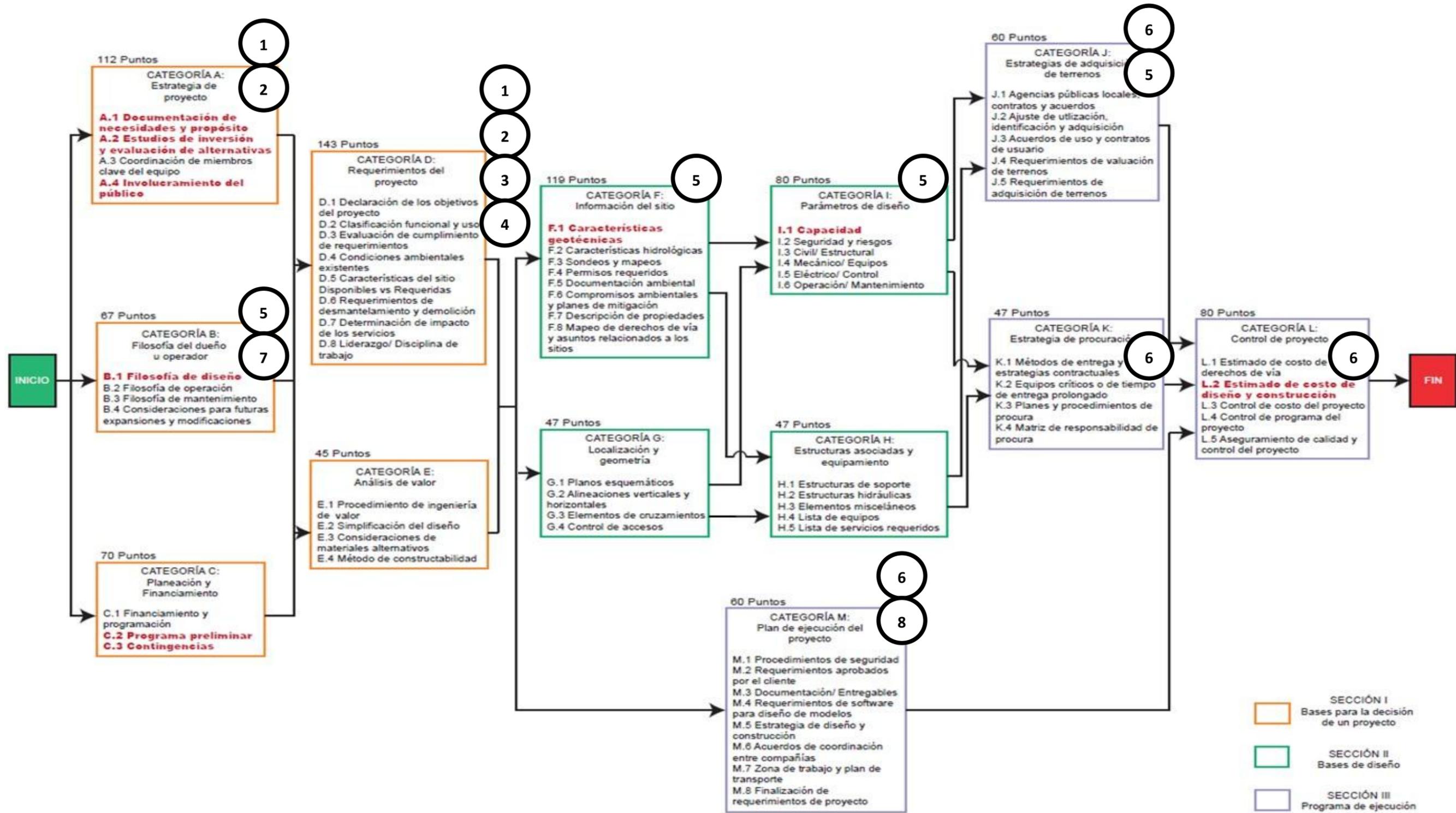


Figura 20 Diagrama del PDRI para proyectos de infraestructura.

### **3 Conclusiones**

El uso apropiado de la metodología FEL junto con el PDRI de infraestructura puede reducir significativamente el costo del diseño y la construcción de un proyecto. De acuerdo a investigaciones hechas por el CII, el nivel de definición del alcance está directamente relacionado con el costo final de un proyecto de infraestructura, si el nivel de definición aumenta, el costo final se reduce y viceversa. Otra ventaja del uso del PDRI de infraestructura es que contribuye enormemente a la preservación del programa del proyecto a través de la identificación temprana de posibles factores de riesgo que comúnmente afectan a los proyectos de ductos. El PDRI también puede ser utilizado para reducir riesgos durante la ejecución de un proyecto. La descripción detallada de cada uno de los elementos en una lista, permite a los miembros del equipo identificar específicamente lagunas de indefinición dentro del proyecto y desarrollar un plan de manejo de riesgos o de mitigación para aquellos que son inevitables.

La herramienta PDRI para proyectos de infraestructura, desarrollada por el CII es aplicable a proyectos de ductos. Su uso es trascendente ya que es una herramienta que además de medir el nivel de definición del alcance proporciona la secuencia para desarrollar cada una de las actividades necesarias para la planeación y definición del alcance de un proyecto de ductos.

Los proyectos de ductos presentan complejidades que los hacen distintos a otros tipos de proyectos, sobre todo por el hecho de que se componen de nodos que se distribuyen en forma horizontal a lo largo de grandes distancias.

El proceso de definición del alcance o FEL, al igual que para todo tipo de proyectos es el factor más crítico para lograr el éxito en un proyecto de ductos. Dicho proceso para un proyecto de ductos sigue una secuencia y está compuesto de diferentes elementos distintos a los de otro tipo de proyectos.

El PDRI de infraestructura establece a través de un mapa de ruta, una estructura ordenada y sucesiva de cada elemento crítico a ser desarrollado para lograr una buena definición del alcance de un proyecto de ductos. Le asigna un valor a cada uno dependiendo de su importancia y permite evaluarlos de acuerdo al nivel de definición en el que se encuentren, esto da como resultado un mayor enfoque en aquellos elementos que son más relevantes o que no se encuentran correctamente definidos, permitiendo al equipo de proyecto una mejor identificación de riesgos y factores que puedan afectar negativamente el resultado de un proyecto. Por lo anterior, el mapa de ruta planteado en el PDRI, viene a ser la espina dorsal del ciclo de vida de un proyecto de ductos y marca la pauta para una buena planeación del proyecto. La herramienta está diseñada para usarse por equipos de proyecto en cada una de las etapas del ciclo de vida de la planeación FEL. Cada evaluación puede ser usada para medir el nivel de definición que han logrado los equipos en cada fase del desarrollo del proyecto.

El objetivo de este trabajo fue presentar de manera accesible un panorama completo sobre proyectos de gasoductos. En él se compila a manera de ejemplo la descripción de en qué consiste un proyecto de gasoducto, cuáles son sus componentes principales y su ciclo de vida hasta concluir con las mejores

prácticas empleadas en la industria para mejorar el desempeño en términos de alcance, costo, programa y competitividad. Asimismo en el anexo 4 se muestran los resultados de aplicar los principales elementos de la lista de verificación del PDRI para un proyecto hipotético de un gasoducto desarrollado durante el Diplomado en Desarrollo de Proyectos de Ingeniería de la UNAM en 2014. Finalmente, al contar con una descripción de los principales aspectos involucrados en los proyectos de gasoductos así como una breve reseña de las ventajas que ofrece el uso de buenas prácticas para la definición del alcance, el propósito práctico de esta tesina consiste en que los profesionistas que se dedican al desarrollo de este tipo de proyectos puedan realizar de manera más eficiente su trabajo mejorando su desempeño en beneficio de sus empresas y finalmente para México.

#### 4 Apéndice caso de estudio

Proyecto: “AMPLIACIÓN DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE GAS, TRAMO SALINA CRUZ-MINATITLÁN”

Nota: Para este ejemplo sólo se tomaron en cuenta los 10 elementos (de 68 que suman el total) de más peso en el PDRI de infraestructura ya que representan el 25% de la puntuación total. Adicionalmente se tomó como base previa, la supuesta existencia de un derecho de vía que sería utilizado.

**Tabla 7** Lista de verificación de elementos más importantes del PDRI que definen el alcance de un proyecto

A1	<b>Documentación de necesidades y propósito</b> (Declaración de la misión que define los objetivos y prioridades del proyecto para cumplir con el propósito del negocio. Guías y requerimientos que gobernarán el diseño del proyecto, incluyendo nivel de detalle del diseño requerido, información climatológica, códigos y estándares, utilización de estándares de ingeniería).
1	Descripción del Proyecto
1	Bases de usuario
2	Índice de información técnica de ingeniería para licitar IPC
<p>El objetivo del proyecto se encuentra establecido en las bases de diseño, y ésta se compone de:</p> <p>Los estudios de sitio, el diseño y la construcción del gasoducto tramo Salina Cruz-Minatitlán dentro del DDV existente y los servicios auxiliares requeridos.</p> <p>Las bases de usuario como principio para el desarrollo de las bases de diseño, contendrán datos del sitio, que para nuestro proyecto, está considerado como el derecho de vía, más las estaciones de compresión, los datos del proceso que corresponden a las condiciones del gas al momento de la transferencia de custodia (flujo, composición, presión, temperatura), y la manera en que se transportará, temas de seguridad que tienen que ver con los equipos y sistemas críticos del proceso, así como las áreas en donde se encuentran localizadas, posibles situaciones de contingencia como fugas o fluctuaciones importantes de presión, salud y protección ambiental e información técnica de las siguientes disciplinas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Instalaciones eléctricas</li> <li>• Mecánica</li> <li>• Instrumentación y Control</li> <li>• Sistema de telecomunicaciones</li> <li>• Tuberías y Ductos</li> <li>• Sistemas de control de corrosión en ductos</li> <li>• Civil, Geotecnia y Arquitectura</li> <li>• Facilidades para la operación y mantenimiento</li> <li>• Normativa técnica aplicable</li> <li>• Todo ello debe ser aprobado por el patrocinador y el líder operativo.</li> </ul>	

**Tabla 8** Lista de verificación de elementos más importantes del PDRI que definen el alcance de un proyecto (Continuación)

<b>A4</b>	<b>Involucramiento del público</b> (cultura local, relación con la comunidad, relaciones laborales, relaciones con el gobierno, educación y capacitación, consideraciones de seguridad y salud.)
1	Análisis de la cultura local y la relación con la comunidad (CN)
2	Análisis de la relación con el Gobierno (CN)
3	Factibilidad legal, regulatoria y normativa (CN)
4	Consideraciones de seguridad y salud. (CN)
5	Impactos ambientales previsibles (CN)

Los impactos sociales identificados en el proyecto son básicamente durante la etapa de construcción y operación del gasoducto, siendo principalmente la generación de empleos y el crecimiento económico de la región por la ejecución de las obras.

Cabe señalar que en el objetivo 10 del Plan de Negocios de Pemex y sus OS, se establece como estrategia el mejorar el desempeño ambiental, la sustentabilidad del negocio y la relación con comunidades, por lo que se requiere ampliar la evaluación del impacto ambiental de los proyectos, incluyendo el impacto social vinculándolos con el proceso FEL.

En tal caso se requiere delimitar el área de influencia del proyecto y realizar un diagnóstico orientado al desarrollo planificado y sostenible de las localidades aledañas al gasoducto, buscando su crecimiento económico con inclusión social y la conservación del medio ambiente, con la participación de todos los actores que intervienen, es decir, gobiernos locales, estatales, federales, así como empresas privadas y sindicatos, organizaciones no gubernamentales, empresas paraestatales y la población local, para que Pemex siendo copartícipe, pueda colaborar junto con la sociedad mediante la instrumentación de proyectos que busquen la mejora de la calidad de vida de las personas y el respeto al medio ambiente. El reto para el proyecto será plantear acciones que promuevan una relación responsable entre Pemex y la población, y que a su vez, preparen a los habitantes para el aprovechamiento de las oportunidades de desarrollo con beneficio mutuo.

Por ejemplo:

- Pemex a través de ONG's promueva la implantación, desarrollo y seguimiento del programa educativo INEA y disminuir el índice de analfabetismo entre la población adulta que habita el área de influencia del gasoducto.
- Impulsar el desarrollo de programas de protección civil con las autoridades y líderes locales y establecer una red de colaboradores y que permitan a la población estar preparada en caso de eventuales contingencias.
- Promover entre la población la construcción ecológica (capacitación para la elaboración de adobes, construcción de estufas ahorradoras de leña, baños secos, conservación de alimentos sin necesidad de energía eléctrica, captación de agua pluvial, manejo de residuos sólidos, abono orgánico, composta, etc., etc.)
- Diseño de redes municipales de ciclovías y senderos en las localidades cercanas al gasoducto.
- Implementar un programa de vivienda temporal para trabajadores de la construcción del gasoducto.
- Incorporar a las obras del gasoducto a trabajadores locales que no requieran estar calificados.
- Promover el intercambio comercial que vinculen a Pemex con proveedores locales y regionales en el contexto de la construcción y mantenimiento de la infraestructura del gasoducto.
- Informar a los gobiernos locales y estatales, sindicatos, instituciones de salud y cámara de la industria de la construcción, entre otras, sobre el proyecto y su programa de trabajo, para que estos se preparen en cuanto a agilidad en la gestión de permisos, disponibilidad de recursos humanos, disponibilidad de recursos para la atención a la salud, vivienda, requerimientos de seguridad, de transporte público, etc., y en general, todo lo necesario para que el proyecto se ejecute en tiempo y forma.

**Tabla 9** Lista de verificación de elementos más importantes del PDRI que definen el alcance de un proyecto (Continuación)

<b>B1</b>	<b>Filosofía de diseño</b> (Lista de principios generales de diseño a ser considerados para lograr un comportamiento confiable en la operación de la unidad incluye requerimientos en cuanto a equipos de relevo, redundancia en sistemas de seguridad, control y alarma, tanques de almacenamiento de productos intermedios y finales). <b>(BU)</b>
1	Descripción de principios de confiabilidad
2	Criterios para equipo de relevo
3	Criterios de redundancias de sistemas de seguridad
4	Definición de filosofías de alarmas
5	Criterios de integridad de componentes mecánicos y estructurales (metalurgia, sellos, tipos de acoplamiento, selección de rodamientos)
6	Identificación de equipos críticos y medidas a tomar para evitar daños en casos de sabotaje o desastres naturales
7	Principios generales de diseño a ser considerados para lograr los periodos esperados de operación de la unidad
8	Definición de filosofías de almacenamiento intermedio para paro parcial de secciones del proceso
9	Impacto potencial a instalaciones existentes (R)
<p>El transporte de gas natural Salina Cruz – Minatitlán requiere equipo de relevo en las estaciones de compresión a fin de que, en caso de falla de uno de ellos, se cuente con un respaldo para no interrumpir su operación y que pueda ocasionar el paro de todo el proceso de transporte de gas natural. El turbo compresor requiere de un equipo de relevo que entre en operación en caso de que el primero presente alguna falla, asimismo los equipos deben contar con la instrumentación SIL 4 requerida en base a la normas aplicables que se indican en las Bases de Diseño del proyecto y adicionalmente se tendrá un sistema de paro por emergencia basado en un controlador lógico programable (PLC), con señales de proceso independientes al sistema digital de control y monitoreo (SDMC), el cual debe considerar todas las secuencias automáticas de paro por situaciones de emergencia que se consideren necesarias para la seguridad del personal y de las instalaciones; el nivel seguridad dependerá de la clasificación de área peligrosas y del análisis HAZOP que se realizará al tener los DTI's aprobados para construcción de la ingeniería de detalle.</p> <p>En caso de desastres naturales en las estaciones de compresión se tiene un diseño de construcción para soportar eventualidades, por ejemplo: inundaciones y sismos. Alrededor de la estación se dejará un área despejada ya que en caso de fuego o explosión se evitará el daño a los alrededores y a lo largo de los 250 km del gasoducto podrían existir tomas clandestinas que podrán ser detectadas por el sistema SCADA, adicionalmente se contará con señalamientos a lo largo de la trayectoria del gasoducto para evitar daños a éste por construcciones ajenas.</p> <p>El gasoducto y los equipos principales de las estaciones de compresión están diseñados con un 10% de sobrediseño en flujo y de presión a 1,200 psi como MAOP.</p> <p>No se dispondrán de esferas de almacenamiento en las estaciones de compresión así que si llegará haber una eventualidad en los equipos principales, el gas natural irá directamente al quemador.</p>	

**Tabla 10** Lista de verificación de elementos más importantes del PDRI que definen el alcance de un proyecto (Continuación)

<b>C2</b>	<b>Programa preliminar de proyecto</b> (Un programa preliminar debe desarrollarse enfocándose en los factores de mayor riesgo. Tiene que actualizarse periódicamente durante el transcurso del proyecto y sirve para programar detalladamente las actividades de diseño y construcción.)
1	Hitos más importantes
2	Eventos atípicos
3	Tiempo de respaldo
4	Tiempos de entrega y plan de procura
5	Tiempos de entrega de documentos de ingeniería y diseño
6	Tiempos de construcción
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para la elaboración del programa preliminar del proyecto del gasoducto, se dividió el desarrollo del mismo en cada una de sus etapas y éstas a su vez fueron divididas en tareas a realizar por cada una de las disciplinas involucradas.</li> <li>• Estudios de pre-inversión (ingeniería conceptual)</li> <li>• Estudio de mercado</li> <li>• Estudios de localización</li> <li>• Ingeniería conceptual</li> <li>• Estimado de inversión y programación</li> <li>• Costo de operación</li> <li>• Estudio financiero</li> <li>• Evaluación económica y financiera</li> <li>• Evaluación social</li> <li>• Manifiesto de impacto ambiental</li> <li>• Análisis de riesgo</li> <li>• Ingeniería básica</li> <li>• Proceso</li> <li>• Ing. De Seguridad y Protección Ambiental</li> <li>• Ingeniería Eléctrica</li> <li>• Ingeniería Mecánica</li> <li>• Ingeniería de instrumentación y control</li> <li>• Ingeniería de Planificación</li> <li>• Ingeniería básica extendida</li> <li>• Proceso</li> <li>• Ing. De Seguridad y Protección Ambiental</li> <li>• Ingeniería Eléctrica</li> <li>• Ingeniería Mecánica</li> <li>• Ingeniería de instrumentación y control</li> <li>• Telecomunicaciones</li> <li>• Tubería y corrosión</li> <li>• Civil y estructural</li> <li>• Arquitectura</li> <li>• Ingeniería de detalle</li> <li>• Proceso</li> <li>• Ing. De Seguridad y Protección Ambiental</li> <li>• Ingeniería Eléctrica</li> <li>• Ingeniería Mecánica</li> </ul>	

**Tabla 11** Lista de verificación de elementos más importantes del PDRI que definen el alcance de un proyecto (Continuación)

<b>C2</b>	<b>Programa preliminar de proyecto</b> (Un programa preliminar debe desarrollarse enfocándose en los factores de mayor riesgo. Tiene que actualizarse periódicamente durante el transcurso del proyecto y sirve para programar detalladamente las actividades de diseño y construcción.)
1	Hitos más importantes
2	Eventos atípicos
3	Tiempo de respaldo
4	Tiempos de entrega y plan de procura
5	Tiempos de entrega de documentos de ingeniería y diseño
6	Tiempos de construcción
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ingeniería de instrumentación y control</li> <li>• Telecomunicaciones</li> <li>• Tubería y corrosión</li> <li>• Civil y estructural</li> <li>• Arquitectura</li> <li>• Procuración</li> <li>• Administración</li> <li>• Adquisición</li> <li>• Expeditación</li> <li>• Inspección</li> <li>• Tráfico</li> <li>• Construcción</li> <li>• Obra civil</li> <li>• Obra eléctrica</li> <li>• Instalación de equipos mecánicos</li> <li>• Instalación de tuberías</li> <li>• Instalación de equipos eléctricos</li> <li>• Instalación de instrumentos</li> <li>• Arranque</li> <li>• Planeación del arranque</li> <li>• Organización del arranque</li> <li>• Pruebas de equipo y tuberías</li> <li>• Calibración de instrumentos</li> <li>• Pruebas finales</li> <li>• Arranque</li> <li>• Pruebas de desempeño</li> </ul> <p>Fueron identificados como hitos las fechas de inicio y término de las actividades más importantes, como por ejemplo fecha de elaboración de órdenes de compra de equipos compresores, turbinas, patines de medición, patines de regulación, estaciones de análisis; fechas de entrega en sitio de equipos principales, fecha de término de instalaciones mecánicas (línea principal de transporte), entre otros. El tiempo estimado de duración de éste proyecto, desde el inicio hasta la puesta en marcha, es de 960 días.</p>	

**Tabla 12** Lista de verificación de elementos más importantes del PDRI que definen el alcance de un proyecto (Continuación)

<b>C3</b>	<p><b>Contingencias</b> (Los riesgos del proyecto deben ser identificados y entendidos para poder asignar recursos que permitan mitigar problemas imprevistos. En éste elemento se usan estimados de costo para planear y presupuestar un monto de capital adecuado para mitigar o minimizar cualquier evento inesperado que al presentarse pueda llevar al fracaso del proyecto.)</p>
<p>La estimación de contingencias se incluye para cubrir los costos por desviaciones en el alcance del proyecto, para el caso de ejemplo, el nivel del estimado de costos está clasificado dentro de la Clase IV (Precisión +/- 30%) con una contingencia determinada del 15-20% Dicha contingencia cubre la incertidumbre y la variabilidad en la estimación de los costos.</p> <p>El % de costo destinado para contingencias tendrá que ser establecido de acuerdo a la clase del estimado de costos que se tenga y al resultado del análisis de riesgos realizado. Sin embargo, el % de contingencias deberá ser capaz de cubrir los siguientes eventos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Desastres naturales.</li> <li>• Cambios de alcance.</li> <li>• Condiciones de sitio no identificadas.</li> <li>• Retrasos potenciales.</li> <li>• Impactos en la ruta crítica.</li> <li>• Cambios en las condiciones del mercado.</li> <li>• Cambios en el tipo de canje de moneda.</li> <li>• Estrategias de contratación.</li> <li>• Disponibilidad de mano de obra.</li> <li>• Estabilidad política.</li> <li>• Indefiniciones del proyecto.</li> <li>• Malas prácticas de construcción</li> <li>• Errores de ingeniería</li> </ul> <p>Considerando lo anterior, se contempla un porcentaje para Contingencias del 33.12 % del costo total estimado del proyecto.</p>	
<b>C6</b>	<p><b>Programa de proyecto</b> (Desarrollador, analizar y conciliar por el equipo de proyecto el programa de eventos del proyecto acorde al WBS. Debe involucrar información de operación, ingeniería y construcción.)</p>
<p>Inicialmente se contemplaba mover al compresor utilizando vapor generado en las estaciones de compresión, pero se hizo una reevaluación del sistema y se optó por utilizar el mismo gas a transportar para mover al compresor, esto con la finalidad de reducir costos por generación de vapor. Por lo tanto, tienen que incluirse nuevos aspectos de seguridad, diseño, construcción, materiales y condiciones de operación. Al hacer un rediseño para utilizar otro tipo de compresor, el WBS sufrirá cambios significativos que tendrán que ver particularmente con el tiempo de entrega de equipos críticos (compresores) y el reajuste de los tiempos de procura y construcción. Por lo que debemos considerar que ninguna actividad o grupo de actividades para generar un solo entregable, debe durar más de 80 horas.</p>	

**Tabla 13** Lista de verificación de elementos más importantes del PDRI que definen el alcance de un proyecto (Continuación)

F1	<b>Características geotécnicas</b> (Realizar levantamientos y pruebas en el sitio incluyendo topografía, arreglo general de la planta, descripción general del sitio (por ejemplo terreno, estructuras existentes, remediación de suelo contaminado, área de desechos peligrosos), definición de niveles, sismicidad, espejos de agua, conductividad, percolación, corrientes de agua subterráneas, uso de agua corriente, tratamiento y saneamiento de suelo, tipos de cimentación, capacidad de carga).
1	Estudio de mecánica de suelos definitivo
2	Estudio geofísico de propiedades elásticas del suelo (velocidad de onda de corte y módulo de rigidez al corte)
3	Estudio de caracterización de contaminantes presentes en el subsuelo
4	Planos y memoria de cálculo de restauración de suelos por contaminación
5	Planos geotécnicos de preparación del sitio
6	Planos de mejoramiento masivo de suelos
7	Planos de protección de taludes
8	Planos y memoria de cálculo de secciones estructurales de pavimentos
9	Especificación particular de variables ambientales para diseño de estructuras (Sismo y viento)
10	Estudio de resistividad eléctrica
11	Levantamientos topográficos
Lo mencionado a continuación será aplicable a la estación de compresión:	
<p>Se realizará un estudio de mecánica de suelos, estudio geofísico de propiedades elásticas del suelo y en su caso, un estudio de caracterización de contaminantes en el subsuelo (si los hubiera); esto con el fin de identificar la formación geológica superficial, las características sismológicas generales de la zona, encontrar zonas inestables, zonas de relleno o susceptibles a inundaciones. Se reportará en caso de existencia, la profundidad del nivel de agua freática y se caracterizará la estratigrafía del suelo. Realización de la batimetría del canal y análisis de estabilidad de los taludes que se puedan encontrar, plantear sus pendientes, longitudes, direcciones de flujo, ancho, profundidades, etc.</p>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• El estudio de resistividad se hará con el objeto de ver las propiedades eléctricas del suelo, con ello se determinará el tipo de protección que requiere el ducto y los equipos en las estaciones de compresión, es decir su protección mecánica de corrosión con base en la NRF-030-PEMEX-2009.</li> <li>• En cuanto al levantamiento topográfico se realizarán todas las actividades necesarias para el levantamiento, ubicación de la línea y estaciones, construcción de zanjas, cruces especiales, esto tomando en cuenta los puntos de la red nacional geodésica (INEGI) cercanos a la traza.</li> <li>• De todos los estudios realizados se entregaran las hojas de cálculo y resultados de las muestras.</li> <li>• Para la línea regular se realizarán recorrido del trazo, estudios topográficos (existentes), estudios geofísicos y de materiales. Para el caso de los cruzamientos será indispensable realizar una mecánica de suelos para determinar la profundidad real requerida para hacer la perforación direccionada.</li> <li>• Además, se deberán hacer estudios para determinar posibles afectaciones a especies de flora o fauna, en peligro de extinción o protegidas.</li> <li>• Asimismo se deberán identificar posibles afectaciones por la obtención de derechos de paso, en caso de que el DDV haya sido invadido, o situaciones sociales o políticas que prevean requerimientos de apoyos a las comunidades como escuelas o puentes.</li> </ul>	

**Tabla 14** Lista de verificación de elementos más importantes del PDRI que definen el alcance de un proyecto (Continuación)

<b>12</b>	<b>Capacidades</b> (capacidad de diseño de salida de los productos con especificaciones, generalmente se indica como factor en línea, conversión o flujo de diseño) (BU)
1	Flujo de alimentación de materias primas y/o capacidad de la instalación
2	Flujo requerido de salida de productos
3	Rendimientos mínimos requeridos de productos
4	Capacidades nominal, mínima y máxima
5	Capacidad de almacenamiento por tipo de producto
6	Capacidad de carga y descarga de productos
7	Capacidad de flujo de ductos
8	Trayectoria de ductos
9	Capacidad de las estaciones de bombeo y recompresión
10	Capacidad de la instalación de infraestructura
11	Factor de servicio
12	Descripción de consideraciones para futuras expansiones (BU)
13	Consideraciones de diseño para prever expansiones de la instalación (BU)
14	Estimado de vida útil de la instalación
15	Disposición de materiales peligrosos al final del ciclo
16	Posibles usos futuros
17	Consideraciones de sustentabilidad ambiental
<p>El flujo inicial de diseño fue 200 MMCFSD, sin embargo se tendrá que reajustar para satisfacer el consumo de gas que se tendrá en las estaciones de compresión, y las características del producto ya son mencionadas en las Bases de diseño. Dado que el sistema sólo es de transporte el flujo alimentado es el mismo al flujo de salida. La trayectoria del ducto ya fue establecida, e irá paralela a un ducto existente usando el derecho de vía existente. Es necesario realizar un análisis más detallado de la capacidad de las estaciones de compresión, por lo que se elaborará la ingeniería correspondiente. La infraestructura instalada tendrá la capacidad de cumplir con los requerimientos del proceso, por lo que presentarán los detalles y planos correspondientes. El factor de servicio será de 0.95</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• No se contemplan ampliaciones futuras del gasoducto, pero sí la posibilidad de que éste sea reversible, es decir, que si en el futuro aumentara la capacidad de producción de gas natural en México, se pueda distribuir éste en forma óptima de Minatitlán a Salina Cruz y poder satisfacer las demandas de la industria y la población en general.</li> <li>• La vida útil del gasoducto está estimada en 20 años, operando al 85%, sin embargo la vida útil del Sistema Integral de Ductos (SID) contempla durante su etapa operativa un estimado de 25 años. Para la etapa constructiva se considera una duración estimada de 2 años 6 meses de acuerdo con la programación de DUCMEX.</li> <li>• Así también no se contempla la clausura, abandono o desmantelamiento de las instalaciones, por lo tanto tampoco no se tiene estimación del costo por el desmantelamiento y disposición.</li> <li>• No se contemplan ampliaciones futuras del gasoducto, pero se contemplaría si se requiere la rehabilitación y modernización de las estaciones de compresión.</li> <li>• La sustentabilidad ambiental se incluye en el proyecto como principio rector para la conservación del ambiente, ya que las principales ventajas de éste proyecto son: a) la reducción de costos y riesgos al no transportar gas en pipas; y, b) las obras a realizar no implicarán incremento alguno en el nivel de impacto y riesgo ambiental que existe actualmente en las áreas de influencia del trazo en virtud de su ubicación, ya que se utilizará el derecho de vía existente.</li> </ul>	

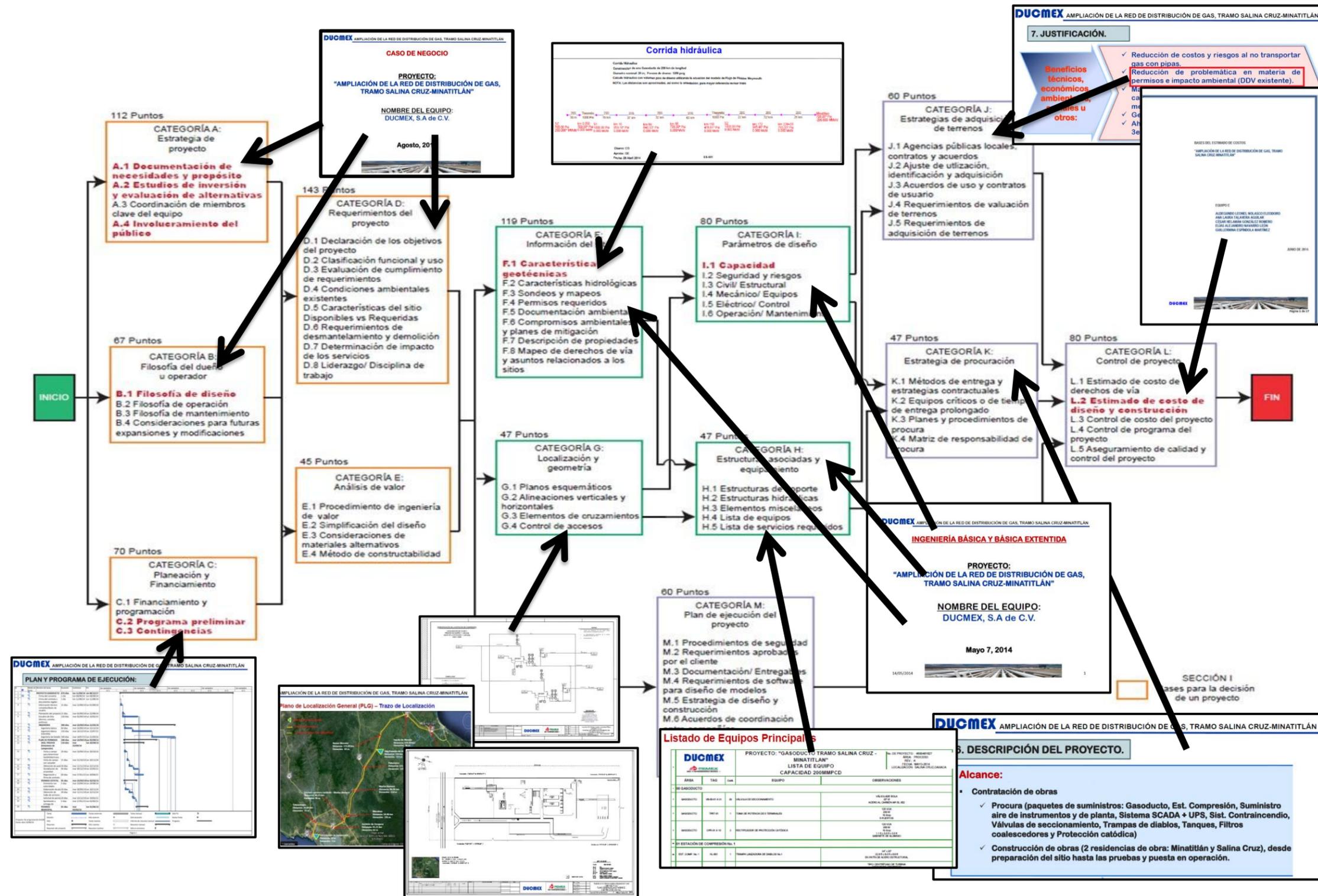


Figura 1 Diagrama del PDR para proyecto hipotético y el cumplimiento del mismo respecto a la información generada.

## 5 Bibliografía

- Construction Industry Institute. (December de 1994). *Beginning Project the right way.* . (B. o. Austin., Ed.) *Pre-Project Planning*.
- Construction Industry Institute. (2008). *Optimizing Construction Input in Front End Planning* (Vols. Research summary 241-1). Austin, Texas, USA.
- Construction Industry Institute. (2010). *Project Definition Ratin Index, Infrastructure projects*. Austin, Texas: CII.
- Construction Industry Institute. (2011). *Development of the Project Definition Rating Index (PDRI) for infrastructure projects*. Austin, Texas: CII.
- Independent Project Analysis, Inc. (Septiembre de 2009). *In search of excellence in pipeline projects*. San Francisco, Ca, USA.
- Inspection Inteligence NDT Global. (2015). *Special-Purpose and Multi-Technology Tools* . Recuperado el 01 de Septiembre de 2015, de NDT Global: <http://www.ndt-global.com/solutions/tools/multi-tech-specialized-tools.html>
- Kennedy, J. L. (1993). *Oil and gas pipeline fundamentals*. Tulsa, Oklahoma: Penn Well.
- López, O. J. (2002). *Legalización de derecho de vía y obtención de permisos para la construcción del gasoducto de 36"ø x 68.7 Km Dos Bocas - Cactus*. Cholula, Puebla, México: Universidad de las Américas Puebla.
- Modificada de Bingham, E., Gibson Jr., G. E., & Stogner, R. (2011). *Development of the Project Definition Ratin Index (PDRI) for infrastructure project*. Austin: CII.
- Secretaría de Energía. (1995). *Reglamento de gas natural*. México, D.F.: Diario Oficial de la Federación.
- Secretaría de Energía. (2011). *NORMA Oficial Mexicana NOM-007-SECRE-2010, Transporte de gas natural*. México, D.F.: Diario Oficial.
- Secretaría de Energía. (2013). *Prospectiva de Gas Natural y Gas L.P. 2013 - 2027*. México, D.F.

Secretaría de Energía. (2014). *Procesamiento, almacenamiento y transporte de gas*. Obtenido de <http://sener.gob.mx/portal/Default.aspx?id=1510>

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2010). *GUÍA PARA LA PRESENTACIÓN DEL ESTUDIO DEL RIESGO MODALIDAD DUCTOS TERRESTRES*. México, D.F.: SEMARNAT.

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (12 de Enero de 2015). *Impacto Ambiental y Tipos*. Recuperado el 12 de Enero de Enero de 2015, de Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales: <http://www.semarnat.gob.mx/temas/gestion-ambiental/impacto-ambiental-y-tipos/definicion-y-objetivo>