



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA QUÍMICA  
INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN DE PROYECTOS

ANÁLISIS DE TÉCNICAS PARA LA ESTIMACIÓN DE COSTOS DE PLANTAS DE  
PROCESO PARA PROYECTOS IPC

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
**CAMILA ALEJANDRA LIZARAZO CASTELLANOS**

DIRECTOR DE TESIS  
**M. EN I. JOSÉ ANTONIO ORTIZ RAMÍREZ**  
Facultad de Química

**CIUDAD DE MÉXICO – MAYO, 2022**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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: MBA. Elisa Elvira Guinea Corres

Secretario: Dr. Modesto Javier Cruz Gómez

1 er. Vocal: M. en I. José Antonio Ortiz Ramírez

2 do. Vocal: M. I. Ezequiel Millán Velasco

3 er. Vocal: M. en I. Fabiola Rodiles Amaro

Lugar donde se realizó la tesis: Facultad de Ingeniería UNAM

**TUTOR DE TESIS:**

M. EN I. JOSÉ ANTONIO ORTIZ RAMÍREZ

-----  
**FIRMA**

(Segunda hoja)

## TABLA DE CONTENIDO

OBJETIVOS.....	8
OBJETIVO GENERAL.....	8
OBJETIVOS PARTICULARES .....	8
HIPÓTESIS.....	8
INTRODUCCIÓN.....	12
1. MARCO TEÓRICO .....	13
1.1. ESTIMACIÓN DE COSTOS.....	13
1.1.1. Buenas prácticas para la Estimación del Costo .....	14
1.1.2. ¿Por qué fallan las estimaciones? .....	15
1.2. METODOLOGÍA FRONT END LOADING .....	16
1.2.1. Etapas FEL.....	18
1.2.2. Actividades y Entregables de FEL .....	21
1.2.3. Beneficios de FEL .....	25
1.3. ESTRUCTURA DE DESGLOSE DEL TRABAJO .....	26
1.4. PROJECT DEFINITION RATING INDEX (PDRI) .....	29
1.5. CATEGORÍAS DE COSTOS.....	35
1.5.1. Costos directos.....	35
1.5.2. Sobrecosto .....	36
1.6. ÍNDICE DE COSTOS.....	38
1.7. ESCALACIÓN.....	39
1.8. CLASIFICACIÓN ESTIMADO DE COSTOS .....	41
1.8.1. Clase V: Fase Conceptual: Orden de Magnitud .....	41
1.8.2. Clase IV: Fase de Análisis: Estimado Conceptual - Preliminar .....	42
1.8.3. Clase III: Fase de Definición: Costo de Presupuesto .....	43
1.8.4. Clase II: Fase de Ejecución: Costo de Control.....	44
1.8.5. Clase I: Costo Definitivo .....	44
1.9. CONTINGENCIA.....	49
1.9.1. Métodos determinísticos.....	51
1.9.2. Métodos Probabilísticos.....	53
1.9.3. Métodos matemáticos modernos .....	56
1.10. ANÁLISIS DE RIESGOS.....	58
2. TÉCNICAS DE ESTIMACIÓN.....	61

2.1.	ESTIMACIÓN ANÁLOGA.....	61
2.2.	ESTIMACIÓN PARAMÉTRICA .....	62
2.3.	MÉTODO DE ESTIMACIÓN POR ESCALACIÓN DE CAPACIDAD .....	64
2.4.	ESTIMACIÓN POR FACTORES.....	67
2.4.1.	Factores de Lang.....	67
2.4.2.	Método de Hand .....	70
2.4.3.	Método de Wroth .....	71
2.4.4.	Método de Chilton .....	72
2.4.5.	Método Peters-Timmerhaus .....	74
2.4.6.	Método de Holland .....	76
2.5.	ESTIMACIÓN ASCENDENTE: BOTTOM UP.....	78
2.6.	ESTIMACIÓN POR ANÁLISIS DE REGRESIÓN .....	79
2.6.1.	Regresión de Mínimos Cuadrados.....	81
2.6.2.	Regresión por Cuantiles .....	82
2.6.3.	Modelos de regresión utilizando datos transformados .....	82
2.7.	INTELIGENCIA ARTIFICIAL .....	83
2.7.1.	Modelo de red neuronal artificial (ANN) .....	83
2.7.2.	Razonamiento basado en casos (CBR).....	90
2.7.3.	Modelo de Lógica Difusa (FL).....	94
2.7.4.	Algoritmo Genético (GA).....	96
2.7.5.	Máquina de Soporte Vectorial (SVM).....	97
2.7.6.	Modelos híbridos .....	99
2.8.	SOFTWARE DE ESTIMACIÓN DE COSTOS .....	102
2.9.	PREPROCESAMIENTO DE DATOS .....	103
3.	CLASIFICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE ESTIMACIÓN DE COSTOS .....	105
4.	FACTORES QUE INCIDEN EN LA ESTIMACIÓN DEL COSTO.....	109
4.1.	Complejidad del proyecto.....	109
4.2.	Requerimientos tecnológicos .....	110
4.3.	Información del proyecto .....	110
4.4.	Alcance del proyecto.....	110
4.5.	Confiabledad de los datos históricos .....	112
4.6.	Duración y ubicación del proyecto.....	113
4.7.	Nivel de experiencia del estimador.....	113
4.8.	Método de Estimación.....	114

4.9.	Contingencias .....	114
4.10.	Inadecuada planeación.....	115
4.11.	Falta de Escalación de los datos.....	115
4.12.	Factores Económicos .....	116
4.13.	Riesgos del proyecto .....	116
4.14.	Selección de proveedores.....	117
5.	CONTROL DEL COSTO .....	121
5.1.	GESTIÓN DEL VALOR GANADO.....	122
5.2.	CURVA “S”.....	125
5.3.	SOFTWARE PARA EL CONTROL DEL COSTO .....	126
6.	CASO DE ESTUDIO.....	127
6.1.	Estimación Análoga .....	127
6.2.	Estimación por factores de Lang .....	132
6.3.	Estimación por Aspen Capital Cost Estimator .....	134
6.4.	Comparación Estimados vs Costo real del proyecto .....	136
7.	CONCLUSIONES .....	138
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	141

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Influencia y gastos a través del ciclo de vida de un proyecto .....	17
Figura 2. Metodología FRONT END LOADING .....	20
Figura 3. Diagrama WBS .....	27
Figura 4. Secciones, categorías y elementos del PDRI para proyectos Industriales. .....	31
Figura 5. Correlación fases FEL y clases de estimado de costo. ....	45
Figura 6. Variabilidad en los rangos de precisión para estimaciones de costos en la industria de procesos. ....	48
Figura 7. Distribución de los costos durante el proyecto .....	50
Figura 8. Red Perceptrón Multicapa (MLP) .....	86
Figura 9. Modelo CBR.....	93
Figura 10. Modelo de Lógica Difusa .....	96
Figura 11. Arquitectura del Modelo de Red Neuronal Híbrida Difusa Evolutiva ..	101
Figura 12. Modelo de costo paramétrico basado en preprocesamiento de datos	104
Figura 13. Técnicas de Estimación para cada Clase de estimado de Costo. ....	108
Figura 14. Costo por cambios en el alcance .....	112
Figura 15. Elementos típicos que generan desviaciones en el estimado de costos .....	118
Figura 16. Curva "S".....	126
Figura 17. Interfaz del programa con la base de datos.....	128
Figura 18. Estimado de Costo Clase V base de datos. ....	129
Figura 19. Estimado Clase V caso de estudio. ....	130
Figura 20. Estimado Clase V caso de estudio II. ....	131

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Principales actividades de FEL I.....	22
Tabla 2. Principales actividades de FEL II.....	23
Tabla 3. Principales actividades de FEL III.....	24
Tabla 4. Puntaje máximo para cada sección y categoría del PDRI. ....	32
Tabla 5. Puntaje PDRI para cada etapa FEL .....	34
Tabla 6. Tiempo requerido en horas para realizar el estimado de costo. ....	45
Tabla 7. Matriz de Clasificación de Estimado de Costos .....	46
Tabla 8. Lista de verificación de entregables y Matriz de maduración .....	47
Tabla 9. Porcentajes predefinidos para la estimación de contingencias. ....	52
Tabla 10. Factor de Capacidad para Plantas de Procesos.....	65
Tabla 11. Factor de Capacidad para diferentes Equipos .....	66
Tabla 12. Factores de Lang para costos directos e indirectos de Plantas de Proceso .....	68
Tabla 13. Factores de Hand.....	70
Tabla 14. Factores de Wroth.....	71
Tabla 15. Factores del método de Chilton. ....	73
Tabla 16. Porcentajes típicos de la inversión de capital fijo para segmentos de costos directos e indirectos. ....	74

Tabla 17. Factores de proporción para estimar elementos de inversión de capital basados en el costo del equipo. ....	75
Tabla 18. Factores del Método Holland.....	77
Tabla 19. Clasificación de las técnicas de Estimación de Costos.....	105
Tabla 20. Indicadores del análisis de la Gestión del Valor Ganado. ....	123
Tabla 21. Planta Isomerizadora: Base de datos .....	129
Tabla 22. Resultados Estimado Clase V para los diferentes casos en la base de datos.....	131
Tabla 23. Estimación Factores de Lang .....	133
Tabla 24. Estimado Clase IV.....	133
Tabla 25. Estimación por Aspen Capital Cost Estimator .....	134
Tabla 26. Estimado Clase III: Costo directo total.....	135
Tabla 27. Estimado Clase III: Costo indirecto.....	135
Tabla 28. Estimado Clase III: Subtotal del proyecto. ....	135
Tabla 29. Estimado Clase III: Total del proyecto sin escalación. ....	136
Tabla 30. Estimado Clase III .....	136
Tabla 31. Comparación Estimados de costo. ....	137

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

- a) Analizar y comparar las técnicas disponibles para la estimación de costos de plantas de proceso en sus diferentes etapas, desde la perspectiva de la metodología FEL (Front End Loading).

### **OBJETIVOS PARTICULARES**

- Identificar las técnicas disponibles para la estimación de costos.
- Clasificar las técnicas de acuerdo con la clase del estimado de costo.
- Identificar los factores que afectan la precisión del proceso de estimación de costos.
- Aplicar las técnicas de estimación de costos en un caso de estudio.
- Analizar los resultados obtenidos y concluir.

## **HIPÓTESIS**

Presentar a los interesados en la Ingeniería y Administración de Proyectos un análisis con las técnicas, herramientas y prácticas para estimar las diferentes clases de costos presentes a lo largo de un proyecto, y su aplicación en un caso de estudio en una planta de proceso.

## RESUMEN

Una parte fundamental durante la planeación y ejecución de los proyectos es la estimación del costo del proyecto al ser el primer paso para determinar su viabilidad económica, la precisión con la que se desarrolle el estimado influirá en el éxito o fracaso del proyecto, por lo que se requiere una correcta gestión de costos que garantice que todas las fuentes de costos sean incluidas correctamente en el estimado.

Conforme avanza el proyecto se va teniendo una mayor claridad y definición de este, por tal motivo se espera que también el estimado de costo sea más preciso y real, esto se aprecia en las diferentes clases de estimado de costo, en un estimado **clase V** el estimador debe realizar suposiciones ya que la información que se tiene en esa etapa del proyecto es limitada, la definición del proyecto se encuentra entre un 0% y un 2%, el rango de precisión que da el estimado **clase V** va de -50% a +100%. Por otro lado, en un estimado **clase I** el proyecto está definido entre un 50% y 100%, esta estimación se prepara con gran detalle y todos los artículos en la estimación generalmente son artículos de línea de costo unitario basados en cantidades de diseño reales. El rango de precisión esperado es de -10% a +15%.

Al emplear la metodología **FRONT END LOADING (FEL)** en la planeación y ejecución de los proyectos se tiene un mayor control del proyecto ya que no permite avanzar a una siguiente etapa sin haber culminado los objetivos de la etapa actual, cada fase actúa como un punto de control del proyecto, después de ser examinado el proyecto puede pasar a la siguiente fase, regresar para una mejor definición o de ser requerido cancelarse. La implementación de FEL aumenta la probabilidad de éxito en términos de costo, tiempo y operabilidad, además, permite menores desviaciones en costo, tiempo y alcance de los proyectos de inversión.

Existen diferentes técnicas y herramientas a la hora de desarrollar un estimado de costo, cada una requiere diferentes fuentes de entrada para su desarrollo. Dependiendo de las características del proyecto, de la información disponible y de

la clase de estimado que se quiera desarrollar se debe seleccionar la técnica más adecuada para la estimación, tomando en cuenta que la precisión que da cada técnica o herramienta varia.

A la hora de definir la técnica de estimación de costos hay varios factores que influyen en la selección de la técnica como lo es el tamaño del proyecto, la complejidad del proyecto, la fiabilidad y precisión del método o técnica, los recursos necesarios para realizar el estimado, la información disponible del proyecto, el tiempo requerido de la técnica para la estimación.

A partir de revisión bibliográfica en bases de datos científicas se encontraron las siguientes técnicas y herramientas de estimación de costos para plantas procesos las cuales se abordan en detalle dentro del documento: Estimación Análoga, por Capacidad, Paramétrica, por Factores (Lang, Hand, Wroth, Chilton, Peters-Timmerhaus, Holland), Análisis de Regresión, Inteligencia Artificial, Software de estimación de costos, estimación ascendente.

Es importante incluir en los estimados de costo un valor por contingencia, la cual proporciona una cantidad de protección para hacer frente a las incertidumbres y variabilidades inherentes al proyecto en todas sus etapas. Cuanto mayor es el grado de incertidumbre, mayor es la cantidad de contingencia requerida. Su objetivo es garantizar que el presupuesto y el calendario del proyecto sean realistas y suficientes para contener el riesgo de aumentos imprevistos en el costo.

Existen una variedad de factores que influyen en el proceso de estimación y que inciden en el desempeño del proyecto y la precisión del estimado, entre los que se encuentran un alcance mal definido, estimador inexperto, emplear una técnica de estimación no adecuada, falta de escalación de los datos, no contar con información histórica, identificación incompleta de las actividades y recursos. Es importante identificar los factores que pueden afectar la estimación para que sean cubiertos en el desarrollo del estimado.

Al analizar las diferentes técnicas y herramientas de estimación se encuentra que una parte fundamental en el desarrollo del estimado en las etapas iniciales del

proyecto es la disponibilidad de información histórica de proyectos similares, ya que al no tener una definición completa del proyecto se recurre a la información de proyectos similares para hacer suposiciones.

Para evaluar la precisión del estimado de costo clase V, clase IV y clase III, se toma como caso de estudio un proyecto de una planta isomerizadora ejecutado en el año 2013 por una empresa mexicana, se usa la técnica de estimación análoga, los factores de Lang y el Software "Aspen Capital Cost Estimator" para desarrollar los estimados de costos, a partir del caso de estudio se comprueba la precisión de las técnicas empleadas en la estimación.

## INTRODUCCIÓN

Un proyecto es un esfuerzo temporal que se lleva a cabo para crear ya sea un producto, servicio o resultado único (*Project Management Institute, 2017*). Es la combinación de actividades y recursos en las que participan diferentes áreas multidisciplinarias que buscan el cumplimiento de un objetivo que representará algún tipo de beneficio para la organización en un tiempo determinado.

Los proyectos se originan a partir de una oportunidad estratégica, problemática o necesidad del negocio, de factores específicos como: nuevas tecnologías, demanda del mercado, cambios políticos/económicos/ambientales, requisitos legales, mejora en los procesos, entre otros. Los proyectos están limitados en tiempo, presupuesto y recursos.

Debido a su naturaleza temporal los proyectos tienen un principio y final definido. El final se alcanza cuando se han logrado los objetivos del proyecto, cuando se termina el proyecto porque los objetivos no se cumplirán, o cuando ya no existe la necesidad que dio origen al proyecto.

El estimado de costo es uno de los principales factores que incide en el éxito de un proyecto, es un componente clave en las fases de planificación del proyecto. A partir del estimado se determina si un proyecto es viable o no en términos de rentabilidad, es por esta razón que es muy importante realizar una correcta y precisa estimación de costos a lo largo del proyecto con el fin de tomar decisiones acertadas.

Sin importar el tipo, complejidad o tamaño del proyecto, la estimación de costos es esencial en la toma de decisiones, para elección de alternativas económicas. Por lo que una mala estimación puede llevar a desarrollar proyectos que no son viables, así como descartar proyectos con gran potencial.

En este documento se busca hacer un acercamiento de las técnicas y herramientas de estimación de costos en proyectos, determinar sus características y aplicabilidad de acuerdo con la clase de estimado de costo o etapa del proyecto.

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1. ESTIMACIÓN DE COSTOS

La Gestión de los Costos de un proyecto incluye los procesos relacionados con planificar, estimar, presupuestar, financiar, obtener financiamiento, gestionar y controlar los costos de modo que se complete el proyecto dentro del presupuesto aprobado y dentro del programa establecido.

La estimación de costos es la práctica de pronosticar el costo de completar un proyecto con un alcance definido, el cual se utiliza para autorizar el presupuesto de un proyecto, administrar y controlar su costo (*Rajan, 2019*). Es fundamental para la planeación, formulación y evaluación económica de los proyectos de inversión.

La estimación de costos asigna un valor monetario al alcance propuesto del proyecto para evaluar su viabilidad económica y establecer el presupuesto necesario para su ejecución.

Su realización es fundamental ya que sirve como línea base, proporciona un estándar contra el cual se pueden comparar los gastos reales incurridos durante el curso de un proyecto, y sirven en el control de costos. La estimación de los costos es el principal medio para evaluar la viabilidad del proyecto, brinda orientación a los gerentes de proyectos mientras toman decisiones vitales sobre la continuación o el rechazo de un proyecto.

La exactitud de la estimación depende en gran medida del nivel de definición del proyecto y de la información disponible la cual se determina con el Índice de Definición del Proyecto (***PDRI***) de acuerdo con las etapas de FRONT END LOADING (***FEL***).

El estimador de costos debe estar familiarizado con el alcance del proyecto y sus especificaciones, en la etapa inicial del proyecto el estimador necesitará hacer

suposiciones sobre datos que todavía no están claramente definidos, pero conforme avanza el nivel de definición el número de supuestos se reducirán.

A medida que el diseño y las condiciones del proyecto se definen mejor, la estimación del costo estará mejor definido. El tiempo y recursos empleados en las estimaciones son acordes al tamaño y complejidad del proyecto.

El costo real del proyecto se conoce sólo cuando este se ha completado, la estimación debe ser razonablemente precisa para reflejar de cerca el costo real. La precisión y la exactitud de la estimación depende de la cantidad y de la calidad de información disponible, el tiempo y la metodología de estimación utilizada durante el proceso de preparación (*Jrade & Alkass, 2001*).

Estudios han revelado que el 31,1% de los proyectos se han cancelado antes de que se hayan completado debido a una estimación y gestión de costos deficientes. Otros resultados indican que el 52.7% de los proyectos costarán más del 189% de su estimación inicial (*KPGM, 1997*), lo que evidencia la importancia de hacer estimados precisos con calidad pues al final incidirá en el éxito o fracaso del proyecto.

A lo largo del proyecto se requiere de una continua planificación, monitoreo y control de los costos, se deben revisar y refinar las estimaciones de costos conforme se conocen detalles adicionales, según avanza el proyecto la exactitud de la estimación aumenta.

### **1.1.1. Buenas prácticas para la Estimación del Costo**

A continuación, se presenta una serie de buenas prácticas que se deben tener en cuenta en el momento de desarrollar el estimado de costo.

- Es fundamental tener definido el alcance del proyecto.
- Definir la base o plan de ejecución del proyecto.
- Determinar los datos de estimación y los métodos de estimación que se emplearán.
- Contar con un equipo de estimación calificado.
- Calcular el costo de los elementos principales.

- Estimar el costo del diseño, de ingeniería y de la gestión del proyecto.
- Realizar escalación a los costos futuros.
- Determinar la contingencia que se aplicará.
- Verificar si la estimación es razonable.
- Comparar el estimado del costo con proyectos similares.

### **1.1.2. ¿Por qué fallan las estimaciones?**

La estimación del costo de un proyecto puede llegar a fallar por diversas razones entre se encuentran:

- (i)* Omitir el alcance del proyecto en la estimación.
- (ii)* Omitir posibles riesgos del análisis, tanto internos como externos.
- (iii)* La suposición poco realista y optimista hecha por los estimadores conduce a crecimientos en los costos.
- (iv)* Usar proyecciones históricas sin realizar la escalación de los datos.
- (v)* La estimación no es realizada por un estimador experto.
- (vi)* Estimaciones incompletas.
- (vii)* Incrementos en los precios.
- (viii)* Diseño incompleto.
- (ix)* Inadecuada planeación.
- (x)* Uso ineficiente de recursos.

## 1.2. METODOLOGÍA FRONT END LOADING

La metodología FRONT END LOADING (*FEL*) es un proceso de planificación de proyectos que consta de tres fases, su propósito es medir e incrementar el nivel de definición de un proyecto, aumentando así la probabilidad de éxito en términos de costo, cronograma y operabilidad (*Saputelli et al., 2013*).

La implementación de FEL permite menores desviaciones en costo, tiempo y alcance de los proyectos de inversión.

La metodología se basa en un concepto de puertas de decisión o compuertas, en la que antes de pasar a la siguiente etapa de FEL se debe haber finalizado y aprobado la fase anterior con el fin de garantizar el cumplimiento de los objetivos del proyecto y reducir costos. Para cada etapa de FEL, se define un conjunto de entregables tangibles que sirven de base para la toma de decisiones, al comienzo de cada etapa se revisa su planificación.

Cada fase actúa como un punto de control del proyecto, después de ser examinado puede pasar a la siguiente fase, regresar para una mejor definición o cancelarse el proyecto. FEL permite que todas las partes interesadas participen en el proceso de toma de decisiones para decidir si se debe continuar y liberar más fondos para el proyecto o si se debe suspender.

El proceso FEL considera todos los recursos financieros, humanos, instalaciones y organizaciones para convertir los recursos técnicos en proyectos de capital. El objetivo principal de FEL es lograr una comprensión del proyecto propuesto que sea lo suficientemente detallado para minimizar los cambios en las fases de ingeniería, construcción y puesta en marcha.

Entre los objetivos de FEL se encuentran (*Asmoro, 2014*):

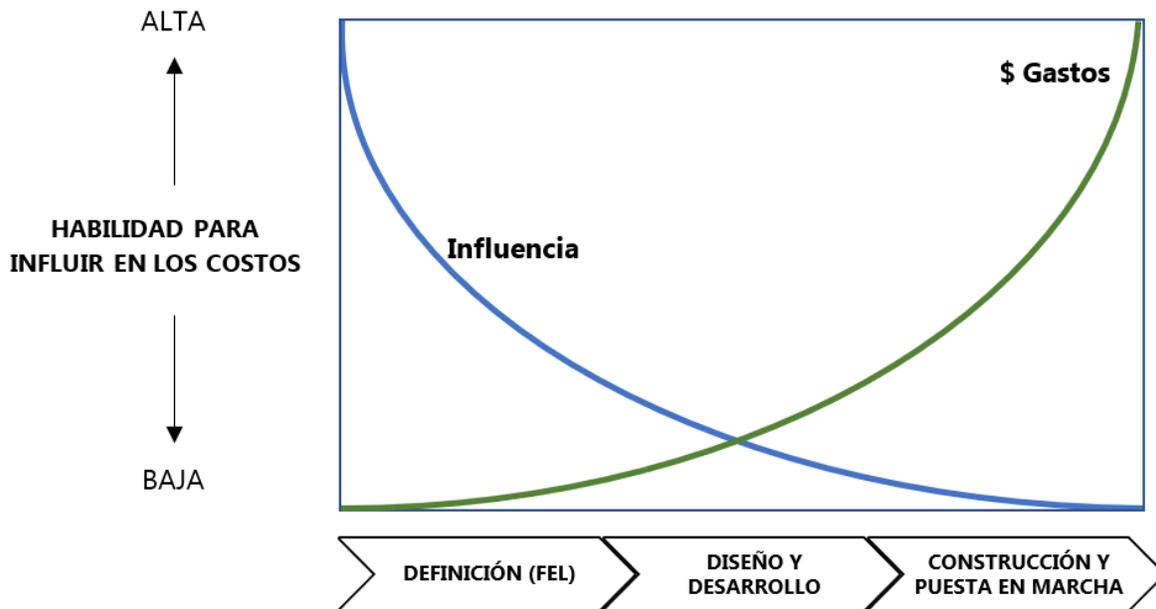
- Convertir las necesidades de la empresa en el principal impulsor de la inversión en proyectos de capital.
- Asignar la responsabilidad del proyecto a equipos multidisciplinarios.

- Mejorar la productividad del capital de los proyectos utilizando la mejor tecnología disponible.
- Eliminar inversiones que no sean rentables o factibles.
- Minimizar cambios durante la ejecución del proyecto para reducir costos.

Durante las primeras etapas de un proyecto se tiene una mayor capacidad para influir en el resultado del proyecto que durante las etapas posteriores, de igual forma el impacto de las decisiones tomadas en las primeras etapas tiene una mayor influencia en el costo final de un proyecto.

En la Figura 1 se presenta la relación que existe entre la habilidad para influir en los costos y los gastos de un proyecto en cada etapa. A medida que avanza un proyecto las decisiones o cambios que se realicen incurrirán en mayores gastos (*Batavia, 2001*). La mayoría de las oportunidades para influir en el costo del proyecto ocurren antes de iniciar la ingeniería de detalle.

*Figura 1. Influencia y gastos a través del ciclo de vida de un proyecto*



**Fuente:** Adaptado de *Front-End Loading for Life Cycle Success* (Batavia, 2001).

Es de gran importancia una toma de decisiones temprana y una comunicación efectiva de los objetivos del proyecto y los resultados esperados al equipo del proyecto. La metodología FEL ofrece una oportunidad para la gestión de riesgos y para una ejecución superior del proyecto al mitigar los riesgos y aumentar la posibilidad de cumplir los objetivos del proyecto en el plazo y costo definido.

Por otra parte, la fase FEL en un proyecto representa solo entre el **1%** y **7%** de los costos totales del proyecto (*Shlopak et al., 2014*), mientras que su impacto y beneficios son muy grandes para el éxito del proyecto, ya que maximiza el valor y minimiza los riesgos durante la ejecución del proyecto.

Algunas consideraciones importantes durante FEL se presentan a continuación:

- Objetivos comerciales bien definidos.
- Objetivos claros del proyecto.
- Estrategia de ejecución del proyecto.
- Definición del alcance y entregables de FEL.
- Prácticas de reducción de costos.
- Análisis de costos del ciclo de vida.
- Plan de ejecución del proyecto.
- Estimación de la financiación.
- Calendario FEL.
- Organización del equipo del proyecto.

### **1.2.1. Etapas FEL**

FEL está dividido en tres fases: Visualización, Conceptualización y Definición, a continuación, se presentan las principales características de cada fase FEL (*Motta et al., 2011*).

#### **1.2.1.1 FEL I: Visualización**

Tiene como objetivo identificar, desarrollar y evaluar una oportunidad de inversión a través del análisis del atractivo comercial y la comprensión de la alineación estratégica del proyecto y las necesidades de la compañía, se

definen los criterios necesarios para satisfacer las necesidades técnicas y comerciales.

En esta etapa, se inicia el desarrollo del plan de negocios, la evaluación de factibilidad económica técnica, el pronóstico del mercado, los estudios competitivos y las estimaciones iniciales de costos.

### **1.2.1.2 FEL II: Conceptualización**

Su objetivo es desarrollar las alternativas identificadas en FEL I para seleccionar la alternativa más viable que maximice el valor. En este paso, se realizan las principales definiciones de ingeniería conceptual sobre el proceso de producción, estudios de intercambio y un refinamiento de las premisas del proyecto y los datos económicos.

Para proyectos industriales, se desarrollan balances de masa y energía y diagramas de flujo de procesos. También se determina la localización del proyecto, se determina el diseño, se analizan y estiman los riesgos, se establece y detalla el alcance del proyecto.

### **1.2.1.3 FEL III: Definición**

Esta etapa busca profundizar la alternativa seleccionada en FEL II para planificar la ejecución del proyecto y confirmar el cumplimiento del proyecto y los objetivos comerciales.

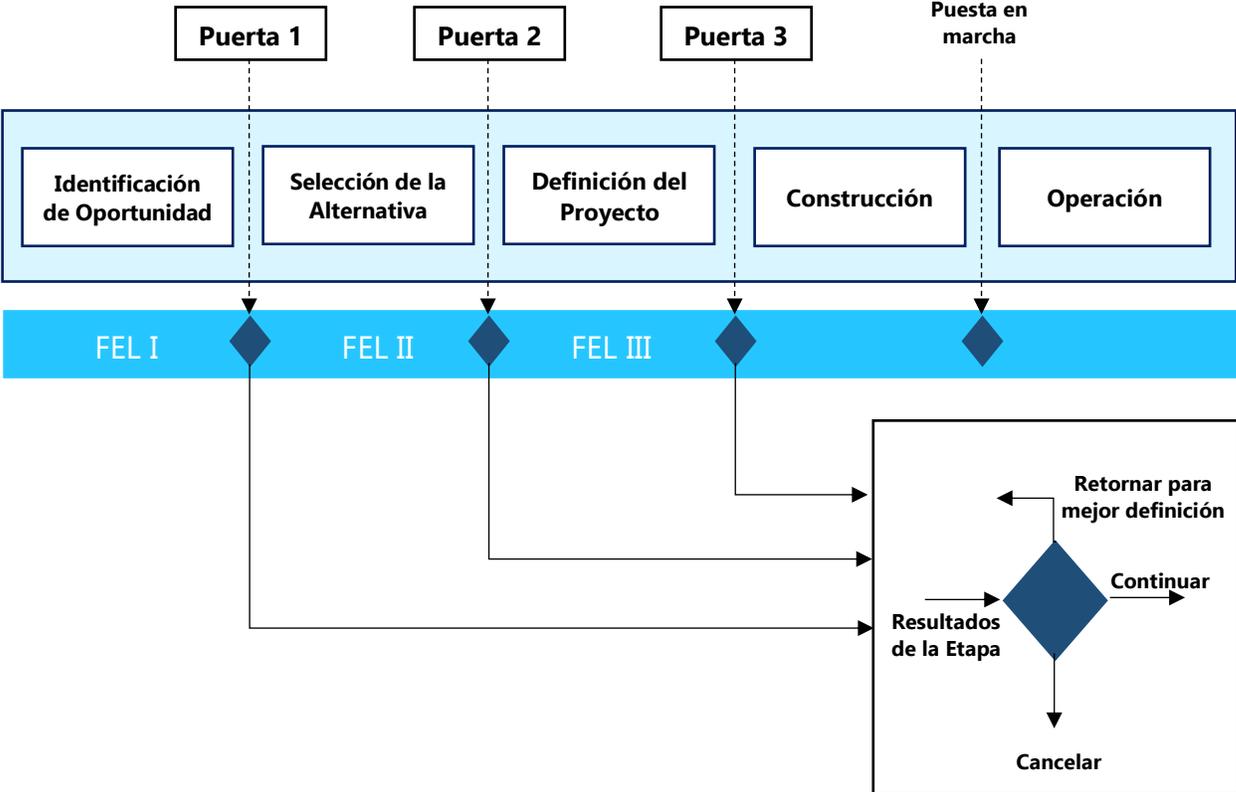
En esta etapa, se define la estrategia de ejecución, se lleva a cabo la preparación de la planificación de la construcción, la definición de la estimación de inversión para la autorización de la implementación, el desarrollo de ingeniería detallada, la especificación del equipo, el plan de compra.

En este punto, el alcance está congelado, el costo y el plazo límite se definen para que se pueda tomar la decisión de ejecutar el proyecto o no.

En la Figura 2 se presenta un esquema del ciclo de vida de un proyecto a partir de la metodología FEL con sus respectivas etapas y las puertas de decisión. Una vez se concluye cada etapa se decide de acuerdo con los resultados de esa etapa si el

proyecto pasa a la siguiente etapa, si debe retornar para una mejor definición o por el contrario si se debe cancelar el proyecto.

Figura 2. Metodología FRONT END LOADING



Fuente: Adaptado de TECLIM method for rational water use in industry: the bank of ideas in the context of the front-end loading methodology (de Oliveira et al., 2016)

### **1.2.2. Actividades y Entregables de FEL**

En cada una de las etapas de FEL se deben elaborar una serie de documentos o entregables, que sirven como base para el análisis y toma de decisiones. En las Tablas 1-3 se presentan las principales actividades que se realizan en cada etapa.

Un entregable se define como cualquier producto, resultado único y verificable para ejecutar un servicio que se produce para completar un proceso, una fase o un proyecto.

Los entregables de un proyecto presentan los resultados de las actividades o producto realizado como indicadores, valores indicativos de la rentabilidad, la determinación del alcance del proyecto, el estimado de costo, y la documentación de soporte (*PEMEX, 2012*).

*Tabla 1. Principales actividades de FEL I*

ETAPA	OBJETIVO	PRINCIPALES ACTIVIDADES
<p><b>FEL I: Visualización</b></p>	<p>Asegurar la congruencia estratégica y evaluar la factibilidad técnica, económica y ambiental de las oportunidades de inversión</p>	<p> <b>i)</b> Definir plan, programa y recursos para desarrollar FEL I  <b>ii)</b> Integrar el equipo de proyecto para FEL I  <b>iii)</b> Definir bases de usuario  <b>iv)</b> Definir objetivos y prioridades del proyecto y su alineación con el Plan de Negocios  <b>v)</b> Identificar alternativas del proyecto  <b>vi)</b> Generar y analizar alternativas de proceso y tecnología  <b>vii)</b> Generar y analizar alternativas del sitio de proyecto  <b>viii)</b> Definir el alcance preliminar del proyecto  <b>ix)</b> Desarrollar la estructura de desglose de trabajo del proyecto (WBS)  <b>x)</b> Establecer el estimado de costo del proyecto: <b>Clase V</b>  <b>xi)</b> Elaborar plan preliminar para el desarrollo de la fase de ejecución del proyecto  <b>xii)</b> Elaborar programa preliminar del proyecto  <b>xiii)</b> Analizar potencial de comercialización de reducción de emisiones de gases efecto invernadero  <b>xiv)</b> Desarrollar análisis de riesgos  <b>xv)</b> Elaborar Caso de Negocio  <b>xvi)</b> Definir plan, programa y recursos para FEL Diseño y acreditación / FEL I  <b>xvii)</b> Validación de entregables  <b>xviii)</b> Integrar paquete de acreditación  <b>xix)</b> Acreditar la etapa FEL I                 </p>

*Fuente: Adaptado de Manual Del Sistema Institucional de Desarrollos Proyectos (PEMEX, 2012)*

Tabla 2. Principales actividades de FEL II

ETAPA	OBJETIVO	PRINCIPALES ACTIVIDADES
<b>FEL II A: Conceptualización</b>	Seleccionar las alternativas o escenarios del proyecto más viable	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>i)</b> Integrar el equipo de proyecto para FEL II</li> <li><b>ii)</b> Seleccionar sitio y realizar estudios preliminares</li> <li><b>iii)</b> Evaluar y seleccionar tecnologías</li> <li><b>iv)</b> Elaborar bases de diseño para ingeniería básica</li> <li><b>v)</b> Desarrollar contrataciones de tecnologías</li> <li><b>vi)</b> Validación de entregables de FEL IIA</li> </ul>
<b>FEL II B: Conceptualización</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Desarrollar la ingeniería básica.</li> <li>- Realizar la declaración del alcance definitivo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>i)</b> Actualizar objetivos y prioridades del proyecto y su alineación con el Plan de negocios</li> <li><b>ii)</b> Desarrollar paquete de ingeniería básica</li> <li><b>iii)</b> Elaborar bases de diseño para ingeniería FEED</li> <li><b>iv)</b> Declarar el alcance definitivo del proyecto</li> <li><b>v)</b> Actualizar la estructura de desglose de trabajo del proyecto (WBS)</li> <li><b>vi)</b> Actualizar plan para el desarrollo de la fase de ejecución del proyecto</li> <li><b>vii)</b> Actualizar programa de ejecución del proyecto</li> <li><b>viii)</b> Establecer el estimado de costo del proyecto: <b>Clase IV ó III</b></li> <li><b>ix)</b> Actualizar el análisis del potencial de comercialización de reducción de emisiones de gases efecto invernadero</li> <li><b>x)</b> Desarrollar análisis de riesgos</li> <li><b>xi)</b> Actualizar Caso de Negocio</li> <li><b>xii)</b> Definir plan, programa y recursos para FEL III</li> <li><b>xiii)</b> Validación de entregables</li> <li><b>xiv)</b> Integrar paquete de acreditación</li> <li><b>xv)</b> Acreditar la etapa FEL II.</li> </ul>

**Tabla 3. Principales actividades de FEL III**

ETAPA	OBJETIVO	PRINCIPALES ACTIVIDADES
<p><b>FEL III: Definición</b></p>	<p>Determinar el alcance detallado, plazo y costo definitivo del proyecto y establecer los compromisos de ejecución</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>i)</b> Integrar el equipo de proyecto para FEL III</li> <li><b>ii)</b> Actualizar objetivos y prioridades del proyecto y su alineación con el Plan de Negocios</li> <li><b>iii)</b> Desarrollar Ingeniería Básica Extendida (FEED)</li> <li><b>iv)</b> Detallar el alcance del proyecto</li> <li><b>v)</b> Actualizar la estructura de desglose de trabajo del proyecto (WBS)</li> <li><b>vi)</b> Detallar plan para el desarrollo de la fase de ejecución del proyecto.</li> <li><b>vii)</b> Actualizar programa del proyecto y generar la ruta crítica</li> <li><b>viii)</b> Establecer el estimado de costo del proyecto: <b>Clase III ó II</b></li> <li><b>ix)</b> Actualizar análisis de potencial de comercialización de reducción de emisiones de gases efecto invernadero</li> <li><b>x)</b> Desarrollar análisis de riesgos</li> <li><b>xi)</b> Actualizar Caso de Negocio</li> <li><b>xii)</b> Validación de entregables</li> <li><b>xiii)</b> Integrar paquete de acreditación</li> <li><b>xiv)</b> Acreditar la etapa FEL III.</li> </ul>

### **1.2.3. Beneficios de FEL**

La implementación de la metodología presenta grandes beneficios para el proyecto, entre los que se encuentran:

- Cambios de diseño más bajos, la planificación inicial garantiza procedimientos claros para gestionar y controlar los cambios en cualquier etapa del proyecto, lo que garantizará que cualquier cambio necesario tenga un impacto mínimo.
- Evita realizar inversiones en proyectos que no serán rentables o factibles, y permite al equipo de diseño desarrollar un proyecto más eficiente, que tiende a mejorar el rendimiento.
- Al proporcionar una vista detallada de lo que se hará, facilita la comunicación y mejora la eficiencia del seguimiento y control.
- Facilidad en la gestión financiera, una financiación inadecuada puede conducir a retrasos o interrupciones del proyecto. Este problema se resuelve implementando la planificación anticipada en un proyecto.
- Mejor desempeño operativo y menor probabilidad de fallas del proyecto.
- Logro de los objetivos comerciales y menos cambios en el alcance.
- Mayor previsibilidad de costos y cronograma, así como una mejor gestión de riesgos.
- El impacto de las decisiones tomadas en las primeras etapas tiene una mayor influencia en el costo final del proyecto.

### 1.3. ESTRUCTURA DE DESGLOSE DEL TRABAJO

La estructura de desglose de trabajo también conocida por sus siglas en inglés como WBS (*Work Breakdown Structure*), organiza un proyecto jerárquicamente y lo descompone sistemáticamente en unidades más pequeñas, agrupaciones lógicas de trabajo, y manejables para un mejor control. La descomposición debe estar orientada a los entregables requeridos, se requiere subdividir el trabajo de todos los entregables y componentes en sus elementos más fundamentales, hasta el nivel en el que representan productos, servicios o resultados verificables (*Cerezo Narváez et al., 2020*).

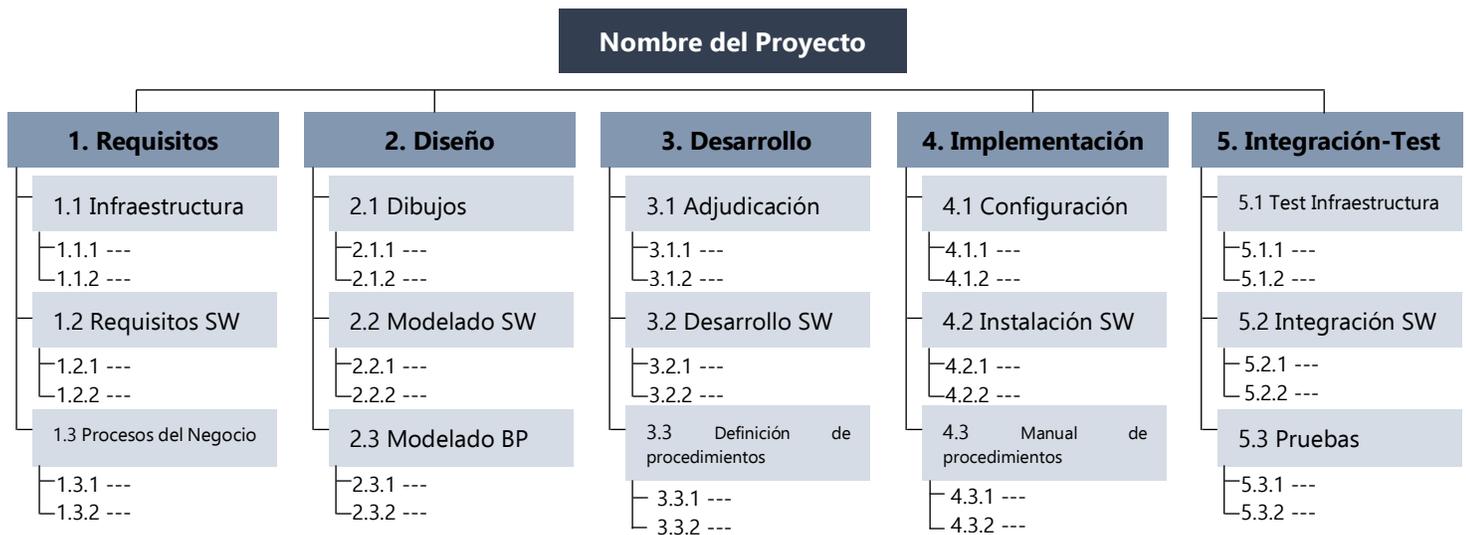
Todo el trabajo del proyecto se divide en actividades y entregables a las que se asignan, programan, presupuestan y luego controlan los recursos. Un entregable es un resultado único que debe obtenerse para cumplir con el proceso, la fase o los pasos del proyecto. El WBS es un mecanismo clave para mantener el orden y garantizar que no se descuide nada importante durante la ejecución del proyecto.

Antes de desarrollar el WBS es importante tener una buena definición del alcance y de los entregables para asegurar que eventualmente se eviten discrepancias durante el proyecto, además ayuda con la planificación y control del proyecto.

El WBS tiene como objetivo desglosar, clasificar y sub-agrupar todos los elementos del proyecto. Por lo tanto, cada nivel descendente representa una definición cada vez más detallada de todos los componentes del proyecto (*Project Management Institute, 2019*). La parte inferior del WBS se conoce como paquete de trabajo. Todos los elementos WBS deben incluir códigos de identificación alineados con el plan de gestión del proyecto.

En la figura 3 se aprecia un ejemplo de un diagrama de Estructura de Desglose del Trabajo.

Figura 3. Diagrama WBS



**Fuente:** Adaptado de Simple Method Proposal for Cost Estimation from Work Breakdown Structure (Sequeira & Lopes, 2015).

Se debe desarrollar también un diccionario WBS, el cual es un documento en el que se describen los componentes del WBS, proporciona detalles sobre cada paquete de trabajo, y describe los recursos necesarios para ejecutar cada paquete (Supriadi et al., 2018). El diccionario WBS puede incluir la siguiente información:

- Código de identificación
- Descripción del trabajo
- Suposiciones y restricciones
- Persona responsable
- Lista de hitos
- Lista de actividades
- Recursos necesarios
- Estimaciones de costos
- Requisitos de calidad
- Criterios de aceptación
- Información técnica o referencias

El WBS ofrece una oportunidad para que todos los interesados del proyecto vean el proyecto de la misma manera y hablen un lenguaje común (*Hwang et al., 2018*), además es la base para planificar, estimar, programar, monitorear, administrar y controlar todas las actividades del proyecto.

Al dividir el proyecto en paquetes de trabajo medibles se facilita el proceso de estimación del costo ya que a partir del WBS se pueden identificar los recursos físicos y humanos necesarios para la ejecución del proyecto.

Adicionalmente, se puede realizar una estructura de desglose de costos conocida por sus siglas en inglés como *CBS (Cost Breakdown Structure)* la cuál es una representación jerárquica de todos los tipos y categorías de costos presentes en un proyecto, su propósito es identificar, definir y organizar todos los elementos de costo facilitando el proceso de estimación y control del costo. Estos costos se consolidan de manera similar al WBS.

En ocasiones no se tiene completamente identificados todos los tipos de costo debido a su naturaleza o a la definición del proyecto.

La eficiencia y el control de los proyectos puede aumentar estableciendo el WBS y CBS.

#### 1.4. PROJECT DEFINITION RATING INDEX (PDRI)

El PDRI es una herramienta de planificación inicial desarrollada por el Instituto de la Industria de la Construcción (CII) en 1994, mide el grado de definición del alcance de un proyecto. Está compuesto por una lista de verificación estructurada de elementos y descripciones que respaldan la definición del alcance en varios tipos de proyectos y un conjunto correspondiente de ponderaciones para esos elementos, uno para cada nivel de definición del alcance, el equipo del proyecto debe verificar el nivel de definición antes de la implementación o ejecución del proyecto (*Elzomor et al., 2018*).

Una vez se han evaluado todos los elementos, se calcula un índice que proporciona el nivel relativo de definición del proyecto. Una puntuación más baja indica una mejor definición del proyecto (*Sarde et al., 2016*).

Esta herramienta permite al usuario revisar y evaluar simultáneamente el estado actual del progreso de planificación del proyecto, ayuda a minimizar los riesgos, y al mismo tiempo identifica los vacíos que pueden convertirse en problemas si no se abordan oportunamente. Su aplicación mejora el rendimiento del proyecto en términos de costo y cronograma, proporciona una indicación temprana de la probabilidad de éxito del proyecto. Se puede emplear esta herramienta a lo largo de FEL para garantizar la alineación continua con las prioridades del proyecto.

El PDRI se puede adaptar a diferentes tipos de proyectos con las características únicas que lo representan, es aplicable a proyectos industriales y de construcción.

Para el caso de proyectos industriales el PDRI consta de 70 elementos agrupados en tres secciones de la siguiente manera:

- Bases de decisión del proyecto
- Bases de diseño
- Enfoque de ejecución

Cada sección está compuesta por categorías que a su vez se dividen en elementos, cada elemento tiene una descripción detallada y se le asigna una puntuación ponderada dependiendo del nivel de definición. Cuanto más completo se ha abordado un elemento; más bajo es su puntaje. Cada elemento se califica de 0 a 5, donde 5 representa que ese elemento no está definido, 1 representa que está completamente definido, 0 en el caso de que ese elemento no sea aplicable al proyecto, se da una calificación de 2 cuando el elemento presenta deficiencias menores, pero no se requiere trabajo adicional antes de la fase de implementación del proyecto, 3 cuando el elemento contiene algunas deficiencias y se requiere trabajo adicional de definición antes de la fase de implementación, una calificación de 4 significa que el elemento presenta deficiencias mayores y se requiere un trabajo considerable hasta la implementación.

El PDRI permite analizar todo tipo de proyecto, cuando algún elemento no es aplicable a un proyecto específico se pueden eliminar o cuantificar como cero, esto permitirá eximir su influencia en el resultado final de la evaluación.

En la Figura 4 se presentan los elementos y categorías de cada sección del PDRI para proyectos industriales.

Figura 4. Secciones, categorías y elementos del PDRI para proyectos Industriales.

SECCIÓN 1. BASES DE DECISIÓN DEL PROYECTO					
A. CRITERIOS DE MANUFACTURA	B. OBJETIVOS DE NEGOCIO	C. DATOS BÁSICOS DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO	D. ALCANCE DEL PROYECTO	E. INGENIERÍA DE VALOR	
<p><b>A1.</b> Filosofía de confiabilidad</p> <p><b>A2.</b> Filosofía de mantenimiento</p> <p><b>A3.</b> Filosofía de operación</p>	<p><b>B1.</b> Productos</p> <p><b>B2.</b> Estrategia de mercado</p> <p><b>B3.</b> Estrategia de proyecto</p> <p><b>B4.</b> Factibilidad y viabilidad</p> <p><b>B5.</b> Capacidad</p> <p><b>B6.</b> Consideraciones de expansiones futuras</p> <p><b>B7.</b> Ciclo de vida esperado del proyecto</p> <p><b>B8.</b> Impacto social</p>	<p><b>C1.</b> Tecnología</p> <p><b>C2.</b> Procesos</p>	<p><b>D1.</b> Declaración de objetivos del proyecto</p> <p><b>D2.</b> Criterios de diseño del proyecto</p> <p><b>D3.</b> Características del sitio requeridas</p> <p><b>D4.</b> Requisitos de demolición y desmontaje</p> <p><b>D5.</b> WBS</p> <p><b>D6.</b> Cronograma del proyecto</p>	<p><b>E1.</b> Simplificación de proceso</p> <p><b>E2.</b> Alternativas de diseño y de materiales</p> <p><b>E3.</b> Análisis del diseño para constructibilidad</p>	
SECCIÓN 2. BASES DE DISEÑO					
F. INFORMACIÓN DEL SITIO	G. PROCESO / MECÁNICO	H. ALCANCE DE EQUIPOS	I. CIVIL, ESTRUCTURA Y ARQUITECTURA	J. INFRAESTRUCTURA	K. INSTRUMENTACIÓN Y ELÉCTRICA
<p><b>F1.</b> Localización del sitio</p> <p><b>F2.</b> Mecánica de suelos</p> <p><b>F3.</b> Estudio de impacto ambiental</p> <p><b>F4.</b> Requisitos para permisos</p> <p><b>F5.</b> Servicios industriales y condiciones de suministro</p> <p><b>F6.</b> Protección. contra incendios/ seguridad</p>	<p><b>G1.</b> Diagrama de flujo de proceso DFP</p> <p><b>G2.</b> Balances de materia y energía</p> <p><b>G3.</b> Diagramas de tuberías e Instrumentación</p> <p><b>G4.</b> Administración de procesos de seguridad.</p> <p><b>G5.</b> Diagrama de flujo de servicios</p> <p><b>G6.</b> Especificaciones</p> <p><b>G7.</b> Requisitos de sistemas de tuberías</p> <p><b>G8.</b> Plano de Localización General</p> <p><b>G9.</b> Lista de Equipo mecánico</p> <p><b>G10.</b> Lista de líneas</p> <p><b>G11.</b> Lista de interconexiones</p> <p><b>G12.</b> Lista de elementos especiales para tuberías</p> <p><b>G13.</b> Índice de instrumentación</p>	<p><b>H1.</b> Estado del equipo</p> <p><b>H2.</b> Plano de localización de equipo</p> <p><b>H3.</b> Requisitos de servicios auxiliares para equipos</p>	<p><b>I1.</b> Requisitos civiles y estructurales</p> <p><b>I2.</b> Requisitos arquitectónicos</p>	<p><b>J1.</b> Requisitos de tratamiento de agua</p> <p><b>J2.</b> Requisitos de instalaciones de carga/descarga/ almacenamiento</p> <p><b>J3.</b> Requisitos de transporte</p>	<p><b>K1.</b> Filosofía de control</p> <p><b>K2.</b> Diagramas lógicos</p> <p><b>K3.</b> Clasificaciones de áreas eléctricas</p> <p><b>K4.</b> Requerimientos de subestación/ Identificación de fuentes de energía</p> <p><b>K5.</b> Diagramas unifilares</p> <p><b>K6.</b> Especificaciones eléctricas y de instrumentación</p>
SECCIÓN 3. ENFOQUE DE EJECUCIÓN					
L. ESTRATEGIA DE PROCURA	M. ENTREGABLES	N. CONTROL DEL PROYECTO	P. PLAN DE EJECUCIÓN DEL PROYECTO		
<p><b>L1.</b> Identificación de material y equipo crítico de largo plazo</p> <p><b>L2.</b> Planes y procedimientos de procura</p> <p><b>L3.</b> Matriz de responsabilidades de procura</p>	<p><b>M1.</b> Software y formatos para los entregables</p> <p><b>M2.</b> Definición de entregables</p> <p><b>M3.</b> Matriz de distribución</p>	<p><b>N1.</b> Requisitos de control del proyecto</p> <p><b>N2.</b> Requisitos de contabilidad del proyecto</p> <p><b>N3.</b> Análisis de riesgos</p>	<p><b>P1.</b> Requisitos de aprobación del dueño</p> <p><b>P2.</b> Plan de seguimiento de Ingeniería y Construcción</p> <p><b>P3.</b> Requisitos de paro y arranque</p> <p><b>P4.</b> Requisitos para prelistamiento y alistamiento</p> <p><b>P5.</b> Requisitos de arranque</p> <p><b>P6.</b> Requisitos de entrenamiento</p>		

Todos los puntajes de los elementos dentro de una categoría deben sumarse para producir un puntaje total para esa categoría. Luego, los puntajes para cada una de las categorías dentro de una sección deben sumarse para llegar al puntaje de la sección. Finalmente, los puntajes de las tres secciones deben combinarse para determinar el puntaje total de PDRI, el puntaje máximo asignado al evaluar el proyecto es de 1000 (Sarde et al., 2016).

En la Tabla 4 se presentan los puntajes máximos posibles para cada sección y categoría en un proyecto industrial.

*Tabla 4. Puntaje máximo para cada sección y categoría del PDRI.*

<b>Sección</b>		<b>Puntaje máximo</b>
I	Bases de decisión del proyecto	499
II	Bases de diseño	423
III	Enfoque de ejecución	78
<b>Total</b>		<b>1000</b>
<b>Categoría</b>		<b>Puntaje máximo</b>
A	Criterios de manufactura	45
B	Objetivos de negocio	213
C	Datos básicos de investigación y desarrollo	94
D	Alcance del proyecto	120
E	Ingeniería de valor	27
F	Información del sitio	104
G	Proceso / Mecánico	196
H	Alcance de equipos	33
I	Civil, Estructura y Arquitectura	19
J	Infraestructura	25
K	Instrumentación y eléctrica	46
L	Estrategia de procura	16
M	Entregables	9
N	Control del proyecto	17
P	Plan de ejecución del Proyecto	36
<b>Total</b>		<b>1000</b>

Un puntaje de PDRI inferior a 200 significa que el paquete de definición del proyecto está completo y, en general, corresponde a un incremento de la probabilidad de éxito para el proyecto, por lo que solo hasta que se alcance esta puntuación se debería pasar a la fase de implementación o ejecución del proyecto. Un puntaje mayor a 200 significa que ciertos elementos dentro del paquete de definición del proyecto carecen de una definición adecuada para realizar la ejecución del proyecto.

Para lograr un desempeño sobresaliente en la ejecución de un proyecto es necesario una definición clara y completa del alcance del proyecto, y una adecuada planeación, ya que influirán en el costo, el progreso, y el rendimiento. Una mejor planificación en la fase previa al proyecto tiende a optimizar el éxito financiero en todo el proyecto.

Los proyectos que estén críticamente indefinidos en su alcance ampliarán la brecha entre el costo objetivo y el real, ya que inevitablemente existirán cambios en el proyecto, retrabajos, un aumento en las horas de trabajo y una disminución en la productividad esperada, de ahí la importancia de definir el alcance en las fases tempranas del proyecto (*Tih-Ju et al., 2014*). Una de las causas de los fracasos en los proyectos es la definición deficiente de su alcance.

En un estudio realizado con 40 proyectos industriales se determinó que aquellos proyectos que obtuvieron buenos resultados con el PDRI tuvieron un ahorro en costos promedio del **19%** en comparación con las estimaciones originales. También se observó una reducción del cronograma del **13%** en comparación con el cronograma original de diseño. Además, se encontró una menor cantidad de cambios en el proyecto y un mayor rendimiento operativo (*Bingham & Gibson, 2017*). Al comparar proyectos con un puntaje inferior a 200 en su PDRI frente a proyectos con un puntaje superior se encontró que los proyectos del primer grupo obtuvieron un mejor desempeño en términos de costos y tiempo (*Y.-R. Wang & Gibson, 2002*).

La aplicación del PDRI en la metodología FEL sirve como base para decidir si se avanza a la siguiente etapa FEL.

Al hacer una evaluación de los entregables típicos en cada etapa FEL y su nivel de definición esperado se obtuvieron los rangos de puntuación de PDRI al finalizar cada etapa FEL, las cuales se presentan en la Tabla 5, estas puntuaciones son solo una referencia pueden variar dependiendo del proyecto, fueron realizados para fines académicos. En el Anexo 1 se encuentra el desglose de la evaluación.

*Tabla 5. Puntaje PDRI para cada etapa FEL*

<b>ETAPA FEL</b>	<b>Puntuación PDRI</b>
FEL I	869 - 720
FEL II	440 - 257
FEL III	200 - 102

***VER ANEXO 1***

## **1.5. CATEGORÍAS DE COSTOS**

En los proyectos se presentan diferentes fuentes de costos, es importante reconocerlas para que sean tenidas en cuenta a la hora de realizar el estimado del proyecto. Conocer las diferentes fuentes de costo permite al estimador comprender exactamente dónde se planea gastar dinero.

Por lo general los costos de un proyecto se clasifican en costos directos y sobrecostos (costos indirectos, utilidad, financiamiento), se presenta a continuación un resumen de las características y principales elementos de cada costo (*Page, 1996; Peters et al., 2003; Venkataraman & Pinto, 2008a*).

### **1.5.1. Costos directos**

Los costos directos son aquellas erogaciones que se pueden cargar directamente contra el proyecto ya que están fácilmente relacionados con su ejecución, como son los cargos por mano de obra, maquinaria y equipos, materiales e instalaciones. A continuación, se presentan los ítems de costos directos más empleados en el desarrollo de proyectos industriales.

#### **1.5.1.1 Mano de obra**

Incluye los salarios para los diversos recursos humanos asociados con el proyecto. Dado que un proyecto requiere una variedad de personal con diferentes niveles de habilidad, la estimación del costo de mano de obra no es una tarea fácil. Se debe estimar las tarifas por hora para cada especialidad, incluir las prestaciones laborales, beneficios, seguros, incentivos, bonos y otros gastos generales. Adicionalmente, se debe realizar una estimación del tiempo de participación en el proyecto de cada personal para estimar su costo.

#### **1.5.1.2 Equipos y Materiales**

Incluye el precio de compra y todos los gastos relacionados con su adquisición como fletes, impuestos, seguros y aranceles, de todos los equipos, materias primas, suministros y otros materiales necesarios para completar las actividades del proyecto. Se incluye tanto los elementos del proceso como de servicios auxiliares. Este ítem comprende las siguientes especialidades o disciplinas:

- Civil

- Concreto
- Acero
- Edificaciones
- Equipos
- Tuberías
- Eléctricos
- Instrumentación y control
- Pintura, aislamientos, revestimientos
- Investigación y Desarrollo

#### **1.5.1.3 Herramientas y Maquinaria**

Son los costos por la renta, compra, mantenimiento y operación de maquinarias y herramientas requeridas en la ejecución y operación del proyecto.

#### **1.5.1.4 Preparación y mejora del sitio**

La preparación del sitio incluye la limpieza, nivelación, relleno, estabilización del suelo donde se localiza el proyecto.

Incluye además elementos de trabajo que proporcionan mejoras permanentes en el sitio de la planta, como zanjas de drenaje, alcantarillas, tuberías de drenaje pluvial, canales, diques, todos los materiales básicos para carreteras, estacionamientos y ferrocarriles.

#### **1.5.1.5 Otros rubros**

Los costos directos incluyen el costo de la ingeniería del proyecto, costo por pruebas y puesta en marcha, permisos, licencias, patentes y estudios requeridos para la ejecución del proyecto.

#### **1.5.2. Sobrecosto**

El sobrecosto hace referencia a aquellas erogaciones que por su naturaleza no es factible identificarlos como un bien o servicio específico, como en el caso de los costos directos, pero que se requieren para la ejecución del proyecto. Incluye los costos indirectos, el costo del financiamiento y la utilidad.

### **1.5.2.1 Costos indirectos**

Los costos indirectos corresponden a aquellos costos que no pueden atribuirse directamente a un artículo o servicio específico del proyecto, pero que igualmente se requieren para el desarrollo del proyecto, incluye los costos de infraestructura para los recursos humanos y físicos que son necesarios para el buen funcionamiento del proyecto en la medida en que los recursos están indirectamente asociados con el proyecto. Los costos indirectos incluyen los costos incurridos por los servicios que brindan funciones administrativas y de apoyo a una variedad de operaciones.

En los costos indirectos por lo general se incluyen costo de seguros, costo de financiamiento, gastos generales, costo de supervisión, costos administrativos del contratista, viáticos, gastos legales, honorarios del contratista, impuestos, costo de instalaciones temporales y oficina matriz.

El seguimiento y la asignación de costos indirectos a proyectos específicos se considera más difícil que la asignación de costos directos. En consecuencia, entre las organizaciones de proyectos existe una amplia variación en los enfoques empleados para estimar y asignar costos indirectos.

### **1.5.2.2 Financiamiento**

Son los cargos financieros en los que incurre el contratista por concepto de créditos o prestamos, los cuales son requeridos para la ejecución del proyecto. Puede estar representado por un porcentaje de la suma de los costos directos e indirectos.

### **1.5.2.3 Utilidad**

Representa la ganancia que espera obtener el contratista por su trabajo, se puede determinar por un porcentaje de la suma de los costos directos, costos indirectos y financiamiento.

Adicionalmente, se debe tener en cuenta un rubro por cargos adicionales que resulten por la ejecución del proyecto como impuestos o pago de derechos al Estado.

## 1.6. ÍNDICE DE COSTOS

En el mercado económico actual, los precios pueden variar ampliamente de un período a otro como es el caso de la compra de equipos o de los salarios, por lo que se hace necesario actualizar los costos y precios cuando se toman datos de referencia de períodos pasados en las estimaciones.

La mayoría de los datos de costos disponibles para hacer una estimación preliminar son solo válidos en el momento en que se desarrollaron. Puesto que los precios pueden haber cambiado considerablemente con el tiempo debido a cambios en las condiciones económicas. Por lo que se requiere el empleo de algún método o técnica para actualizar los datos de costos de una fecha anterior para aplicarlos a la estimación de costos en un momento posterior. Se puede emplear índices de costos para la actualización de los datos.

Un índice de costo es un valor de índice para un tiempo dado que muestra el costo en ese momento en relación con un cierto tiempo base.

Los índices de costos están disponibles para estimar la escalación de costos a lo largo de los años, desde un año  $m$  donde el costo conocido o estimado es  $C_m$  y el índice toma el valor  $I_m$ , hasta un año  $n$  donde el índice toma el valor  $I_n$  y el costo proyectado es  $C_n$  (Mignard, 2014):

$$C_n = C_m * \left(\frac{I_n}{I_m}\right) \quad \text{Eq. 1}$$

Una de las limitaciones que presentan los índices de costos es que no tiene en cuenta todos los factores, como los avances tecnológicos o las condiciones locales. Los índices de costos permiten estimaciones bastante precisas si el período involucrado es inferior a 10 años.

En la literatura se publican diferentes tipos de índices de costos, algunos se emplean para estimar los costos del equipo; otros se aplican específicamente a

mano de obra, construcción, materiales u otros campos especializados. Entre los más empleados se encuentran los índices de Marshall & Swift, índice de Chemical Engineering (*Chemical Engineering Plant Cost Index -CEPCI*), índices de Nelson-Farrar publicado en Oil & Gas Journal.

Una de las funciones de los índices de costos es proporcionarle al estimador un medio para actualizar el costo de una instalación similar desde el pasado hasta el presente. Siempre que el estimador elija un índice adecuado, se deberá obtener una aproximación razonable del costo actual (*Humphreys, 2005*).

### **1.7. ESCALACIÓN**

Las estimaciones de costos son preparadas en función de los precios vigentes en el momento en que se realiza la estimación, mientras que algunos de los gastos reales se incurrirán en algún momento futuro, razón por la cual se debe ajustar los precios actuales para reflejar el costo esperado en la fecha de compra real, ese cambio en el precio se debe a que los costos de los equipos, materiales y mano de obra siempre están sujetos a fluctuaciones que tienden a aumentar a largo plazo. El costo estimado para cada ítem debe ajustarse mediante un factor de escala para tener en cuenta su cambio en el tiempo y de esta manera acercarse al costo real en el momento futuro.

La escalación de costos refleja el cambio en el precio de un producto o servicio determinado durante un período de tiempo determinado (*Hameed Memon et al., 2018*).

Hay diversos factores que hacen necesario realizar la escalación de los costos entre los que se encuentran: fluctuación o variación del precio de los materiales, cambios en el cronograma del proyecto, políticas gubernamentales, cambio de gobierno e inestabilidad política, condiciones del mercado, método incorrecto de estimación, largo período de tiempo entre la planificación y el desarrollo, errores de diseño, o por experiencia previa en proyectos similares (*Muhammad et al., 2015*).

Es apropiado calcular la escalación para cada una de las principales líneas de costo, por lo general se realiza con base en la tasa de inflación proyectada y el cronograma del proyecto con el fin de reflejar el verdadero costo del proyecto.

Definir el cronograma es clave para la escalación ya que se debe conocer en qué momento se realizará el pago de cada elemento de costo para hacer una correcta proyección.

Es necesario realizar pronósticos de las diferentes variables que afectan los costos de capital, para proyectar la escalación se puede trazar tendencias históricas del índice de costos y luego extrapolarlas hacia el futuro, se requiere un grado considerable de juicio al pronosticar la escalación de los proyectos. Algunos índices de precios que se emplean para la escalación son el índice de precios al productor y el índice de precios al consumidor.

## 1.8. CLASIFICACIÓN ESTIMADO DE COSTOS

Como se mencionó anteriormente el estimado de costo depende en gran medida de la información disponible y de la etapa en la que se encuentre el proyecto, esto determinará la clase de estimado y su precisión. La Asociación Americana de Ingeniería de Costos (AACE) desarrolló la práctica recomendada **RP 18R-97** que permite definir los rangos esperados de precisión de los costos (AACE International, 2019), y relacionar dichos rangos con el Nivel de Madurez en la Definición de los Entregables del Proyecto.

El propósito de la clasificación de los estimados de costos es alinear el proceso de estimación con el desarrollo del alcance de la etapa del proyecto y los procesos de toma de decisiones. El nivel de definición del proyecto y la calidad de la información disponible determina la clase de estimado.

El grado de definición de un proyecto está determinado por el tipo y la extensión de la información disponible para el proceso de estimación de costos.

AACE establece cinco clasificaciones, un estimado de costos de **Clase V** es aquel que es preparado en la etapa más temprana de definición del programa o del proyecto y un estimado de costos **Clase I** es el calculado cuando el proyecto está completamente definido.

### 1.8.1. Clase V: Fase Conceptual: Orden de Magnitud

Las estimaciones de clase V generalmente se preparan con base a información muy limitada, pueden prepararse en un período de tiempo limitado, sin embargo, debido a la poca información disponible se requiere de un mayor esfuerzo del estimador para obtener información fiable que le permita dar un estimado realista, esta clase tiene un amplio margen de error debido a la limitada información con la que se realiza la estimación.

La definición del proyecto para esta etapa se encuentra entre un 0% y un 2%, no se ha desarrollado ingeniería en esta etapa del proyecto.

El estimado clase V se realiza para propósitos estratégicos de planificación comercial, tales como, estudios de mercado, evaluación de viabilidad inicial, evaluación de esquemas alternativos, selección de proyectos, estudios de ubicación de proyectos, evaluación de necesidades de recursos y presupuesto, planificación de capital a largo plazo.

Para las estimaciones generalmente se utilizan técnicas como curvas de costo/capacidad, estimación por factores: Lang, Hand, Chilton, Peters-Timmerhaus, Guthrie, juicio de expertos entre otras técnicas paramétricas y de modelado.

Los rangos de precisión típicos para las estimaciones de Clase V son -20% a -50% en el lado bajo, y, +30% a +100% en el lado alto, dependiendo de la complejidad de del proyecto será el nivel de precisión del estimado.

#### **1.8.2. Clase IV: Fase de Análisis: Estimado Conceptual - Preliminar**

Al realizar el estimado Clase IV el proyecto se encuentra en la fase de selección de las alternativas de proyecto más viables y rentables.

Por lo general, este estimado se utiliza para la evaluación de proyectos, la determinación de viabilidad, la evaluación de conceptos y la aprobación preliminar del presupuesto.

El nivel de definición del proyecto para esta etapa se encuentra entre 1% y 15%, se ha realizado la ingeniería conceptual que comprende la definición de capacidad de la planta, layout, diagrama de flujos de procesos, lista de equipos preliminar, estimación de requerimientos de servicios auxiliares.

Las estimaciones Clase IV se preparan para una serie de propósitos como: planificación estratégica detallada, desarrollo comercial, selección de proyectos en etapas más desarrolladas, análisis de esquemas alternativos, confirmación de factibilidad económica y/o técnica, y aprobación preliminar del presupuesto o aprobación para proceder a la siguiente etapa.

Para realizar las estimaciones se emplean métodos estocásticos, como factores de equipo, factores Lang, relaciones de costos unitarios, otras técnicas paramétricas y de modelado, se emplean además softwares de estimación relacionados con simuladores de procesos.

Los rangos de precisión esperados para las estimaciones de Clase IV son -15% a -30% en el lado bajo y +20% a +50% en el lado alto. Los rangos podrían exceder los mostrados si hay riesgos inusuales.

### **1.8.3. Clase III: Fase de Definición: Costo de Presupuesto**

Un estimado Clase III se prepara para formar la base de la autorización, asignación y/o financiación del presupuesto. Por lo general, la ingeniería se ha completado del 10% al 40%, se ha desarrollado la ingeniería básica y básica extendida que comprende entregables como: bases de diseño, lista de equipos, balance de materia y energía, requerimientos de servicios auxiliares, hojas de datos, diagramas de flujos de procesos y de servicios, diagramas de tuberías e instrumentación, plano de localización general de equipo, especificaciones de ingeniería.

Se preparan para respaldar las solicitudes de financiamiento de proyectos completos, y se convierten en la primera de las estimaciones de control de la fase del proyecto contra las cuales se controlarán todos los costos y recursos reales para detectar variaciones del presupuesto. Este estimado se utiliza como presupuesto del proyecto hasta que se reemplaza por estimaciones más detalladas.

La estimación se realiza con costos unitarios semidetallados o software de estimación de costos. Los rangos de precisión típicos para las estimaciones Clase III son -10% a -20% en el lado bajo y +10% a +30% en el lado alto.

#### **1.8.4. Clase II: Fase de Ejecución: Costo de Control**

El estimado Clase II se prepara para formar una línea base de control detallada, con este estimado se supervisa todo el trabajo del proyecto en términos de control de costos y progreso, los costos y recursos reales ahora se monitorean para detectar variaciones en el presupuesto, y forman parte del programa de gestión de cambios. Para los contratistas, esta clase de estimación a menudo se usa como la estimación de la oferta para establecer el valor del contrato.

El nivel de definición del proyecto se encuentra entre un 30% y 70%, se ha completado la ingeniería de detalle por lo que se cuentan con las volumetrías reales de los equipos.

Las estimaciones Clase II se preparan con gran detalle y se realiza con costos unitarios reales.

Las estimaciones de Clase II se preparan con gran detalle, el rango de precisión esperado es de -5% a -15% en el lado bajo y +5% a +20% en el lado alto, depende de la complejidad de la construcción del proyecto, la información de referencia adecuada y otros riesgos.

#### **1.8.5. Clase I: Costo Definitivo**

Por lo general, el proyecto está definido entre un 50% y 100%, la estimación comprende prácticamente toda la documentación de ingeniería y diseño del proyecto, y la ejecución completa del proyecto y los planes de puesta en marcha.

Implica un mayor grado de métodos de estimación deterministas y requiere un mayor esfuerzo. Las estimaciones Clase I se preparan con gran detalle, usualmente se realizan solo en las áreas más importantes o críticas del proyecto. Todos los artículos en la estimación generalmente son artículos de línea de costo unitario basados en cantidades de diseño reales.

El rango de precisión esperado es de -3% a -10% en el lado bajo y +3% a +15% en el lado alto.

En la Tabla 6 se presenta el esfuerzo típico en términos de tiempo que requiere para su realización cada clase de estimado un proyecto de US\$20.000.000

El tiempo requerido en cada proyecto dependerá del tamaño y complejidad del proyecto, así como también de la calidad de la información disponible, de las habilidades y conocimientos del estimador, y de la técnica de estimación empleada.

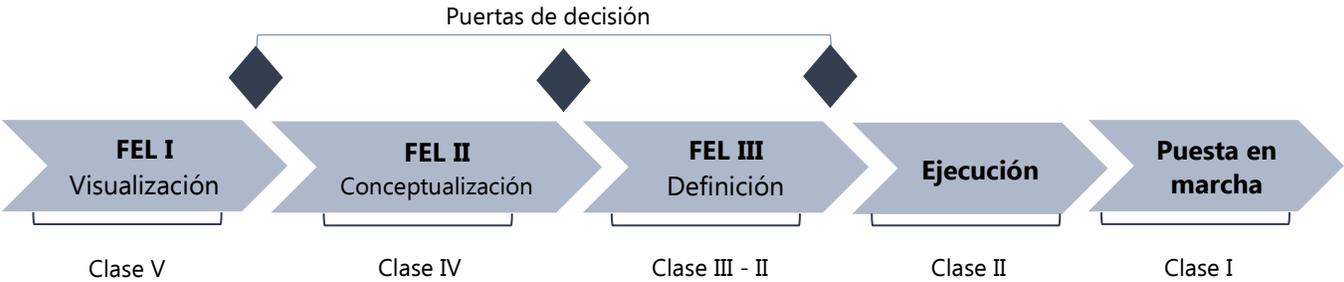
*Tabla 6. Tiempo requerido en horas para realizar el estimado de costo.*

Clase	Tiempo para preparar el estimado (horas)
V	1 - 200
IV	20 - 300
III	150 - 1500
II	300 - 3000
I	600 - 6000

*Fuente: Adaptado de AACE International Recommended Practice No. 18R-97 (AACE International, 2005).*

En la Figura 5 se presenta la correlación entre las fases FEL y las clases de estimados de costo, en la fase inicial de visualización (*FEL I*) se realiza un estimado Clase V y al finalizar la etapa de definición del proyecto (*FEL III*) el estimado resultante puede ser Clase III o Clase II dependiendo de la información disponible y el avance del proyecto.

*Figura 5. Correlación fases FEL y clases de estimado de costo.*



*Fuente: Adaptado de Desarrollo de estimados de costos de un proyecto (Biggeri & Dusek, 2018)*

En la Tabla 7 se presenta un resumen de las 5 clases de estimado de costo con sus principales especificaciones, se incluyen también los rangos de precisión del estimado de costo según ANSI y PEMEX.

**Tabla 7. Matriz de Clasificación de Estimado de Costos**

		AACE <sup>[1]</sup>			PEMEX <sup>[2]</sup>	ANSI <sup>[3]</sup>
Clase del Estimado	Nivel de definición del Proyecto	Propósito	Técnicas/ Herramientas	Rango de precisión esperado		
<b>Clase V</b>	0% - 2%	Proyección conceptual	Factores, modelos paramétricos, juicio de expertos o analogía	B: -20% / -50% A: +30% / +100%	-30% / +50%	<b>Orden de Magnitud</b> -30% / +50%
<b>Clase IV</b>	1% - 15%	Estudio de factibilidad	Factores de equipo, modelos paramétricos	B: -15% / -30% A: +20% / +50%	-20% / +35%	<b>Presupuesto Estimado</b>  -15% / +30%
<b>Clase III</b>	10% - 40%	Presupuesto, Autorización o Control	Costos unitarios semidetallado	B: -10% / -20% A: +10% / +30%	-15% / +25%	
<b>Clase II</b>	30% - 70%	Control / Oferta	Costo unitario detallado	B: -5% / -15% A: +5% / +20%	-10% / +15%	<b>Estimado Definitivo</b>  -5% / +15%
<b>Clase I</b>	50% - 100%	Verificar presupuesto	Costo unitario detallado	B: -3% / -10% A: +3% / +15%	-5% / +10%	

Cada clase de estimado tiene un alcance diferente y requiere una cantidad de información de entrada que va madurando conforme avanza el proyecto, en la Tabla 8, se presenta una lista de verificación de entregables básicos requeridos para cada clase de estimado que se encuentran en la práctica común en las industrias de procesos.

Cada industria tiene un conjunto típico de entregables que se utilizan para respaldar las estimaciones de costos, como por ejemplo la correspondiente a la cantidad de ingeniería que se ha completado.

El nivel de madurez es una aproximación del grado de finalización del entregable, el cual se indica mediante las siguientes letras:

- *Sin iniciar (en blanco)*: el desarrollo del producto o proceso no ha comenzado.

<sup>[1]</sup> AAEC International. (2011). AAEC International, Recommended Practice 18R-97, COST ESTIMATE CLASSIFICATION SYSTEM – AS APPLIED IN ENGINEERING, PROCUREMENT, AND CONSTRUCTION FOR THE PROCESS INDUSTRIES.

<sup>[2]</sup> PEMEX. (2012). Manual Del Sistema Institucional de Desarrollos Proyectos.

<sup>[3]</sup> American National Standards Institute (ANSI). (1989). ANSI Standard Z94.2, Industrial Engineering Terminology: Cost Engineering.

- *Iniciado (I)*: el trabajo sobre el producto ha comenzado. El desarrollo generalmente se limita a bocetos, esquemas generales.
- *Preliminar (P)*: el trabajo sobre el entregable está avanzado. Por lo general, se han llevado a cabo revisiones interfuncionales. El desarrollo puede estar a punto de completarse, excepto las revisiones y aprobaciones finales.
- *Completo (C)*: la entrega se ha revisado y aprobado según corresponda.

*Tabla 8. Lista de verificación de entregables y Matriz de maduración*

<b>Datos Generales del Proyecto</b>	<b>Clase 5</b>	<b>Clase 4</b>	<b>Clase 3</b>	<b>Clase 2</b>	<b>Clase 1</b>
Definición del Alcance del Proyecto	General	Preliminar	Definida	Definida	Definida
Producción/Capacidad de la Planta	Supuesta	Preliminar	Definida	Definida	Definida
Localización de la Planta	General	Aproximada	Específica	Específica	Específica
Suelos e Hidrología		Preliminar	Definida	Definida	Definida
Plan de Proyecto Integrado		Preliminar	Definida	Definida	Definida
Plan Maestro del Proyecto		Preliminar	Definida	Definida	Definida
Estrategia de Escalación		Preliminar	Definida	Definida	Definida
Estructura de Desglose de Trabajo		Preliminar	Definida	Definida	Definida
Estrategia de Contratación	Supuesta	Supuesta	Preliminar	Definida	Definida
<b>Entregables de Ingeniería</b>					
Diagrama de Bloque y de Flujo	I/P	P/C	C	C	C
Plano de localización de la Planta		I/P	P/C	C	C
Diagrama de Flujo de Proceso		I/P	P/C	C	C
Diagrama de Flujo de Servicios Auxiliares		I/P	P/C	C	C
Diagrama de Tubería e Instrumentación		I	P/C	C	C
Balance de Materia y Energía		I	P/C	C	C
Lista de Equipos		I/P	P/C	C	C
Lista de Servicios Auxiliares		I/P	P/C	C	C
Diagrama Unifilar		I/P	P/C	C	C
Hoja de especificaciones		I	P/C	C	C
Plano de Localización General de Equipo		I	P/C	C	C
Lista de piezas de repuesto			I/P	P	C
Dibujos del área de Ing. Mecánica			I	P	P/C
Dibujos del área de Ing. Eléctrica			I	P	P/C
Diagrama del Sistema de Control e Instrumentación			I	P	P/C

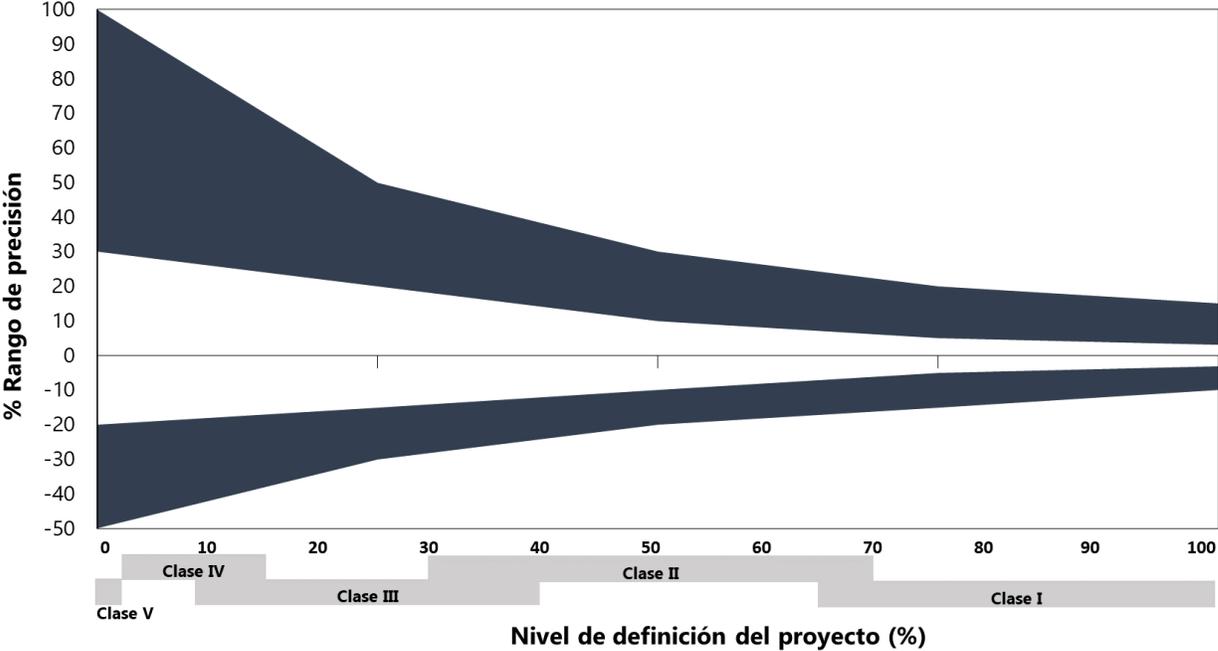
\***I**:Iniciado / **P**: Preliminar / **C**: Completo

La precisión del estimado depende en gran medida de la definición del proyecto, conforme avanza un proyecto se tiene más información y especificaciones por lo que los estimados serán más precisos lo cual se evidencia en los rangos de precisión de cada clase de estimado de costo.

Otro de los factores que influyen en la precisión de la estimación es la complejidad del proyecto, la calidad de la información disponible, la habilidad y experiencia del estimador, la calidad de los supuestos empleados en la preparación de la estimación, la técnica de estimación, el tiempo y el esfuerzo requerido.

En la Figura 6 se aprecia visualmente la variabilidad en los rangos de precisión y el nivel de definición del proyecto para cada clase de estimado de costo.

*Figura 6. Variabilidad en los rangos de precisión para estimaciones de costos en la industria de procesos.*



## 1.9. CONTINGENCIA

Debido a que las estimaciones son predicciones de costos futuros, siempre existirá la posibilidad de desviaciones debido a la incertidumbre en las etapas tempranas del proyecto. Por lo cual se necesitan fondos adicionales para actuar como un amortiguador, de modo que los fondos realmente asignados al proyecto sean suficientes, esta asignación es conocida como contingencia.

AACE International define la contingencia como una cantidad agregada a una estimación para permitir elementos, condiciones o eventos para los cuales el estado, la ocurrencia o el efecto es incierto y que la experiencia muestra que probablemente resultará en costos adicionales. Por lo general, se estima utilizando un análisis estadístico o juicios basados en la experiencia en proyectos pasados (*AACE International, 2008*).

La contingencia proporciona una cantidad de protección para hacer frente a las incertidumbres y variabilidades inherentes al proyecto en todas sus etapas. Cuanto mayor es el grado de incertidumbre, mayor es la cantidad de contingencia requerida. El objetivo de la asignación de contingencias es garantizar que el presupuesto y el calendario del proyecto sean realistas y suficientes para contener el riesgo de aumentos imprevistos en el costo.

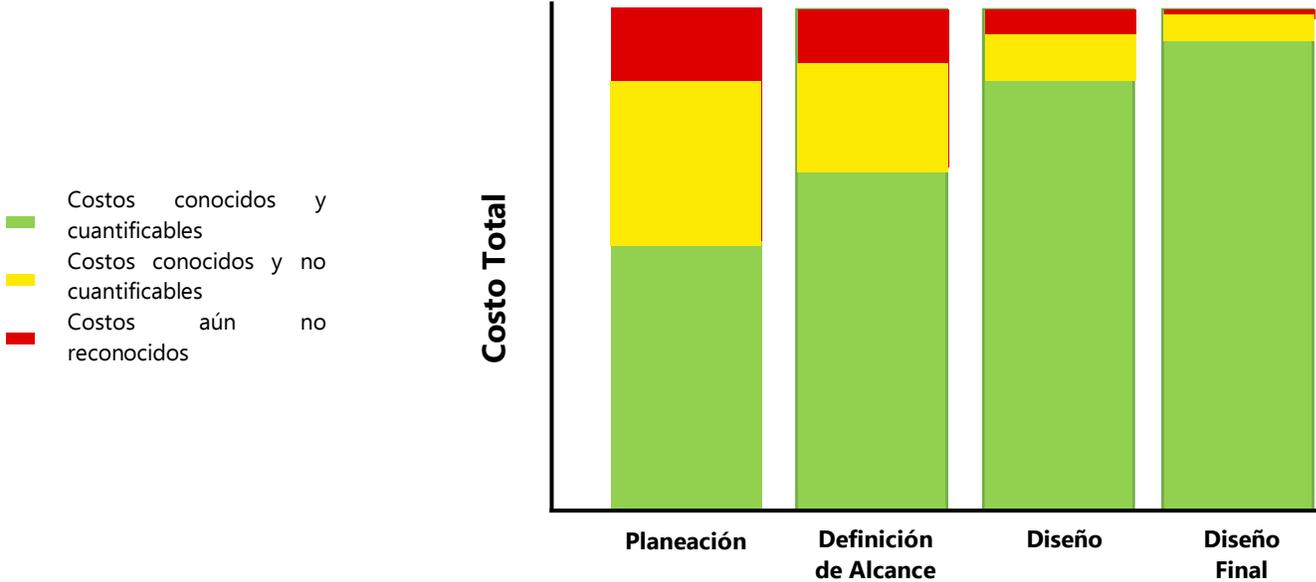
La disponibilidad de fondos de contingencia también mejora la viabilidad y el valor del proceso de estimación de costos como herramienta de control, hay varios beneficios de incluir el elemento de contingencia en el proceso de estimación de costos. En primer lugar, el enfoque reconoce que el futuro es incierto y que los problemas inesperados pueden aumentar los costos generales del proyecto, en segundo lugar, las estimaciones de contingencia hacen provisiones explícitas para escalas de costos potenciales e inesperadas de actividades que no se han identificado en los planes de proyecto y presupuestos. Finalmente, el uso de fondos de contingencia proporciona una señal de alerta temprana de posibles sobrecostos (*Venkataraman & Pinto, 2008a*).

La contingencia no tiene en cuenta los cambios en el costo debido a cambios en el alcance del proyecto, eventos extraordinarios como huelgas importantes y desastres naturales, escalación y efectos cambiarios. El costo de contingencia incluye los elementos de costos conocidos/no cuantificables y los costos que aún no han sido reconocidos en el proyecto, es importante reconocer que la contingencia es un valor que se planea gastar durante la ejecución del proyecto.

Al momento de realizar el estimado de costos existen tres tipos de elementos de costos: costos conocidos/cuantificables, costos conocidos/no cuantificables así como elementos de costos aún no reconocidos. Conforme avanza el proyecto los costos conocidos/cuantificables aumentan debido a que hay más información disponible, mientras que la cantidad de contingencia (costos conocidos/no cuantificables y costos aún no reconocidos) disminuye.

En la Figura 7 se presenta la distribución de los costos conforme avanza un proyecto.

*Figura 7. Distribución de los costos durante el proyecto*



**Fuente:** Adaptado de *Practical Guide to Cost Estimating* (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2013)

El cambio entre el costo conocido/cuantificable y la contingencia se relaciona con el nivel de madurez del proyecto, a medida que avanza la definición del proyecto, el nivel de incertidumbre o riesgo tiende a disminuir.

Es importante determinar adecuadamente el valor de contingencia pues tiene un efecto significativo en el proyecto, una asignación de bajas cantidades de contingencia para proyectos con alto riesgo podría llevar a un desempeño insatisfactorio y podría resultar en sobrecostos. Por otro lado, grandes cantidades de contingencia puede hacer que el proyecto se vuelva demasiado costoso y el proyecto sea cancelado. Las contingencias no solo deben calcularse correctamente sino que además se deben asignar al estimado y controlarse durante la ejecución del proyecto.

La estimación de contingencia va de la mano con la gestión de riesgos del proyecto, es fundamental identificar los factores de riesgo que podrían afectar el costo para posteriormente realizar una evaluación de los riesgos y de esta manera determinar el valor de la contingencia del proyecto.

La contingencia se puede estimar empleando diferentes métodos entre los que se encuentran los métodos deterministas, métodos probabilísticos y métodos matemáticos modernos (*Bakhshi & Touran, 2014*).

### **1.9.1. Métodos determinísticos**

Los métodos determinísticos son una representación matemática en la que cada variable se altera o comporta de acuerdo con una fórmula matemática, no se contempla la existencia del azar. La salida del modelo está completamente determinada por los valores de los parámetros y las condiciones iniciales.

Estos métodos se consideran los más simples y comunes utilizados para establecer la contingencia. Se puede dividir en dos categorías:

### 1.9.1.1 **Porcentajes predefinidos:**

En este método, se establece un porcentaje predeterminado del costo del proyecto como contingencia. Se puede fijar un porcentaje al costo base total o un porcentaje a cada elemento o línea de costo. Los porcentajes sugeridos se dan para diferentes fases clave de un determinado tipo de proyecto y pueden ser un valor único o un rango de valores.

La determinación de la contingencia es fácil en este método, pero no tiene en cuenta los riesgos potenciales del proyecto por lo que se puede llegar a sobreestimar o subestimar el costo real.

Por lo general se emplea un rango entre 10% y 30% como valor de contingencia dependiendo en la fase en la que se encuentra el proyecto.

Se requiere de la participación de la alta dirección de la empresa en la definición de la contingencia para evitar que los costos del proyecto no sean competitivos.

En la Tabla 9 se presentan algunos porcentajes empleados para la estimación de contingencias reportados en la literatura.

*Tabla 9. Porcentajes predefinidos para la estimación de contingencias.*

Fase del proyecto	Contingencia (%) <sup>[4]</sup>	Estimado de Costo	Rango de Contingencia (%) <sup>[5]</sup>		AACE Contingencia (%) <sup>[6]</sup>
Planeación	35% - 40%	Clase V			50%
Diseño Preliminar	25% - 35%	Clase IV	20%	15% - 20%	30%
Diseño Final	0 -25%	Clase III	15%	10% - 15%	20%
		Clase II	10%	3% - 10%	15%
		Clase I	5%	1% - 7%	5%

### 1.9.1.2 **Juicio de expertos:**

A diferencia del método de porcentajes en el método de juicio de expertos no hay un conjunto de porcentajes predeterminados, pero un experto o un grupo de

<sup>[4]</sup> Olumide, A. O., Anderson, S. D., & Molenaar, K. R. (2010). *Sliding-Scale Contingency for Project Development Process*. *Transportation Research Record*, 2151, 21–27. <https://doi.org/10.3141/2151-03>

<sup>[5]</sup> PEMEX. (2012). *Manual Del Sistema Institucional de Desarrollos Proyectos*.

<sup>[6]</sup> Rothwell, G. (2005). Cost contingency as the Standard Deviation of the Cost Estimate. *Cost Engineering (Morgantown, West Virginia)*, 47(7), 22–25.

expertos con gran experiencia en gestión y análisis de riesgos definen el porcentaje de contingencia para el proyecto basados en experiencias de proyectos similares anteriores.

Aunque este método considera la situación específica de cada proyecto al agregar un porcentaje único de contingencia para cada proyecto, no pasa por una evaluación de riesgos formal e integral. Por lo tanto, el presupuesto de contingencia no se estima adecuadamente.

La subjetividad es la principal desventaja de este método, ya que la habilidad, el conocimiento y la motivación de los expertos pueden variar ampliamente o la naturaleza del proyecto puede ser muy diferente a la que el experto ha experimentado en el pasado (*Hammad et al., 2015*).

Los enfoques deterministas no pueden abordar de manera efectiva los riesgos específicos de un proyecto y considerar los efectos únicos de la complejidad de un proyecto, las condiciones del mercado y la ubicación, se corre el riesgo de que la estimación de la contingencia sea demasiado simplista y probablemente poco realista (*Uppal, 2009*).

### **1.9.2. Métodos Probabilísticos**

En los métodos probabilísticos las incertidumbres y los riesgos se incorporan a la estimación de costos, se modelan explícitamente utilizando distribuciones estadísticas, una distribución o rango puede dar una representación más realista del costo del proyecto (*Touran, 2006*).

La contingencia necesaria se estima en función del nivel de confianza deseado, se puede definir el nivel de confianza frente a diferentes valores del costo del proyecto, estos modelos calculan un rango de una estimación en lugar de una estimación puntual.

Entre los métodos probabilísticos se encuentran métodos que no emplean simulación y métodos de simulación los cuales se presentan a continuación.

#### **1.9.2.1 Métodos sin simulación**

Esta categoría incluye los métodos analíticos en los que se realiza la evaluación de riesgos y el cálculo de contingencias sin el uso de paquetes de software de

simulación. Son herramientas efectivas para la evaluación de riesgos de las fases iniciales del proyecto, como la planificación conceptual o cuando la definición del proyecto no está completa.

Entre las técnicas empleadas se encuentran: el Árbol de Probabilidad, método de primer orden y segundo momento, valor esperado, técnica de revisión y evaluación de programas (*PERT*), estimación paramétrica, proceso analítico jerárquico (AHP) y análisis de regresión.

La técnica PERT está basada en el teorema del límite central, asume una distribución Beta para el costo de cada ítem que se aproxima con una estimación de tres puntos: costo optimista (más bajo), costo más probable (objetivo) y costo pesimista (más alto). Estos tres puntos pueden estimarse cuantitativamente utilizando datos de proyectos anteriores o cualitativamente utilizando el conocimiento y la experiencia de los expertos, el costo esperado será el resultado de la ponderación de los tres puntos.

Estos enfoques no son adecuados para grandes proyectos de infraestructura donde se requieren modelos complejos.

#### **1.9.2.2 Métodos de Simulación**

En estos métodos, generalmente el juicio de expertos y un método analítico se unen para alcanzar un resultado probabilístico utilizando simulación. En algunos casos los enfoques analíticos directos tienden a ser difíciles y en ocasiones no son factibles, la simulación puede ayudar al analista a encontrar un resultado probabilístico.

La simulación es el desarrollo de un modelo lógico-matemático de un sistema, de manera que se obtenga una imitación de un proceso del sistema a través del tiempo (*Azofeita, 2004*), ayuda a entender la interacción de los componentes de un sistema, su variabilidad y complejidad.

La simulación es utilizada para determinar la contingencia del proyecto donde se extraen valores aleatorios de un rango completo de distribución de probabilidad.

Como resultado, miles de escenarios se producen en un proceso paralelo para entregar un resultado confiable.

Es muy importante definir el tipo de distribución de probabilidad que mejor se ajuste a las características del proyecto, porque dependiendo de la distribución elegida los resultados pueden variar. Entre las distribuciones de probabilidad más empleadas se encuentran la distribución triangular, uniforme, normal, BetaPert y Log-normal.

El análisis de Monte Carlo es una simulación de probabilidad utilizada para comprender el impacto del riesgo y la incertidumbre desde una perspectiva financiera y temporal que pronostica el mejor y el peor de los casos del costo de un proyecto (*Traynor & Mahmoodian, 2019*).

Monte Carlo es uno de los métodos de simulación más comunes para el análisis de riesgos y el cálculo de contingencias. La cantidad de contingencia se debe equilibrar con el concepto nivel de confianza, es decir, la probabilidad de que el parámetro a estimar se encuentre en el intervalo de confianza (presupuesto del proyecto). Si se desea un nivel de confianza alto, la contingencia requerida aumentará (*Humphreys, 2005*).

El propósito de la Simulación Montecarlo es describir la distribución de probabilidad de la variable dependiente estudiada, basada en el comportamiento de las variables independientes que la afectan. El resultado generado no es un solo valor, sino una muestra de valores obtenidos mediante un conjunto aleatorio de datos generados, a partir de sus respectivas probabilidades de ocurrencia y medidas.

En Monte Carlo todo el sistema se simula una gran cantidad de veces, entre 100 y 10.000 iteraciones, donde, en cada iteración cada variable aleatoria asume un valor de acuerdo con su distribución de probabilidad. El valor de cada variable aleatoria se muestrea a través de un generador de números aleatorios. La salida de una sola simulación de Monte Carlo consiste en un único valor que depende de los valores tomados por todas las variables aleatorias en la simulación (*Maronati & Petrovic,*

2019). Todos los resultados de las simulaciones se ensamblan para estudiar la dispersión de los resultados, desarrollando una distribución de probabilidad o histograma del elemento estudiado como puede ser el costo total del proyecto o el valor de contingencia.

A la hora de calcular el valor de la contingencia se realiza una estimación de rango, donde es necesario primero identificar los riesgos del proyecto, posteriormente identificar los ítems de costo críticos, evaluar cada elemento de costo con un rango mínimo y máximo, y establecer una función de distribución de probabilidad asignado por el equipo en función de su comprensión del riesgo. Finalmente, se realiza la simulación en Monte Carlo en la que se determina el rango de la contingencia requerida para alcanzar el nivel de confianza deseado a través de una distribución de probabilidad del costo del proyecto.

La principal desventaja los métodos de simulación es que requieren una gran cantidad de datos para la construcción de modelos de simulación realistas; la mayoría de las veces estos datos no están disponibles y requieren un tiempo considerable para obtenerlos, además, los errores inevitables de la muestra afectan la precisión de los resultados (*Xenidis & Stavrakas, 2013*). A pesar de esto, los métodos de simulación son una de las herramientas más útiles para la estimación del presupuesto de un proyecto.

### **1.9.3. Métodos matemáticos modernos**

A partir de técnicas de matemáticas modernas como la Lógica Difusa (*Fuzzy Logic*) se puede determinar el valor de la contingencia. Es un método que captura la vaguedad, la incertidumbre, la imprecisión, el conocimiento humano incorporado, el comportamiento humano y la intuición, para crear aproximaciones matemáticas.

En el proceso de evaluación de riesgos, cuando no hay datos estadísticos disponibles, las opiniones de expertos se vuelven muy importantes. Los expertos pueden proporcionar una evaluación cualitativa de los riesgos. La teoría de conjuntos difusos es una herramienta matemática que puede ayudar al analista a

cuantificar estos términos lingüísticos (*Choi et al., 2004*). Además, disminuyen la subjetividad de los expertos frente a métodos deterministas.

Una de las limitaciones de esta técnica es su complejidad, el tiempo requerido, y la disponibilidad de datos históricos para ajustar el modelo.

Las Redes Neuronales Artificiales (*ANN*) se pueden aplicar también para determinar las contingencias, son una técnica de procesamiento de información que simula el cerebro humano y su proceso biológico, utiliza un mecanismo para aprender de ejemplos de capacitación y detectar relaciones ocultas entre los datos para generalizar soluciones a problemas futuros. Es ideal para modelar relaciones no lineales complejas.

## 1.10. ANÁLISIS DE RIESGOS

Los proyectos están sujetos a eventos tanto positivos como negativos que pueden afectar su desempeño y cumplimiento de objetivos, estos riesgos impactan en la duración y costo de las actividades, los riesgos tienen su origen en la incertidumbre que está presente en todos los proyectos.

Para una correcta gestión de riesgos es necesario:

- 1- Desarrollar el plan de gestión de riesgos
- 2- Identificar los riesgos y documentar sus características.
- 3- Evaluar cualitativamente los riesgos.
- 4- Evaluar cualitativamente los riesgos.
- 5- Planificar la respuesta al riesgo.
- 6- Controlar los riesgos (*Project Management Institute, 2017*).

El propósito de la identificación de riesgos es identificar los riesgos en la mayor medida posible. El hecho de que existan algunos riesgos desconocidos requiere que el proceso de identificación del riesgo sea iterativo, repitiendo el proceso de identificación durante las diferentes etapas del proyecto. El principal resultado de este paso es el registro de riesgos, que contiene una lista de riesgos, una descripción, un período de tiempo y un administrador de riesgos para cada uno de los riesgos (*Shrivastava, 2012*).

Una identificación temprana de los riesgos permite que las decisiones claves del proyecto tengan en cuenta al máximo los riesgos inherentes al proyecto y pueden dar lugar, si es necesario, a cambios en la estrategia del proyecto.

Los riesgos se componen de tres elementos: el evento de riesgo en sí mismo, el impacto o consecuencia y la probabilidad de que ocurra. Realizar la evaluación cualitativa de los riesgos permite analizar, comparar y priorizar los riesgos.

Las prioridades generalmente se basan en la probabilidad de que ocurra el riesgo y su impacto potencial en los objetivos específicos del proyecto o en todo el proyecto (*Project Management Institute, 2009*). A cada riesgo identificado se le asigna una

prioridad, los riesgos que tienen una alta probabilidad de ocurrencia y un alto impacto aparecen en la parte superior del registro de riesgos, que ahora se prioriza, y los de baja probabilidad y bajo impacto aparecen en la parte inferior.

La priorización de los riesgos es muy importante, ya que permite a los equipos de proyectos centrarse en los riesgos de mayor importancia.

La evaluación cuantitativa da una estimación numérica del efecto global del riesgo sobre los objetivos del proyecto. En ocasiones este análisis es costoso, requiere de un tiempo considerable y de una gran cantidad de datos para su realización, por lo que solo algunos riesgos seleccionados se someten a este tipo de análisis basado en el registro de riesgos priorizados del análisis cualitativo. Hay tres tipos principales de análisis cuantitativo que se pueden realizar:

- *Análisis de sensibilidad*: determina qué riesgos tienen el mayor impacto potencial en el proyecto.
- *Análisis de valor monetario esperado (EMV)*: se utiliza para calcular el resultado promedio de escenarios inciertos al multiplicar la probabilidad por el impacto de cada riesgo y sumarlos.
- *Modelado y simulación*: traduce las incertidumbres en un impacto potencial en los resultados del proyecto, como el costo o el cronograma. Normalmente se realiza utilizando técnicas de Monte Carlo para predecir las probabilidades de completar el proyecto en diferentes fechas y/o con diferentes costos.

Los resultados del análisis cuantitativo se utilizan para evaluar la probabilidad de éxito en el logro de los objetivos del proyecto y para estimar las reservas de contingencia.

El proceso de planificar respuestas a los riesgos determina acciones de respuesta efectivas que mejoran las posibilidades de éxito del proyecto al tiempo que se cumplen las restricciones del proyecto. Las estrategias de respuesta a los riesgos negativos pueden ser de:

- Eliminación en la que se realiza una búsqueda de un enfoque completamente diferente de la tarea eliminando así el riesgo, la probabilidad de ocurrencia sería cero.
- Transferencia: se traslada el impacto negativo del riesgo a otra parte (a un proveedor, a una aseguradora),
- Mitigación: se desarrolla un plan para reducir las consecuencias o la probabilidad de que ocurra un evento de riesgo
- Aceptación: Cuando ninguna de las otras estrategias es posible, se acepta el riesgo y se lidia con las consecuencias en caso de que ocurra.

Una vez los riesgos han sido identificados, evaluados y generado su plan de respuesta, se inicia el proceso de monitoreo y control de riesgos. El objetivo de esta etapa es rastrear los riesgos identificados, monitorear los riesgos residuales, identificar nuevos riesgos, asegurarse de que los planes de respuesta al riesgo se ejecuten en el momento apropiado y evaluar su efectividad a lo largo del ciclo de vida del proyecto.

El análisis de riesgos es la base para determinar el valor por contingencia en un estimado de costo, por lo que es vital hacer una identificación de los riesgos desde las fases tempranas del proyecto para que estos sean tenidos en cuenta en la estimación del costo, los riesgos pueden causar fallas en la ejecución de los proyectos, como retrasos o sobrecostos, no tenerlos en cuenta puede llevar al fracaso del proyecto.

## 2. TÉCNICAS DE ESTIMACIÓN

A la hora de definir la técnica de estimación de costos hay varios factores que influyen en la selección de la técnica como lo es el tamaño del proyecto, la complejidad del proyecto, la fiabilidad y precisión del método o técnica, los recursos necesarios para realizar el estimado, la información disponible del proyecto, el tiempo requerido de la técnica para la estimación.

Es importante conocer las técnicas existentes para realizar los estimados, así como sus características, con el fin de aplicarlas correctamente.

### ▪ Metodología

Se realizó una revisión bibliográfica en bases de datos científicas de las técnicas y herramientas empleadas para estimar los costos en diferentes tipos de proyectos, inicialmente se encontraron 3095 artículos, los cuales se fueron depurando de acuerdo con criterios como: año de publicación, idioma, tipo de documento. Debido a la cantidad de documentos obtenidos en la búsqueda inicial se hace una preselección realizando una revisión de los títulos y resúmenes de los artículos para asegurar que estos sean acordes a la temática del proyecto de investigación.

En el capítulo 2 se presenta la información obtenida y las características de cada técnica o herramienta. En una segunda etapa se pretende clasificar éstas de acuerdo con la clase de estimado de costo en la que es más acorde su aplicación.

### 2.1. ESTIMACIÓN ANÁLOGA

La estimación análoga se realiza con base a proyectos con características similares desarrollados anteriormente, utiliza parámetros de un proyecto anterior, tales como el alcance, costo, duración, presupuesto, tamaño y complejidad, como base para estimar los mismos parámetros (*Project Management Institute, 2017*).

La estimación del costo del nuevo proyecto emplea como base el costo real de proyectos similares anteriores, cuanto más similares sean los proyectos, más precisa será la estimación. En la estimación análoga se debe evaluar el impacto de

nuevos factores del proyecto frente al proyecto anterior como cambios en el alcance, mano de obra, materia prima o tecnología requerida.

Esta técnica requiere poco tiempo y costos para su realización, se basa en la experiencia y el juicio del estimador para estimar el costo, sin embargo, no es muy exacta, se puede emplear en la fase inicial del proyecto cuando es limitada la información disponible.

## **2.2. ESTIMACIÓN PARAMÉTRICA**

El modelado de costos paramétricos consiste en desarrollar un modelo basado en relaciones lógicas o estadísticas de los principales factores de costos extraídos mediante la realización de técnicas cualitativas (*Elmousalami et al., 2018a*).

Este modelo se utiliza para expresar una variable dependiente (*costo*) en términos de variables independientes que impulsan el costo, empleando datos históricos para determinar el costo del nuevo proyecto.

Es una herramienta extremadamente útil para preparar estimaciones paramétricas tempranas, cuando hay pocos datos técnicos o entregables de ingeniería que proporcionan una base para usar métodos de estimación más detallados. El uso del modelo paramétrico ayuda a evitar los errores y omisiones comunes en los procedimientos tradicionales de estimación de costos, particularmente durante las fases de planificación y diseño temprano.

Esta técnica es confiable cuando la información histórica que se emplea es precisa, los modelos de datos utilizados en la preparación de una estimación paramétrica son esenciales para el proceso. Antes de que se pueda generar una estimación paramétrica, se deben crear modelos de datos de estimación; los requisitos básicos del modelo se basan en datos cuantitativos de proyectos estimados en el pasado (*Jrade & Alkass, 2007*).

La estimación paramétrica consta de dos pasos, primero se deben de identificar las características o parámetros de un proyecto anterior que puede estar directamente

relacionado con el desarrollo del proyecto actual y que tengan una correlación con costos históricos; el siguiente paso es definir la naturaleza matemática de esa relación (*Venkataraman & Pinto, 2008a*), con ecuaciones que describen las posibles relaciones que pueden existir entre las variables que forman parte de un proyecto, a partir de técnicas estadísticas y simulación.

Los niveles de precisión para esta técnica dependen en gran medida de la sofisticación y los datos subyacentes integrados en el modelo (*Marzouk & Elkadi, 2016*).

En el área de construcción se emplea el método del costo unitario, a partir de datos históricos de costos de construcción se obtiene una estimación del costo por pie o metro cuadrado del tipo de edificio en consideración. El costo unitario estimado se multiplica por el área del edificio propuesto después de ajustarse por factores como la ubicación, el tamaño y la calidad esperada del edificio propuesto (*Jrade & Alkass, 2007*).

En plantas químicas la estimación del costo unitario se puede hacer a partir de la capacidad o tamaño de la planta.

Entre las limitaciones que presenta la estimación paramétrica se encuentran (*Scanlan et al., 2002*):

- Se requiere un volumen significativo de datos históricos para identificar relaciones paramétricas de una manera estadísticamente significativa.
- Los datos de costos históricos deben ser cuidadosamente normalizados para evitar errores.
- Los nuevos procesos de fabricación y los cambios significativos en los métodos pueden invalidar las relaciones paramétricas.
- Los métodos paramétricos tienen una resolución limitada y no se pueden usar más allá de los componentes para los cuales han sido validados.

### 2.3. MÉTODO DE ESTIMACIÓN POR ESCALACIÓN DE CAPACIDAD

Este método se usa para estimar el costo de un proyecto a partir del costo real de una instalación completa similar de capacidad conocida. Se emplea la siguiente ecuación para estimar el costo:

$$Costo_{nuevo\ proyecto} = \left( \frac{Capacidad\ nuevo\ proyecto}{Capacidad\ proyecto_i} \right)^n * Costo_{proyecto\ i} \quad Eq. 2$$

La ecuación se supone para un mismo período de tiempo y ubicación, por lo que los resultados deben ajustarse mediante el uso de un índice de escalación como el índice de costos.

El factor de capacidad de costo ( $n$ ) tiene un valor promedio de 0.6 para la mayoría de las plantas y equipos, se conoce como el método de las seis décimas, sin embargo, el factor puede variar en un rango más amplio de valores, se hace necesario emplear el factor “ $n$ ” ya que por lo general los costos no crecen en la misma proporción que el tamaño o la capacidad.

Este método es de fácil aplicación, se debe emplear para proyectos con una tecnología similar, y solo para estimaciones de orden de magnitud en la etapa inicial del proyecto debido a que la precisión de este método es baja.

Se han establecido diferentes valores para el factor de capacidad para diversos tipos de plantas de proceso, en la Tabla 10 se presentan los factores de algunos tipos de plantas recopilado por diversos autores (*AACE International, 2011; Arata, 2009; Humphreys, 2005*).

*Tabla 10. Factor de Capacidad para Plantas de Procesos*

Planta Química (Producto o proceso)	Factor de Capacidad (n)
Acetato de vinilo	0.65
Acetaldehido	0.70
Acetileno	0.68
Acetona	0.45
Ácido Acético	0.68
Ácido Clorhídrico	0.68
Ácido Fosfórico	0.60
Ácido Nítrico	0.60
Ácido Sulfúrico	0.65
Acrilonitrilo	0.60
Alcoholación	0.60
Amoníaco	0.71
Azufre	0.65
Benceno	0.61
Butadieno	0.68
Cloro	0.45
Cloruro de Polivinilo	0.60
Cloruro de Vinilo	0.80
Craqueo Catalítico	0.55
Craqueo Térmico	0.70
Estireno	0.60
Etanol	0.73
Etileno	0.58
Fenol	0.75
Formaldehído	0.55
Glicol	0.75
Hidrógeno	0.75
Metanol	0.60
Nitrato de Amonio	0.65
Oxido de Etileno	0.78
Peróxido de hidrógeno	0.75
Polietileno	0.65
Polimerización	0.58
Polipropileno	0.70
Propileno	0.70
Urea	0.70

Unidades de Refinería	Factor de Capacidad (n)
Alquilación	0.60
Coquización	0.42
Cracking	0.70
Destilación al vacío	0.70
Destilación atmosférica	0.90
Hidrotratadora	0.65
Polimerizadora	0.58
Reformadora	0.60

En muchas ocasiones las empresas tienen información del precio de equipos de proyectos anteriores, a partir de estos datos se puede estimar el precio de un nuevo equipo con diferente capacidad, pero hay que tener en cuenta que los equipos sean de características similares para que la estimación sea válida, igualmente si es necesario se debe realizar el ajuste por índice de costos.

Para la mayoría de los equipos de proceso el exponente “n” varía entre 0.4 y 0.8, tomando un valor promedio de 0.6. En la Tabla 11 se presentan algunos factores para diferentes tipos de equipos (*Couper, 2003; Peters et al., 2003; Remer & Chai, 1993; Silla, 2003*).

*Tabla 11. Factor de Capacidad para diferentes Equipos*

Equipo	Factor de Capacidad (n)
Agitador	0.30 - 0.50
Bomba centrífuga	0.52
Bomba desplazamiento positivo	0.70
Caldera	0.31
Centrifugadora	0.67
Columnas	0.65 - 0.70
Compresor	0.79
Evaporador	0.55 - 0.70
Filtro	0.60 - 0.65
Horno	0.70 - 0.85
Instrumentación	0.60
Intercambiador de Calor	0.44 - 0.60
Mezclador	0.49
Molino	0.65
Motor	0.69 - 0.80
Reactor	0.65 - 0.70
Secador de aire	0.56
Separador	0.49
Tanque	0.60 - 0.65
Torre	0.62
Unidad de Refrigeración	0.70
Ventilador centrífugo	0.44
Vessel	0.65 - 0.70

## **2.4. ESTIMACIÓN POR FACTORES**

El costo de los equipos de una planta en ocasiones son la base de varios métodos para obtener la inversión de capital de un proyecto. A partir de factores se puede estimar el costo de una planta, multiplicando el valor de los equipos por un factor o varios factores.

Es importante conocer o estimar el precio de cada equipo, en caso de que no se tenga la lista definitiva de los equipos por estar en una fase preliminar el proyecto, se puede establecer un porcentaje de costo para los equipos que aún no han sido identificados.

El precio del equipo por lo general se obtiene a partir de una orden de compra anterior, de datos publicados de los equipos y de cotizaciones de los proveedores, de ser necesario se debe realizar la escalación por capacidad y el ajuste por índice de costos, con el fin de obtener un estimado más preciso.

La estimación por factores puede llegar a ser bastante precisa si se emplean los factores del equipo apropiados, si se ha aplicado el ajuste correcto y si la lista de equipos es completa y exacta. Por lo general, esta técnica de estimación se emplea en la etapa inicial del proyecto para obtener estimados de costos de orden de magnitud.

Diversos autores han establecido factores para realizar las estimaciones de costo, a continuación, se presentan algunos de los más empleados.

### **2.4.1. Factores de Lang**

Hans J. Lang estableció en 1947 que el costo de una planta de proceso se puede obtener multiplicando el costo de los equipos por algún factor para aproximar el valor fijo o la inversión de capital total.

La inversión de capital es la cantidad total de dinero requerido para poner en marcha la planta y dar inicio al proceso productivo, equipos e instalaciones necesarias.

Los factores de Lang varían según el tipo de planta de proceso que se considere, originalmente para una planta de procesamiento de sólidos el factor era de 3.1, para

planta de fluidos y sólidos 3.63, para planta de procesamiento de fluidos 4.74 (Humphreys, 2005), sin embargo, estos valores han sido modificados con el tiempo. El costo obtenido por Lang no incluye la adquisición de terrenos, infraestructura que no sea del proceso ni el valor de contingencia.

En la Tabla 12 se presenta un desglose de los factores de Lang publicados por la Asociación Americana de Ingeniería de Costos (AAACE International, 2011), el factor para una planta de sólidos es de 3.89, para planta de fluidos y sólidos 4.22, para planta de procesamiento de fluidos 5.04, a partir de la tabla se puede observar que con estos factores los costos directos representan un 59% del costo total, y los costos indirectos un 41%.

*Tabla 12. Factores de Lang para costos directos e indirectos de Plantas de Proceso*

<b>COSTOS DIRECTOS</b>	<b>PLANTA DE PROCESAMIENTO DE SÓLIDOS</b>			<b>PLANTA DE PROCESAMIENTO DE FLUIDOS - SÓLIDOS</b>			<b>PLANTA DE PROCESAMIENTO DE FLUIDOS</b>		
	<b>Material</b>	<b>Mano de Obra</b>	<b>Total</b>	<b>Material</b>	<b>Mano de Obra</b>	<b>Total</b>	<b>Material</b>	<b>Mano de Obra</b>	<b>Total</b>
Compra de Equipo	1.000	N/A	1.00	1.000	N/A	1.00	1.000	N/A	1.00
Ajuste de equipo	0.014	0.024	0.04	0.014	0.024	0.04	0.014	0.024	0.04
Desarrollo del sitio	0.016	0.029	0.05	0.016	0.029	0.05	0.016	0.029	0.05
Hormigón	0.038	0.054	0.09	0.031	0.059	0.09	0.028	0.052	0.08
Acero estructural	0.106	0.050	0.16	0.103	0.040	0.14	0.100	0.030	0.13
Edificios	0.016	0.006	0.02	0.016	0.006	0.02	0.016	0.006	0.02
Tubería	0.200	0.160	0.36	0.307	0.242	0.55	0.520	0.450	0.97
Instrumentación y control	0.100	0.200	0.30	0.100	0.215	0.32	0.140	0.280	0.42
Eléctrico	0.109	0.086	0.20	0.109	0.086	0.20	0.088	0.072	0.16
Aislamiento	0.020	0.004	0.02	0.030	0.004	0.03	0.060	0.012	0.07
Pintura	0.009	0.060	0.07	0.009	0.060	0.07	0.008	0.050	0.06
<b>Total Costos Directos =</b>	<b>1.63</b>	<b>0.67</b>	<b>2.30</b>	<b>1.74</b>	<b>0.77</b>	<b>2.50</b>	<b>1.99</b>	<b>1.01</b>	<b>3.00</b>
<b>COSTOS INDIRECTOS</b>									
Mano de obra indirecta & Costos de campo	0.160	0.392	0.55	0.176	0.424	0.60	0.220	0.500	0.72
Contratista de Ingeniería & Honorarios	0.015	0.703	0.72	0.016	0.759	0.78	0.020	0.890	0.91
Ingeniería & Supervisión	0.080	0.242	0.32	0.082	0.267	0.35	0.085	0.330	0.42
<b>Total Costos Indirectos =</b>	<b>0.26</b>	<b>1.34</b>	<b>1.59</b>	<b>0.27</b>	<b>1.45</b>	<b>1.73</b>	<b>0.33</b>	<b>1.72</b>	<b>2.05</b>
<b>COSTO TOTAL</b>	<b>1.88</b>	<b>2.01</b>	<b>3.89</b>	<b>2.01</b>	<b>2.22</b>	<b>4.22</b>	<b>2.32</b>	<b>2.73</b>	<b>5.04</b>

Se han realizado varias investigaciones para evaluar la precisión de los factores de Lang, se ha encontrado una gran variabilidad frente al costo real de una planta con errores promedio entre el 30% y 60%, con lo que se podría concluir que este método es solo válido para estimación de Costos Clase V y Clase IV (*Wain, 2014*).

Al realizar estimaciones por factores la precisión es mayor cuando se usan factores individuales más específicos para los componentes principales de la planta, además, permite una comprensión más detallada de dónde están los costos en una estimación del costo total de la planta permitiendo un mejor control del costo.

### 2.4.2. Método de Hand

El método de Hand es una modificación al método de Lang, define factores a los equipos en lugar del tipo de proceso de la planta. Hand agrupa los equipos de acuerdo con sus características, a cada clase de equipo le corresponde un factor apropiado, esta diferenciación se debe a que no todos los equipos requieren la misma cantidad de cimientos, aislamiento, mano de obra, entre otros factores para su instalación.

Hand determinó estos multiplicadores analizando varias estimaciones detalladas de plantas del mismo tipo. El costo de la planta se obtiene como la sumatoria del producto entre el costo del equipo y el factor correspondiente. Este método tampoco incluye un factor para la contingencia.

En la Tabla 13 se presenta los factores de Hand para diferentes equipos.

*Tabla 13. Factores de Hand*

Tipo de Equipo	Factor (fi)
Bombas	4.0
Calentadores	2.0
Columnas de Fraccionamiento	4.0
Compresores	2.5
Instrumentos	4.0
Intercambiador de Calor	3.5
Misceláneos	2.5
Recipiente a presión	4.0

**Fuente:** *Adaptado de Process Engineering Economics (Couper, 2003).*

Para una mejor precisión de este método, los factores deben derivarse de instalaciones recientes o de estimaciones detalladas para una ubicación determinada.

### 2.4.3. Método de Wroth

Posteriormente, Wroth publicó una lista más detallada de equipos con sus respectivos factores, el costo de la planta se calcula de la misma manera que el método anterior. El costo obtenido incluye el costo de las tuberías, desarrollo del sitio, instalaciones eléctricas, pintura, cimientos, estructuras, honorarios del contratista, ingeniería, gastos generales y supervisión. Los resultados obtenidos con este método son más precisos. En la Tabla 14 se presentan los factores de Wroth.

*Tabla 14. Factores de Wroth*

<b>Tipo de Equipo</b>	<b>Factor (fi)</b>
Bombas	
Centrífuga	6.5 - 7.0
Desplazamiento positivo	5.0
Centrífugas (proceso)	2.0
Compresor	
Centrífugo	2.0
Alternativo	2.3
Eyector (unidades al vacío)	2.5
Hornos	2.0
Instrumentos	4.1
Intercambiador de Calor	4.8
Mezclador	2.0
Motor eléctrico	3.5
Sopladores y Ventiladores (con motor incluido)	2.5
Tanques	
Proceso	4.1
Almacenamiento	3.5
Prefabricado y montado en sitio	2.0
Torres	4.0
Unidad de Refrigeración	2.5

**Fuente:** *Adaptado de Process Engineering Economics (Couper, 2003)*

#### **2.4.4. Método de Chilton**

El método Chilton utiliza múltiples factores donde los rangos entre los cuales se pueden elegir los factores se determinan por las características de la planta (*Oexmann & Kather, 2009*).

Este método se desarrolló basándose en una gran cantidad de plantas de proceso químicas. A partir de múltiples factores se puede obtener una estimación de la inversión de capital fijo de una planta a límites de batería.

El primer paso de este método es calcular el costo de los equipos requeridos, luego se obtiene el costo del equipo instalado al aplicar un factor de 1.43 al costo del equipo. Posteriormente, se aplican factores individuales al costo del equipo instalado para obtener el costo de las tuberías de proceso, instrumentación, edificios y desarrollo de sitio, líneas exteriores, la suma de todos los factores anteriores junto con el costo del equipo instalado da como resultado el costo total de la planta física. Sobre el valor del costo total de la planta física se aplican otros factores para calcular el costo de la ingeniería, construcción, contingencias, se hace un ajuste por el tamaño de la planta, y finalmente se obtiene el Costo de la Inversión de Capital Fijo de la planta.

En la Tabla 15 se presentan los factores del método Chilton.

Tabla 15. Factores del método de Chilton.

Ítem	Factor	% del ítem
<b>1. Costo del Equipo</b>	1.0	1
<b>2. Costo de Instalación de Equipo</b>	1.43	1
<b>3. Tuberías de proceso</b>		
Tipo de planta		
Sólidos	0.07 - 0.10	2
Sólidos-Fluidos	0.10 - 0.30	2
Fluidos	0.30 - 0.60	2
<b>4. Instrumentación- Automatización</b>		
Ninguna	0.03 - 0.05	2
Alguna	0.05 - 0.12	2
Completa	0.12 - 0.20	2
<b>5. Edificios y Desarrollo del Sitio</b>		
Unidades Exteriores	0.10 - 0.30	2
Unidades Mixtas (Exteriores-Interiores)	0.20 - 0.60	2
Unidades Interiores	0.60 - 1.00	2
<b>6. Servicios Auxiliares</b>		
Ninguna adición	0	2
Adiciones menores	0 - 0.05	2
Adiciones mayores	0.05 - 0.75	2
Nuevas instalaciones	0.25 - 1.00	2
<b>7. Líneas Exteriores</b>		
Unidades integradas	0 - 0.05	2
Unidades separadas	0.05 - 0.15	2
Unidades dispersas	0.15 - 0.25	2
<b>8. Costo Total de la Planta Física</b>	<b>∑ ítems 2-7</b>	
<b>9. Ingeniería y Construcción</b>		
Complejidad: Simple	0.20 - 0.35	8
Complejidad: Complicada	0.35 - 0.60	8
<b>10. Contingencias</b>		
Proceso definido	0.10 - 0.20	8
Proceso sujeto a cambio	0.20 - 0.30	8
Proceso especulativo	0.30 - 0.50	8
<b>11. Tamaño de la Planta</b>		
Unidad grande	0 - 0.05	8
Unidad pequeña	0.05 - 0.15	8
Unidad experimental	0.15 - 0.35	8
<b>12. Costo de la Inversión de Capital Fijo</b>	<b>∑ ítems 8-11</b>	

### 2.4.5. Método Peters-Timmerhaus

El método de Peters-Timmerhaus estima la inversión de capital fijo e inversión total de capital, al igual que los métodos anteriores se requiere la determinación del costo de los equipos.

Los elementos de los costos directos como tuberías, instrumentación, edificios, entre otros, así como los costos indirectos tales como ingeniería, honorarios, gastos de construcción y contingencia se estiman como un porcentaje del costo total de los equipos. Se incluye además un porcentaje para estimar el capital de trabajo requerido para que opere la planta (*Peters et al., 2003*).

Al igual que en el método de Lang se hace distinción al tipo de planta de proceso. En la Tabla 16 se puede observar el rango de porcentaje típico del total de la inversión de capital fijo que presentan ciertos componentes en una planta.

*Tabla 16. Porcentajes típicos de la inversión de capital fijo para segmentos de costos directos e indirectos.*

COMPONENTE	% Costo Total
<b>COSTOS DIRECTOS</b>	
Compra de Equipos	15 - 40
Instalación de Equipos	6 - 14
Instrumentación y Control	2 - 12
Tuberías	4 - 17
Sistema Eléctrico	2 - 10
Edificios	2 - 18
Preparación y Mejora de Sitio	2 - 5
Instalaciones de Servicios	8 - 30
Terreno	1 - 2
<b>COSTOS INDIRECTOS</b>	
Ingeniería & Supervisión	4 - 20
Gastos de Construcción	4 - 17
Gastos legales	1 - 3
Honorarios del Contratista	2 - 6
Contingencia	5 - 15

*Fuente: Adaptado de Plant Design and Economics for Chemical Engineers (Peters et al., 2003).*

En la Tabla 17 se presentan los porcentajes del método Peters-Timmerhaus.

*Tabla 17. Factores de proporción para estimar elementos de inversión de capital basados en el costo del equipo.*

	PLANTA DE PROCESAMIENTO DE SÓLIDOS	PLANTA DE PROCESAMIENTO DE FLUIDOS - SÓLIDOS	PLANTA DE PROCESAMIENTO DE FLUIDOS
	Porcentaje del Costo de Equipo (%)		
<b>COSTOS DIRECTOS</b>			
Costo de Equipos	100	100	100
Instalación de Equipos	45	39	47
Instrumentación y Control	18	26	36
Tuberías	16	31	68
Sistema Eléctrico	10	10	11
Edificios	25	29	18
Preparación y Mejora de Sitio	15	12	10
Instalaciones de Servicios	40	55	70
<b>TOTAL COSTOS DIRECTOS</b>	<b>269</b>	<b>302</b>	<b>360</b>
<b>COSTOS INDIRECTOS</b>			
Ingeniería & Supervisión	33	32	33
Gastos de Construcción	39	34	41
Gastos legales	4	4	4
Honorarios del Contratista	17	19	22
Contingencia	35	37	44
<b>TOTAL COSTOS INDIRECTOS</b>	<b>128</b>	<b>126</b>	<b>144</b>
Inversión de capital fijo	397	428	504
Capital de trabajo	70	75	89
<b>TOTAL INVERSIÓN DE CAPITAL</b>	<b>467</b>	<b>503</b>	<b>593</b>

*Fuente: Adaptado de Plant Design and Economics for Chemical Engineers (Peters et al., 2003).*

#### **2.4.6. Método de Holland**

Al igual que los anteriores métodos se basa en el costo del equipo, en la Tabla 17 se presentan el rango de los factores de instalación del equipo dependiendo del tipo de planta de procesamiento.

Tabla 18. Factores del Método Holland

<b>Ctc</b>	<b>Costo de Capital Fijo de la Planta</b>	<b><math>Ctc = \phi_1 \phi_2 \phi_3 C_{eq}</math></b>
<b>Ceq</b>	<b>Costo de los Equipos</b>	
$\phi_1 =$	1.45	Planta de procesamiento de sólidos
$\phi_1 =$	1.39	Planta de procesamiento de Sólidos-Fluidos
$\phi_1 =$	1.47	Planta de procesamiento de Fluidos
$\phi_2 =$	$1 + f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5$	
$\phi_3 =$	$1 + f_6 + f_7 + f_8$	
<b>Rango de Factores para Tuberías</b>		
$f_1 =$	0.07 - 0.10	Planta de Procesamiento de Sólidos
$f_1 =$	0.10 - 0.30	Planta de Procesamiento de Fluidos
$f_1 =$	0.30 - 0.60	Planta de Procesamiento de Sólidos - Fluidos
<b>Rango de Factores para Instrumentación</b>		
$f_2 =$	0.02 - 0.05	Poco Control Automático
$f_2 =$	0.05 - 0.10	Mayor Control Automático
<b>Rango de Factores para Edificios/Construcciones</b>		
$f_3 =$	0.05 - 0.20	Unidades Exteriores
$f_3 =$	0.20 - 0.60	Unidades Mixtas (Exteriores-Interiores)
$f_3 =$	0.60 - 1.00	Unidades Interiores
<b>Rango de Factores para Instalaciones</b>		
$f_4 =$	0 - 0.05	Adiciones menores
$f_4 =$	0.05 - 0.25	Adiciones mayores
$f_4 =$	0.25 - 1.00	Instalación nueva
<b>Rango de Factores para Líneas Exteriores</b>		
$f_5 =$	0 - 0.05	Planta Existente
$f_5 =$	0.05 - 0.15	Unidades separadas
$f_5 =$	0.15 - 0.25	Unidades dispersas
<b>Rango de Factores para Ingeniería &amp; Construcción</b>		
$f_6 =$	0.20 - 0.35	Planta Sencilla
$f_6 =$	0.35 - 0.50	Planta Compleja
<b>Rango de Factores para Tamaño de la Planta</b>		
$f_7 =$	0 - 0.05	Planta grande
$f_7 =$	0.05 - 0.15	Planta pequeña
$f_7 =$	0.15 - 0.35	Unidades experimentales
<b>Rango de Factores para Contingencias</b>		
$f_8 =$	0.10 - 0.20	Proceso definido
$f_8 =$	0.20 - 0.30	Proceso sujeto a cambio
$f_8 =$	0.30 - 0.50	Proceso tentativo

En general, la estimación por factores se recomienda solo para estimaciones conceptuales o aquellos casos en los que hay información confiable disponible sobre el costo real de proyectos similares, la base de estos métodos es el costo de los equipos por lo que se hace fundamental tener una lista confiable de todos los equipos, así como también una correcta estimación de su costo.

## **2.5. ESTIMACIÓN ASCENDENTE: BOTTOM UP**

La técnica de estimación ascendente también conocida como costo basado en actividades (ABC) se basa en la premisa de que los proyectos consumen actividades y las actividades consumen recursos, para hacer la estimación del costo del proyecto a partir de este enfoque se requiere tener elaborada la estructura de desglose de trabajo (*WBS*) detallada que identifique todos los elementos del proyecto.

Los entregables de trabajo se descomponen en componentes más pequeños, seguidos de una división adicional en las tareas de trabajo necesarias para desarrollar esos entregables, se prepara una estimación de lo que se necesita para cumplir con los requisitos de cada una de las piezas de trabajo más bajas, se asignan costos directos e indirectos asociados con la mano de obra, los materiales y los gastos generales para cada componente (*Venkataraman & Pinto, 2008b*).

Se agrupan las estimaciones de costo de cada elemento inferior hacia arriba a través de la estructura de desglose del trabajo del proyecto, se obtiene el estimado de costo de cada paquete de trabajo para finalmente obtener el estimado general de todo el proyecto. La descomposición reduce la incertidumbre inherente a la estimación al reducir la complejidad de la tarea de estimación.

Es una estimación detallada en la que cada componente o grupo de componentes ha sido analizado cuantitativamente y procesado con el mayor nivel de detalle posible, utilizando el precio unitario más realista disponible.

La estimación ascendente generalmente proporciona estimaciones de costos más precisas, pero es necesario contar con información detallada del proyecto, por lo general se emplea en las etapas finales del proyecto para dar estimados definitivos (*Henry et al., 2007*).

## **2.6. ESTIMACIÓN POR ANÁLISIS DE REGRESIÓN**

Una de las técnicas más útiles para evaluar y pronosticar valores es el análisis de regresión, se adopta con el propósito de desarrollar ecuaciones de estimación de costos paramétricos, y su objetivo principal es construir una ecuación matemática que estime el costo en función de variables independientes o parámetros que inciden en el costo.

Los modelos de regresión están destinados a encontrar la combinación de variables independientes que mejor se correlacione con las variables dependientes.

El análisis de regresión no necesita información detallada del proyecto para la estimación de costos, por lo tanto, puede reducir significativamente el tiempo para la estimación de costos con un gasto mínimo (*Jin et al., 2014*). Mediante un análisis relativamente simple, el análisis de regresión podría identificar los impactos de las variables independientes en la variable dependiente.

Debido a que el análisis de regresión múltiple contiene muchas variables independientes, es más completo, proporciona una estimación más precisa y también reduce el error de estimación. Sin embargo, su uso generalmente implica la suposición de que el efecto de interacción y multicolinealidad no existe (*Ji et al., 2010*). La multicolinealidad es la relación de dependencia lineal fuerte entre dos o más variables independientes, ocurre cuando las variables están demasiado correlacionadas.

Por otro lado, el análisis de regresión necesita una decisión a priori sobre la clase de relación que hay entre las variables independientes y la variable dependiente que se utilizará en el modelo, una relación lineal o no lineal.

Algunos investigadores describen las desventajas de los modelos de estimación de regresión como (G. H. Kim et al., 2004):

- No tienen un enfoque específico, o claramente definido, que ayude a los estimadores a elegir el modelo de costo que mejor se ajuste a los datos históricos para una aplicación de estimación de costo dada.
- Se asume que cierto tipo de ecuaciones múltiples y sus datos son adecuados para las ecuaciones de regresión.
- Las variables que influyen en la estimación deben revisarse de antemano y también es difícil utilizar una gran cantidad de variables de entrada.
- Las técnicas basadas en regresión requieren una forma matemática definida para la función de costo que mejor se ajuste a los datos históricos disponibles.

Los modelos de regresión de costo se han utilizado para estimar el costo desde la década de 1970 porque tienen la ventaja tener una base matemática bien definida, así como medidas de qué tan bien el modelo coincide con un conjunto de datos dados.

El análisis de regresión múltiple se puede representar de la siguiente manera:

$$Y = B_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n + \varepsilon$$

*Eq. 3*

donde **Y** es el costo total estimado, **X<sub>n</sub>** son los valores que toma cada variable, **B<sub>0</sub>** es la constante estimada, **b<sub>n</sub>** son los coeficientes estimados por análisis de regresión, y  $\varepsilon$  representa el error.

Para medir la precisión y calidad de un modelo se emplean diferentes estadísticos de prueba:

- *Coeficiente de Determinación ( $R^2$ ):* es el porcentaje de variación de la variable de respuesta que explica su relación con una o más variables predictoras. Usualmente, mientras mayor sea  $R^2$ , mejor será el ajuste del modelo a sus datos. Se debe ajustar al número de predictores en el modelo.
- *Desviación absoluta media (MAD):* es una medida que se utiliza para calcular cuánto varían de su media los valores de un conjunto de datos.
- *Error porcentual absoluto medio (MAPE):* mide el tamaño del error absoluto en términos porcentuales, se calcula como el promedio de las diferencias absolutas entre los valores pronosticados y los reales.
- *Error cuadrático medio (RMSE):* Es el promedio de los cuadrados de la diferencia entre el valor pronosticado y el real.

### 2.6.1. Regresión de Mínimos Cuadrados

La regresión de mínimos cuadrados es un método de análisis estadístico que estima la relación entre una o más variables independientes y la variable dependiente minimizando la suma de cuadrados de la diferencia entre los valores observados y pronosticados de la variable dependiente (*Pamulaparthi et al., 2016*).

Es el método más utilizado para desarrollar relaciones predictivas lineales, incluidas las relaciones de costos y las relaciones de ingeniería.

La mejor relación o modelo de regresión será el que tenga la menor suma de los cuadrados del error (SSE):

$$SSE = \sum (y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad \text{Eq. 4}$$

Donde  $y_i$  representa los valores observados o reales, y,  $\hat{Y}$  el valor estimado por el modelo.

Cuando hay una gran cantidad de observaciones y estas se encuentran dispersas, el método de mínimos cuadrados subestima las observaciones más grandes y sobreestima las observaciones más pequeñas.

La regresión de mínimos cuadrados se basa en que los datos siguen una distribución normal y esto no siempre ocurre. Otra de las desventajas importantes del método, es que es sensible a la presencia de valores atípicos, por lo que es necesario detectar y eliminar los datos atípicos del análisis, de lo contrario el costo estimado no será preciso.

### **2.6.2. Regresión por Cuantiles**

La regresión cuantil es la estimación de los cuantiles de la distribución condicional. Modela la relación entre un conjunto de variables independientes y los cuantiles específicos de la variable de respuesta. La forma prominente de regresión cuantil es la mediana.

La regresión por cuantiles es robusta a los valores atípicos, uno o más valores atípicos lejos del resto de los datos tienen un impacto mínimo en los valores pronosticados, esta regresión no hace ninguna suposición sobre la distribución de la variable respuesta.

Es el método preferido de análisis cuando los datos son grandes y dispersos, es menos sensible a los valores atípicos que la regresión por Mínimos Cuadrados.

### **2.6.3. Modelos de regresión utilizando datos transformados**

Existen modelos de regresión en los cuales los datos son transformados previo a su análisis de regresión, entre los modelos se encuentran: modelo cuadrático, modelo recíproco, modelo semi-log y modelo de potencia.

Estudios realizados han demostrado que los modelos de semi-log pueden producir un modelo más preciso que el modelo de regresión simple (*Stoy et al., 2012*). En otro estudio se compararon los modelos transformados mencionados anteriormente y el modelo de regresión lineal estándar, para predecir el costo conceptual de un canal, se determinó que el modelo más preciso es el modelo cuadrático, donde se realizó una transformación de la variable dependiente tomando la raíz cuadrada (*Elmousalami et al., 2018b*). Este modelo mostró un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) ajustado de 0.857 y MAPE de 9.12%.

## **2.7. INTELIGENCIA ARTIFICIAL**

Los métodos de estimación tradicionales se ven obstaculizados para estimar los costos del proyecto por la gran cantidad de variables e interacciones significativas entre estas variables. Se busca que el estimado sea preciso para evitar incurrir en sobrecostos durante el desarrollo del proyecto.

Mejorar la precisión de la predicción es un requisito principal para desarrollar el modelo de estimado de costos. La falta de datos, los valores de datos faltantes, la incertidumbre, la complejidad computacional y la interpretación del modelo son desafíos claves durante el modelado.

Además, en algunos casos, el costo estimado se obtiene con base al juicio personal o la experiencia pasada, lo que puede dar lugar a sesgos e inexactitudes. Para superar el sesgo del juicio humano, la inteligencia artificial entra en juego.

La inteligencia artificial permite que las computadoras y las máquinas imiten las capacidades de percepción, aprendizaje, resolución de problemas y toma de decisiones de la mente humana.

La inteligencia artificial incluye técnicas importantes para automatizar la estimación de costos con una alta precisión basada en datos recopilados de proyectos anteriores, entre las técnicas se encuentran: razonamiento basado en casos (*CBR*), redes neuronales artificiales (*ANN*), lógica difusa (*FL*), algoritmos genéticos (*GA*), máquina de vectores de apoyo (*SVM*), árboles de refuerzo escalables (*XGBoost*), árbol de dicción (*DT*), Random Forest (*RF*), computación evolutiva (*EC*) y modelos híbridos.

### **2.7.1. Modelo de red neuronal artificial (ANN)**

Las redes neuronales artificiales son modelos computacionales inspirados en la estructura y funcionalidad del sistema neuronal humano, son sistemas informáticos que simulan el proceso de aprendizaje del cerebro humano, al contrario de las técnicas de modelado tradicionales, como el análisis de regresión, los modelos ANN tienen la capacidad de aproximar funciones no lineales a una precisión específica.

Se utiliza como herramienta de modelado de datos estadísticos no lineales para modelar relaciones complejas entre entradas (*variables independientes*) y salidas (*variables dependientes*). Las ANN son la herramienta preferida para muchas aplicaciones de minería de datos predictivas debido a su potencia, flexibilidad y facilidad de uso (*Marzouk & Elkadi, 2016*). Las redes neuronales predictivas son particularmente útiles en la estimación de costos, tienen la capacidad de aprender de conjuntos de datos incompletos no lineales para predecir casos nuevos con una precisión aceptable incluso en las fases iniciales del proyecto. Una de las características distintivas de ANN es su capacidad de aprender de la experiencia y luego adaptarse a situaciones cambiantes.

Para realizar el estimado, el primer paso es determinar los factores que inciden en el costo, los cuales serán los parámetros de entrada del modelo. Luego se recolecta información de proyectos pasados para realizar la estimación, de estos datos dependerá el rendimiento y la calidad del modelo. Los modelos de redes neuronales necesitan muchos datos históricos para obtener un buen rendimiento.

La red neuronal está construida con tres capas: capa de entrada, capa oculta y capa de salida. Cada capa consta de nodos, cada nodo en la capa de entrada representa una variable independiente y aporta el valor en la red. Los nodos en las capas ocultas combinan y transforman los valores para que coincidan con la variable dependiente en la capa de salida. El modelo requiere una fase de entrenamiento y otra de validación, de los datos históricos disponibles un porcentaje se emplea para la fase de entrenamiento y los datos restantes para la fase de validación.

- La **fase de entrenamiento** usa un conjunto de datos para determinar los pesos (parámetros) que definen el modelo de red neuronal, consta de dos etapas, capacitación y optimización, en la primera se capacita a la red con una serie de casos con valores de salida conocidos, se utiliza de manera reiterada un algoritmo de aprendizaje que irá modificando los pesos de las interconexiones entre los nodos de la red una y otra vez hasta encontrar el

conjunto de ellos que consiga que con los datos suministrados se obtengan los resultados requeridos, al inicio los pesos tienen un valor aleatorio. Por otro lado, en la etapa de optimización se busca la mejor arquitectura de red y parámetros que minimice el error entre la salida obtenida por la red neuronal y la salida deseada. Cuando la red es analizada y ofrece un rendimiento óptimo, ya está lista para trabajar.

- La **fase de validación** prueba el rendimiento de la red empleando nuevos datos o casos diferentes a los utilizados en la fase de entrenamiento. La red deberá ser capaz de generalizar y dar respuestas correctas ante nuevos patrones, en esta fase no se realizan ajustes a los pesos, la red dará una respuesta a partir de los pesos establecidos durante el entrenamiento. El objetivo de esta fase es asegurar que el modelo desarrollado haya sido entrenado con éxito y que la generalización del modelo se logre adecuadamente.

Generalmente, una red está diseñada para un conjunto específico de entradas, así como salidas, el número de entradas y salidas no está restringido, lo cual es una ventaja de las ANN. El número de capas ocultas y el número de neuronas ocultas se deben definir. Se requiere dedicar un tiempo considerable a determinar el número de estas neuronas ya que necesita algunos procesos de prueba y error.

En resumen, el desarrollo de un modelo de ANN consiste en las siguientes etapas:

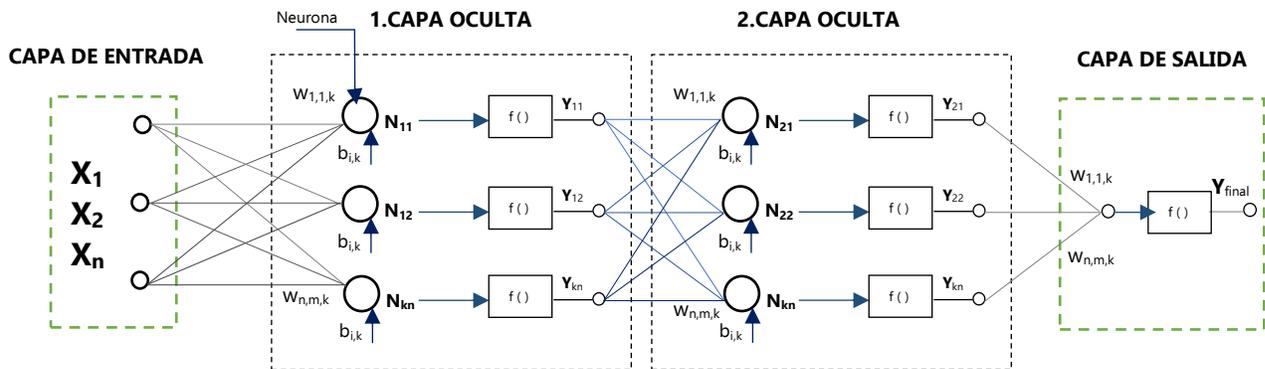
- Recopilar y preparar los casos históricos.
- Dividir los casos recopilados en un conjunto de entrenamiento y en un conjunto de validación.
- Determinar los parámetros de entrada.
- Seleccionar el número de capas ocultas.
- Seleccionar el número de neuronas en cada capa oculta.
- Seleccionar la función de transferencia.
- Establecer pesos iniciales.

- Seleccionar el algoritmo de aprendizaje para desarrollar los pesos de las ANN.
- Entrenar el modelo para varias iteraciones para obtener un error de predicción mínimo.
- Calcular el error resultante, se puede determinar a través del error porcentual absoluto medio (MAPE)

Existen varios tipos de arquitecturas de redes neuronales como: red perceptrón multicapa (MLP), red de base radial, redes neuronales de regresión generalizada, redes neuronales probabilísticas, redes de Hamming. La selección de la arquitectura de la red dependerá de las características del proyecto.

En la Figura 8 se presenta un esquema general de una red MLP.

*Figura 8. Red Perceptrón Multicapa (MLP)*



**Fuente:** Adaptado de *Artificial Intelligence and Parametric Construction Cost Estimate Modeling: State-of-The-Art Review (Elmoussalami, 2020a)*.

### **2.7.1.1      *Aplicación de redes neuronales artificiales para estimación de costos***

Entre las aplicaciones en las que se ha empleado las redes neuronales artificiales se encuentra la estimación del costo de proyectos de construcción de edificios. Para predecir los costos de construcción a partir de modelos de redes neuronales, se ha utilizado el software IBM SPSS Neural Networks 20.0

En Turquía se compararon dos métodos de estimación para proyectos de construcción: redes neuronales artificiales y el método del costo unitario por área. En el segundo método el costo aproximado del proyecto se obtiene multiplicando el área de construcción total del edificio por el costo de construcción del área unitaria previamente establecido.

Se recopilaron datos de 232 proyectos de construcción, se establecieron como parámetros de entrada del modelo ANN: costo aproximado del proyecto, área de construcción total, número de pisos del edificio, altura del edificio, valor del contrato, y, como parámetro de salida el costo real del proyecto. Como principio, cada parámetro de entrada se incluyó en el modelo de acuerdo con su turno. Por ejemplo; el segundo parámetro de entrada se incluyó para modelar en la segunda combinación. El 72% de los proyectos del total de datos se emplearon para la etapa de capacitación, mientras que los 64 proyectos restantes (28%) se utilizaron en la etapa de validación.

Para el modelo ANN las combinaciones se entrenaron a través de los métodos MLP y RBF.

Para comparar los resultados de predicción de cada método se emplearon las medidas estadísticas: error cuadrático medio (**RMSE**), el error absoluto medio (**MAE**) y coeficiente de determinación (**R<sup>2</sup>**) a partir de las siguientes ecuaciones.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{modelo,i} - y_{real,i})^2}{n}} \quad Eq. 5$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_{modelo,i} - y_{real,i}| \quad Eq. 6$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{modelo,i} - y_{real,i})^2}{\sum_{i=1}^n y_{real,i}^2}; \quad 0 \leq R^2 \leq 1 \quad Eq. 7$$

Donde “n” representa el número de datos, entre más cercano a cero sea el resultado de los errores mayor es la capacidad del modelo para estimar. Por otro lado, R<sup>2</sup> representa el porcentaje de datos representados por el modelo, entre más cercano a uno sea, la dependencia entre los valores reales y las estimaciones del modelo son más fuertes.

Se empleó el software de simulación MATLAB para modelar las tres capas. En el análisis se evaluó RMSE, MAE, R<sup>2</sup> para diferentes cantidades de neuronas en la capa oculta y de iteraciones en cada combinación; con el fin de establecer la estructura óptima del modelo.

Los resultados óptimos del método MLP se obtuvieron en la quinta combinación que consta de cinco parámetros de entrada, 6 capas ocultas, 5 iteraciones, se obtuvo la arquitectura de red neuronal en forma de (5-6-1) y un **R<sup>2</sup>** 0.9880. Los resultados óptimos para el método RBF también se obtuvieron de la quinta combinación, que consta de 9 capas ocultas, el valor mínimo del error se obtuvo de la forma de arquitectura de red neuronal de (5-9-1) con un **R<sup>2</sup>** de 0.9871 (Bayram et al., 2016).

En ambos modelos de ANN la correlación entre los valores reales y los valores estimados fue demasiado fuerte, se encontró que los costos estimados a través de MLP eran más altos que los costos reales totales con una variación promedio de 1.11%, mientras que los costos estimados a través de RBF tuvieron una variación

de 0.28%, por lo que se podría concluir que a través de RBF se obtienen estimaciones más precisas.

Al realizar el estimado por el método de costo unitario se obtuvieron diferencias significativas con respecto al costo real, los costos estimados fueron más altos que los costos reales totales con una variación promedio del 28.73% y un  $R^2$  de 0.6954, este último valor muestra que este método no es tan preciso para estimar el costo de un proyecto de construcción.

A partir de esta aplicación se puede demostrar la superioridad del modelo de redes neuronales artificiales frente a modelos tradicionales como el costo unitario por área. Igualmente se aprecia que para el caso de estudio al aumentar el número de parámetros de entrada se incrementa el rendimiento del modelo ya que obtienen valores mínimos de RMSE y MAE.

Los resultados de varias investigaciones han demostrado que las redes neuronales son superiores al modelo de regresión para la estimación de costos (*G. H. Kim et al., 2004*). Al realizar una comparación entre el análisis de regresión múltiple y las redes neuronales artificiales, se determinó la superioridad de las redes neuronales en la estimación de costos en proyectos de construcción con un error absoluto promedio de 16.6% (*Emsley et al., 2002*). En otra investigación se empleó ANN para predecir el costo y el cronograma de proyectos de construcción en la etapa conceptual, obteniendo una precisión de 92% y 80% respectivamente (*Y. R. Wang et al., 2012*).

Para estimar el costo de una planta de tratamiento de agua se utilizó un modelo ANN, se emplearon 160 casos históricos, el 80% para la fase de entrenamiento y el 20% restante para la fase de validación, el modelo contenía cuatro parámetros de entrada y una capa oculta, se obtuvo un error porcentual absoluto medio de 21% el cual se considera un valor razonable para la estimación de costos paramétricos en la etapa inicial de un proyecto (*Marzouk & Elkadi, 2016*).

En otro estudio se determinó su aplicabilidad empleando un algoritmo de aprendizaje de retropropagación para estimar el costo de proyectos IPC, se obtuvo en la fase de prueba una precisión promedio del modelo de 91,67% (Putra & Triyono, 2015).

### **2.7.2. Razonamiento basado en casos (CBR)**

Cuando las personas se enfrentan a un nuevo problema, estas recurren a los viejos problemas para identificar la similitud entre estos dos problemas, y resuelven el nuevo problema adoptando soluciones que se utilizaron para resolver los problemas anteriores.

El razonamiento basado en casos es un aprendizaje sostenido y un enfoque incremental que resuelve problemas buscando el caso pasado más similar y reutilizándolo para la nueva situación (Elmousalami, 2020b). El modelo CBR se basa en la experiencia o la memoria, resuelve nuevos problemas mediante la adopción de soluciones que se utilizaron para resolver problemas anteriores, es un proceso cíclico de aprendizaje de casos pasados para resolver un nuevo caso.

El enfoque de CBR es similar al juicio de expertos que se basan en el uso de la experiencia para resolver problemas. Los expertos resuelven un nuevo problema de la siguiente manera: primero, observan los atributos clave que describen un problema; segundo, identifican estos atributos en problemas anteriores de acuerdo con su experiencia y tercero, predicen la dirección del nuevo problema sobre la base de los problemas de experiencia similar con un ajuste mental.

El modelo se basa en 4 etapas: recuperación, reutilización, revisión y retención. A continuación, se presenta en resumen cómo funciona el modelo.

- (i) Los casos antiguos, que representan experiencias que el sistema adquirió, se almacenan en una base de casos.
- (ii) Cuando se presenta un nuevo caso al sistema, el sistema CBR recupera uno o más casos almacenados similares al nuevo caso de acuerdo con el porcentaje de similitud.

- (iii) Los usuarios intentan resolver el nuevo caso adaptando los casos recuperados, se basa en las diferencias entre los casos almacenados y el nuevo caso. Se realizan algunas revisiones entre estos casos porque todavía hay algunas diferencias entre los casos almacenados y el nuevo caso, y luego se obtiene la solución
- (iv) La nueva solución se incorpora a la base de casos almacenados.

En este modelo los atributos son los factores o parámetros que afectan el costo. La similitud de los atributos ( $AS$ ) se puede calcular con la ecuación (8):

$$AS = \frac{Min(AV_N, AV_R)}{Max(AV_N, AV_R)} \quad Eq. 8$$

Donde  $AV_N$  representa el valor del atributo del nuevo caso ingresado,  $AV_R$  el valor del atributo del caso recuperado.

Dependiendo de la similitud de los atributos y de las ponderaciones del atributo ( $AW$ ) las cuales son seleccionados por un experto para enfatizar la importancia de ese atributo, se puede calcular la similitud de los casos ( $CS$ ) mediante la ecuación (9), en la cual se tienen en cuenta la similitud de todos los atributos  $i$  por su factor de ponderación.

$$CS = \frac{\sum_{i=1}^n (AS_i * AW_i)}{\sum_{i=1}^n (AW_i)} * 100\% \quad Eq. 9$$

Las ponderaciones o pesos de los atributos se pueden obtener a partir de procesos de análisis jerárquico ( $AHP$ ) en el cual se toma decisiones de múltiples factores utilizando estructuras jerárquicas para representar un problema de decisión y luego determinar la importancia relativa de los elementos a través de la comparación por pares la cual está basada en las experiencias del tomador de decisiones.

En general, el modelado AHP tiene tres etapas: primero se determina la estructura de la jerarquía, luego se comparan los elementos de decisión utilizando el método por pares, y, por último, se calculan los pesos relativos de los elementos de decisión (S. Kim, 2013).

En el siguiente apartado se presenta el procedimiento del modelo CBR (*Wu & Huang, 2008*).

#### **2.7.2.1      *Establecimiento de la base de casos***

Es el proceso de recopilación de casos y descripción de casos, es la premisa para realizar CBR. El proceso de recolección debe cumplir con algunos criterios para obtener casos valiosos. La descripción del caso es el proceso de extracción de los atributos, incluidos los atributos característicos y los atributos de la solución.

#### **2.7.2.2      *Descripción del nuevo caso***

Consiste en extraer los atributos característicos que influyen en el costo del proyecto. Además, se define la metodología y diversas métricas para determinar la similitud entre los casos antiguos y el nuevo caso que se realizará durante la recuperación de casos.

#### **2.7.2.3      *Recuperación de casos***

La recuperación de casos es un proceso para encontrar casos similares de la base de casos. Se requiere alguna estrategia de recuperación para recuperar rápidamente los casos adecuados.

#### **2.7.2.4      *Adaptación del caso***

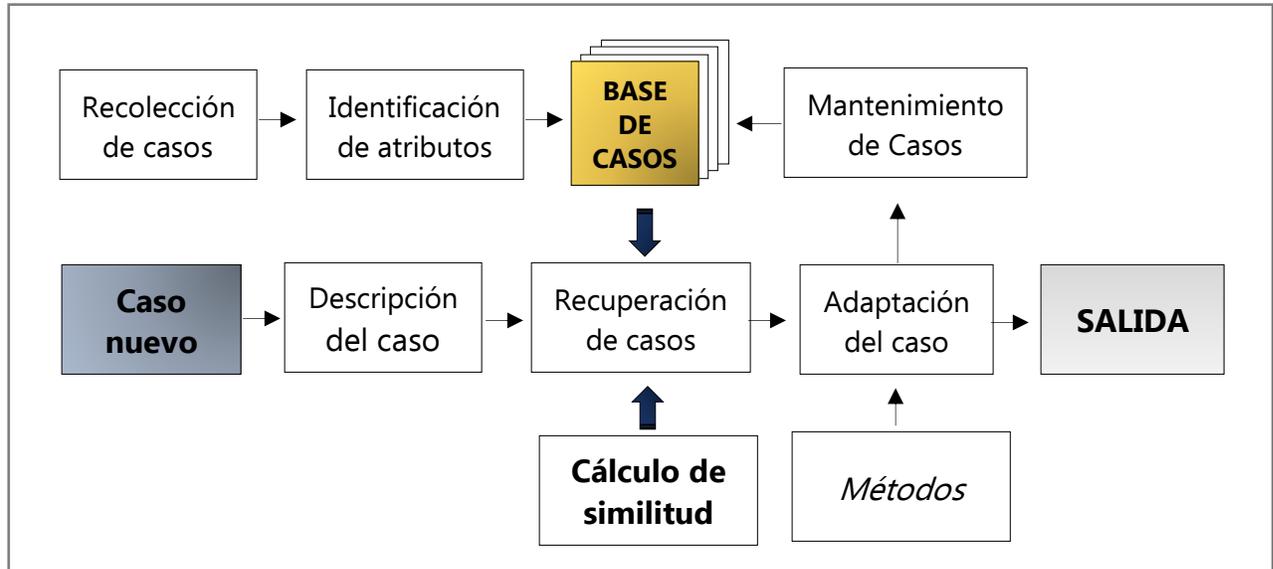
Los casos recuperados de la base de casos difieren del nuevo caso y, por lo tanto, necesitan ser adaptados. Los métodos son diversos y se pueden dividir en adaptación única y adaptación combinada. La adaptación combinada consiste en generar una nueva solución a partir de soluciones de casos adecuados, con el fin de obtener una solución más precisa haciendo un buen uso de la información de cada caso.

#### **2.7.2.5      *Mantenimiento del caso***

Para controlar adecuadamente la base de casos, se debe seguir una estrategia de aprendizaje para que la estimación sea precisa y eficiente, la estrategia es combinar los casos de acuerdo con los puntajes de similitud, y decidir si se agrega el nuevo caso, o si se mejora o elimina los casos anteriores.

En la Figura 9 se presenta el modelo de razonamiento basado en casos esquemáticamente.

*Figura 9. Modelo CBR*



**Fuente:** Adaptado de *Application of a Case-Based Reasoning Method in Estimating the Power Grid Project Cost (Wu & Huang, 2008)*.

En un estudio desarrollado por el Departamento de Ingeniería Arquitectónica de la Universidad de Corea se realizó una comparación entre los modelos de análisis de regresión múltiple, redes neuronales artificiales y razonamiento basado en casos, en la estimación del costo de proyectos de construcción, se recopilaron datos de 530 proyectos, para los dos primeros modelos se emplearon 490 casos en la fase de entrenamiento y los casos restantes en la fase de validación.

Para evaluar la precisión y rendimiento de cada modelo se calculó el error absoluto medio (MAE) entre el costo estimado y el costo real del proyecto, obteniendo como resultado para la regresión múltiple un error promedio de 6.95%, para el modelo ANN 2.97% y para el modelo basado en casos 4.81%, se determina que los dos últimos métodos funcionan mucho mejor que la regresión, por un lado, el razonamiento basado en casos (CBR) consume menos tiempo, por otro lado, ANN produce resultados con errores asociados más pequeños (G. H. Kim et al., 2004).

Es importante tener en cuenta que una vez desarrollados los modelos de estimación se deben actualizar cuando se agregan nuevos casos a la base de casos. En los modelos ANN, esta actualización es difícil porque los modelos requieren una nueva capacitación, los modelos reentrenados deben volver a validarse, este proceso requiere un tiempo considerable para su realización.

A la hora de tomar decisiones en la estimación de costos el modelo CBR puede explicar con mayor claridad los procedimientos para obtener el costo de un nuevo proyecto ya que puede recuperar los costos y las descripciones de un proyecto similar de la base de casos.

### **2.7.3. Modelo de Lógica Difusa (FL)**

Como se había mencionado con anterioridad, uno de los problemas que presenta las técnicas de estimación tradicionales es que éstas se basan en juicios subjetivos del estimador.

La lógica difusa procura crear aproximaciones matemáticas en la resolución de ciertos tipos de problemas, en los cuales se pretende producir resultados exactos a partir de información de entrada vaga, ambigua, imprecisa o incompleta.

Es una técnica de la inteligencia computacional que permite trabajar con un alto grado de imprecisión. Es una lógica multivaluada que permite valores intermedios para poder definir evaluaciones entre: sí/no, verdadero/falso, blanco/negro, pocos/muchos, cerca/lejos, entre otros (*D Negri & De Vito, 2006*).

La lógica difusa está diseñada para modelar la toma de decisiones humanas al representar la incertidumbre, la incompletitud y la aleatoriedad del sistema del mundo real. Además, representa la experiencia y el conocimiento de los expertos mediante el desarrollo de reglas difusas. Este conocimiento está representado en los sistemas difusos, en un conjunto difuso su frontera no está precisamente definida, el grado de pertenencia varía entre cero y uno mediante funciones de pertenencia (MF) que consta de números reales en el intervalo  $[0,1]$ , cuanto más cerca de 1, mayor es la pertenencia el objeto al conjunto.

Las MF pueden ser funciones triangulares, trapezoidales, gaussianas y en forma de campana en las que la selección de la función MF dependerá del problema y sus características (Elmousalami, 2020).

El modelo de lógica difusa se aplica cuando el caso en consideración es muy complejo y no hay suficiente información disponible, cuando se incluyen las opiniones y los valores de las personas, o cuando se necesita el juicio humano y la toma de decisiones.

El primer paso del modelo es determinar los parámetros de entrada, posteriormente se identifica el grado o funciones de pertenencia para cada parámetro dependiente e independiente, se puede realizar un conjunto de operaciones entre conjuntos difusos, como lo son la unión de conjuntos difusos, la intersección de conjuntos difusos y el complemento de un conjunto difuso.

Los términos lingüísticos se utilizan para representar aproximadamente las características del sistema donde dichos términos no pueden representarse como términos cuantitativos.

Luego de definir los *MF* y los términos lingüísticos, se desarrollan reglas “*SÍ-ENTONCES*” para establecer sistemas basados en reglas. Cada regla representa la lógica humana y la experiencia, representan el cerebro del sistema difuso.

Una regla difusa de “*SÍ-ENTONCES*” se puede representar así:

$$\boxed{\text{SÍ} \{ \text{Proposición difusa } (x \text{ es } A_1) \} \quad \text{Entonces} \{ \text{Proposición difusa } (y \text{ es } B_2) \}}$$

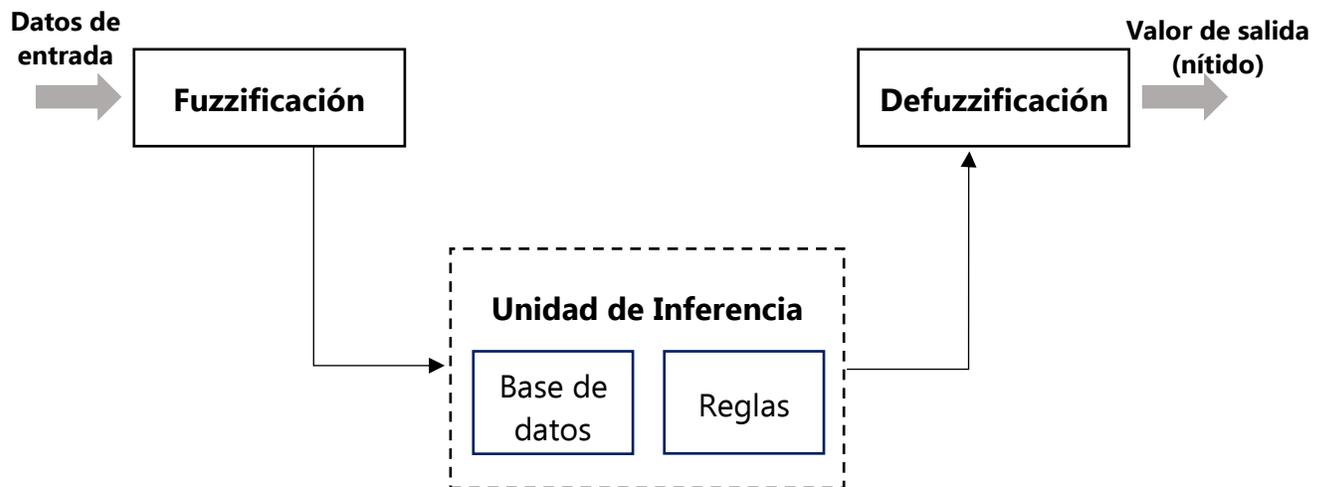
Donde  $x$  representa el parámetro de entrada;  $A_1$  la función de pertenencia de  $x$ ;  $y$  es el parámetro de salida; y  $B_2$  la función de pertenencia de  $y$ .

Los sistemas basados en reglas son sistemas que tienen más de una regla para representar la lógica humana y la experiencia del sistema desarrollado.

El modelo de lógica difusa está conformado principalmente por 3 etapas: Fuzzificación, inferencia y defuzzificación. En la Fuzzificación se modifica la entrada en expresiones lingüísticas mediante funciones de pertenencia que indican la cuantificación mediante la cual un valor numérico especificado de una variable definida coincide con la expresión lingüística en consideración. Por su parte, la inferencia tiene la función de mapear desde una entrada dada a una salida, interpreta los valores en el vector de entrada empleando el conjunto de reglas, asigna valores al vector de salida (Kalogirou, 2014). Finalmente, en la defuzzificación se transforma una cantidad difusa en una salida nítida.

En la Figura 10 se presenta un esquema general del proceso de la lógica difusa.

*Figura 10. Modelo de Lógica Difusa*



#### 2.7.4. Algoritmo Genético (GA)

Un algoritmo genético es un enfoque de búsqueda intuitivo que permite la optimización de problemas complejos y difíciles. Este procedimiento se basa en el principio de supervivencia de los más fuertes a través de algunos operadores que imitan la naturaleza con el fin de producir mejores aproximaciones a una solución. Los algoritmos genéticos tienen varias ventajas sobre los algoritmos de optimización convencionales, la más notable es que puede proporcionar soluciones óptimas a problemas complejos de optimización. Los algoritmos genéticos pueden abordar

varios tipos de optimización de la función de idoneidad, como estacionaria o no estacionaria, lineal o no lineal, continua o discreta (*Acar Yildirim & Akcay, 2019*).

Los algoritmos genéticos tienen tres procesos genéticos básicos: reproducción, cruce y mutación. La diferenciación de la nueva generación y de la generación anterior se logra transfiriendo las buenas características de los cromosomas compatibles con estos tres procesos a la nueva población. Con cada generación de diferenciación, se buscan soluciones en diferentes puntos del espacio de solución. El procedimiento del algoritmo comienza generando una población inicial de soluciones aleatorias que se codifican en las cadenas de números llamados cromosomas. Cada cromosoma individual representa una solución que es mejor o peor que otras en la población. La idoneidad de cada solución se determina evaluando su rendimiento con respecto a una función objetivo denominada función de idoneidad. Se aplica un mecanismo de selección a la población actual para crear una población intermedia. Luego, los operadores de cruce y mutación se aplican a la población intermedia para formar una población nueva. Esta población se utiliza en la próxima iteración del algoritmo. Por lo general, este proceso continúa durante un gran número de generaciones de descendientes en las que la población sigue evolucionando (las mejores soluciones reemplazan a las soluciones no aptas), hasta que se cumpla un criterio de terminación (*Haque & Hasin, 2012*).

Al final del proceso, el miembro de la población con el mejor rendimiento se convierte en la solución óptima.

#### **2.7.5. Máquina de Soporte Vectorial (SVM)**

Es un algoritmo de aprendizaje automático que puede ser empleado para la estimación de costos paramétricos, se basa en la teoría del aprendizaje estadístico, presenta una alta capacidad de autoaprendizaje y un excelente desempeño en la generalización de modelos. SVM puede obtener reglas de toma de decisiones y lograr minimizar los errores, que le permite resolver problemas de aprendizaje de manera eficiente (*Mat Deris et al., 2011*).

Los modelos basados en SVM también implican la identificación de factores de influencia, la recolección de muestras de datos, el proceso de capacitación y

validación del modelo. Una vez establecida la función de mapeo, el modelo es capaz de predecir el valor futuro del costo de un proyecto (*Cheng & Hoang, 2014*).

Las ventajas de SVM incluyen la capacidad de inferencia, una excelente generalización, su flexibilidad y una capacidad de predicción precisa. En muchas aplicaciones, SVM puede garantizar una mayor precisión, rendimiento y calidad del estimado en comparación con otros enfoques computacionales como las redes neuronales (*An et al., 2007*). Ha logrado predecir con éxito el costo de proyectos con una precisión cercana al 95% (*Nabil Ibrahim El-Sawalhi, 2015*).

El modelo SVM brinda la oportunidad de realizar una estimación de costos rápida y fácil en las primeras etapas de la preparación del proyecto.

Para desarrollar la estimación del costo de un proyecto a partir del modelo SVM se debe:

- Seleccionar un software para la construcción del modelo que sea compatible con los modelos de máquinas de soporte vectorial como NeuroSolutions, LibSvm, SVM-Light, MATLAB y RapidMinor.
- Recolección de datos de proyectos anteriores.
- Determinar los factores que influyen en el costo del proyecto.
- Dividir el conjunto de datos en tres conjuntos: el conjunto de entrenamiento capacita el modelo para modificar los pesos de la red que minimicen el error de la red, el conjunto de validación cruzada se encarga de monitorear el error, y, por último, el conjunto de prueba mide la capacidad de generalización de la red y evalúa su rendimiento.
- Construir la red inicial seleccionando el tipo de red, el número de capas y nodos ocultos, la función de transferencia, la regla de aprendizaje, el número de iteraciones y ejecuciones.
- Desarrollar las fases de entrenamiento, validación y prueba.
- Calcular la precisión del modelo a partir del error porcentual absoluto medio (MAPE) u otras medidas estadísticas.

- Realizar un análisis de sensibilidad para evaluar la influencia de cada parámetro de entrada en el costo del proyecto.

### **2.7.6. Modelos híbridos**

Son modelos que combinan múltiples modelos y algoritmos de aprendizaje para mejorar el rendimiento general de la estimación, a continuación, se presentan los más relevantes.

#### **2.7.6.1 Razonamiento Difuso Basado en Casos**

Este método emplea la lógica difusa para mejorar la aplicación de CBR, algunos datos o atributos de los casos pueden contener valores imprecisos o valores lingüísticos. El uso de la teoría de conjuntos difusos en la estimación utilizando el método CBR puede facilitar la comparación de las variantes de soluciones consideradas durante la etapa de planificación (*Zima, 2015*).

La lógica difusa se emplea para comparar y evaluar la similitud del nuevo caso con los casos ya existentes. La evaluación de criterios individuales será más simple y precisa en la descripción del caso utilizando variables lingüísticas. Las variables lingüísticas a menudo se usan en la teoría de conjuntos difusos. El uso de valores difusos es más favorable ya que imita la forma en que los humanos interpretan los valores basados en el lenguaje.

#### **2.7.6.2 Modelo con Razonamiento Basado en Casos y Algoritmos Genéticos**

Uno de los procesos claves en el modelo de razonamiento basado en casos es la determinación los factores de peso que tienen los atributos, por lo general se determinan con base a la experiencia del estimador lo que implica incertidumbre e imprecisión debido a la necesidad de intervención humana (*K. J. Kim & Kim, 2010*). Para superar esta limitación se emplean los algoritmos genéticos para determinar los pesos de los atributos encontrando los pesos óptimos para el modelo en estudio, y de esta manera se minimiza el error de la predicción del costo.

### **2.7.6.3 Redes Neuronales Artificiales empleando Algoritmos Genéticos**

La aplicación de algoritmos genéticos en las redes neuronales artificiales permite optimizar y seleccionar la mejor arquitectura de la red en función de sus capacidades informáticas de evolución, su objetivo es crear una red solo una vez, en lugar de desarrollarla en cada generación para cada individuo de la población, lo que ahorra drásticamente el tiempo de compilación.

Este modelo mejora la precisión de la red ANN para estimar los costos (*Cheng et al., 2010*).

Al incorporar algoritmos genéticos se mejora la capacidad de generalización del modelo de redes neuronales y se obtiene una mayor confiabilidad. Es más adecuado para la aplicación de la estimación de costos en las fases tempranas del proyecto al compararse con algoritmos tradicionales (*Guang, 2013*). Además, reduce el tiempo y el esfuerzo en el proceso de estimación.

### **2.7.6.4 Modelo Genético Difuso**

En el modelo de lógica difusa a la hora de determinar las reglas difusas y las funciones de pertenencia se emplea un enfoque de prueba y error que implica un tiempo considerable que no garantiza que el conjunto de reglas difusas sea el óptimo. Adicionalmente, el número de reglas de inferencia difusas aumenta exponencialmente al aumentar el número de parámetros de entrada, variables lingüísticas o parámetros de salida.

Para superar esas limitaciones se ha desarrollado el modelo genético difuso para generar de manera óptima las reglas de inferencia (*Elmousalami, 2020a*).

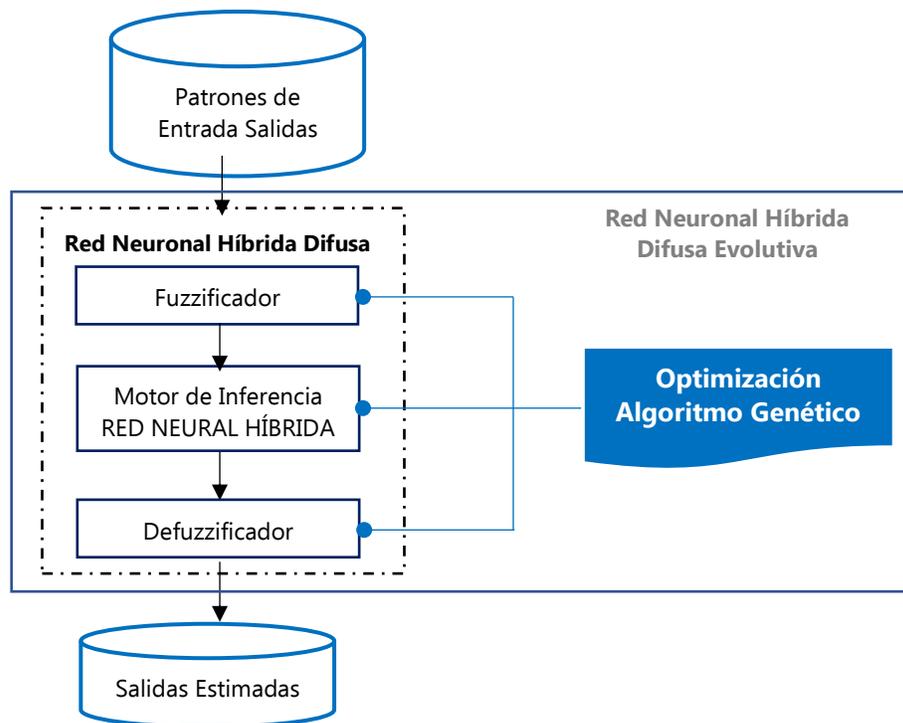
### **2.7.6.5 Red Neuronal Híbrida Difusa Evolutiva (EFHNN)**

Para mejorar la precisión de la estimación del costo conceptual este método integra las redes neuronales (*NN*) y las redes neuronales de alto orden (*HONN*) en una red neuronal híbrida (*HNN*) que será el motor de inferencia del modelo. La lógica difusa (*FL*) se utiliza en el HNN para manejar las incertidumbres, un enfoque que evoluciona al HNN en una red neuronal híbrida difusa (*FHNN*). Finalmente emplea un algoritmo genético para optimizar la red *FHNN* obteniendo la Red Neuronal Híbrida Difusa Evolutiva (*EFHNN*) (*Cheng et al., 2010*).

Aplicaciones han determinado que la red EFHNN puede emplearse efectivamente como un estimador de costos preciso durante la etapa preliminar de planificación del proyecto incluso cuando solo se dispone de una cantidad mínima de datos disponibles, su rendimiento es superior a las redes neuronales simples.

En la Figura 11 se presenta un esquema de la arquitectura del modelo.

*Figura 11. Arquitectura del Modelo de Red Neuronal Híbrida Difusa Evolutiva*



**Fuente:** Adaptado de *Conceptual cost estimates using evolutionary fuzzy hybrid neural network for projects in construction industry* (Cheng et al., 2010).

## 2.8. SOFTWARE DE ESTIMACIÓN DE COSTOS

Son herramientas automatizadas que con base a un conjunto de parámetros de entrada estiman el costo de un conjunto de actividades. Sirven para generar tanto estimaciones conceptuales como detalladas la cual dependerá de la información disponible en el momento de calcular el estimado de costo.

Las aplicaciones de software de gestión de proyectos, hojas de cálculo informatizadas, simulaciones y herramientas estadísticas, se emplean para agilizar la estimación de costos.

Entre los softwares empleados en la industria se encuentran *Cleopatra Enterprise*, *Costimator*, ***Aspen Capital Cost Estimator***, este último es capaz de generar estimaciones de Clase IV a Clase II para proyectos de capital en las industrias de petróleo y gas, refinación y productos químicos. Para las estimaciones emplean una amplia base de datos de cuotas de vendedores de equipos actualizados.

Aspen Capital Cost Estimator está basado en modelos de ingeniería altamente escalables de equipos de proceso, predice con precisión los costos totales instalados de los equipos de proceso y los volúmenes asociados, instrumentación, eléctricos y civiles.

Proporciona una lista detallada de las cantidades y costos de horas-hombre, costo de equipos (*incluyendo: materiales, tubería, civil, acero, instrumentos, eléctrico, aislamiento, pintura*), costos indirectos de construcción, requisitos de alquiler de equipos de construcción, costos de todas las fases de ingeniería, costos de supervisión y puesta en marcha.

El grado de desarrollo de ingeniería determina la precisión del estimado, para obtener una mayor precisión se requiere la lista detallada de los equipos del proyecto con todas sus especificaciones, de esta información dependerá la clase de estimado de costo resultante.

## 2.9. PREPROCESAMIENTO DE DATOS

Debido a que la mayoría de las técnicas y modelos de estimación se basan en datos históricos de proyectos anteriores es necesario realizar un preprocesamiento a la base de datos que se empleará con el fin de eliminar del análisis aquellos que sean atípicos o anormales que puedan tener un impacto negativo en la confiabilidad y precisión de los estimados de costos.

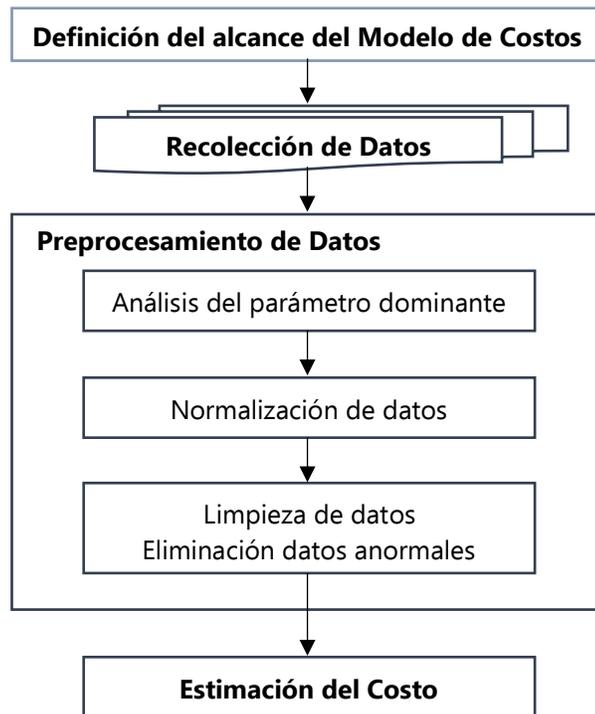
La limpieza de datos (*Data Cleansing*) es una de las técnicas de preprocesamiento que elimina errores internos o valores anormales en los datos, debe realizarse antes de que estos datos se usen en la estimación (*Ji et al., 2010*).

Una vez se han recolectado los datos históricos, se ajustan los datos mediante el uso de índice de costos históricos, se realiza un análisis de los componentes principales que impactan en el costo del proyecto, algunos componentes estarán altamente correlacionados con el costo, al tiempo que demuestran fuertes correlaciones entre ellos. El coeficiente de correlación indica la fuerza y la dirección de una relación lineal entre dos variables aleatorias.

Se determina el parámetro dominante que rige la variación del costo, luego, los datos se normalizan con base al parámetro dominante con el fin de organizar los datos para un acceso más eficiente. Por último, se lleva a cabo la eliminación de datos “ruido” de acuerdo con un nivel de confianza establecido, dejando al final solamente aquellos casos útiles de la base de datos.

Se ha demostrado que el preprocesamiento de datos tiene un impacto positivo en la mejora de la precisión de la estimación, es importante realizarla antes de desarrollar las técnicas y modelos de estimación para una mayor precisión y confiabilidad.

*Figura 12. Modelo de costo paramétrico basado en preprocesamiento de datos*



### 3. CLASIFICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE ESTIMACIÓN DE COSTOS

A partir de la información recopilada de las técnicas y herramientas para la estimación de costos en los proyectos se presenta en la Tabla 19 cada una de las técnicas con sus principales características y la clase de estimado en las que pueden ser aplicadas.

*Tabla 19. Clasificación de las técnicas de Estimación de Costos*

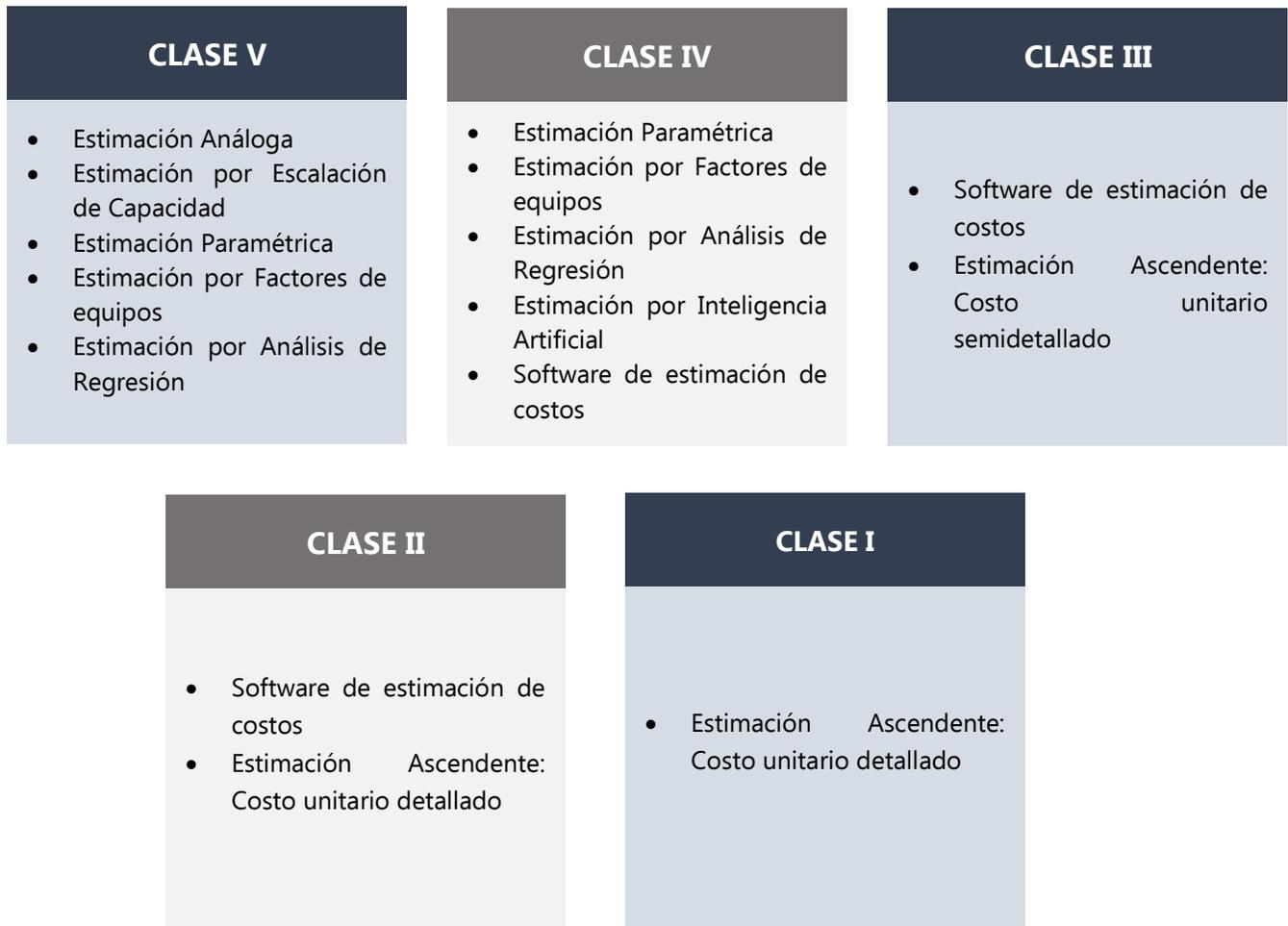
Clase del Estimado de Costo	Técnica	Características
<b>CLASE V</b>	Estimación Análoga	<ul style="list-style-type: none"> <li>-La estimación se realiza con base a proyectos con características similares desarrollados anteriormente.</li> <li>-Poco tiempo y costos para su realización, se basa en la experiencia y el juicio del estimador.</li> <li>-Utiliza parámetros de un proyecto anterior similar como alcance, costo, duración, presupuesto, tamaño y complejidad.</li> </ul>
<b>CLASE V</b>	Estimación por Escalación de Capacidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>-A partir del costo y de la capacidad de un proyecto similar se estima el costo de un nuevo proyecto con capacidad conocida.</li> <li>-Los datos se ajustan con un índice de costos.</li> <li>-Requiere poco tiempo, es de fácil aplicación, pero se debe emplear solo para estimaciones de orden de magnitud, la precisión de este método es baja.</li> </ul>
<b>CLASE V-IV</b>	Estimación Paramétrica	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Desarrolla un modelo de estimación basado en relaciones lógicas o estadísticas de los principales factores del proyecto que tienen una correlación con el costo.</li> <li>-Es útil para preparar estimaciones paramétricas tempranas, cuando hay pocos datos técnicos o entregables de ingeniería.</li> <li>-Requiere de información histórica confiable, además requiere un volumen significativo de datos históricos para identificar relaciones paramétricas de una manera estadísticamente significativa.</li> </ul>
<b>CLASE V-IV</b>	Estimación por Factores (Lang, Hand, Wroth, Chilton, Peters-Timmerhaus, Holland)	<ul style="list-style-type: none"> <li>-A partir del costo de los equipos se emplean factores de acuerdo con las características de la planta para estimar el costo del proyecto.</li> <li>-Es más precisa cuando se cuenta con la lista completa de los equipos y si se emplean los factores del equipo apropiados.</li> <li>-El precio de los equipos por lo general se obtiene a partir de una orden de compra anterior, de datos publicados de los equipos y de cotizaciones de los proveedores.</li> </ul>

Clase del Estimado de Costo	Técnica	Características
<b>CLASE V-IV</b>	Estimación por Análisis de Regresión	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Define un modelo que busca la combinación de variables independientes que mejor se correlacione con la variable dependiente (Costo).</li> <li>-No requiere información detallada del proyecto para la estimación de costos.</li> <li>-Requiere de información histórica confiable para la estimación.</li> </ul>
<b>CLASE V-IV</b>	<b>ESTIMACIÓN POR INTELIGENCIA ARTIFICIAL</b>	
	-Modela datos estadísticos no lineales, tienen la capacidad de aprender de conjuntos de datos incompletos no lineales para predecir casos nuevos con una precisión aceptable.	
	Redes Neuronales Artificiales (ANN)	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Simulan el proceso de aprendizaje del cerebro humano, aproxima funciones no lineales a una precisión específica.</li> <li>-Tienen la capacidad de aprender de conjuntos de datos incompletos no lineales para predecir casos nuevos con una precisión aceptable incluso en las fases iniciales del proyecto.</li> <li>-Los modelos de redes neuronales necesitan una gran cantidad de datos históricos para obtener un buen rendimiento.</li> </ul>
	Razonamiento Basado en Casos (CBR)	-Es similar al juicio de expertos que se basan en el uso de la experiencia para resolver problemas, buscando de una base de datos el caso pasado más similar y reutilizándolo para estimar el costo del nuevo proyecto. Se requiere una base de datos confiable.
	Lógica difusa	-Genera estimaciones a partir de información de entrada vaga, ambigua, imprecisa o incompleta. Está diseñada para modelar la toma de decisiones humanas al representar la incertidumbre, la incompletitud y la aleatoriedad del sistema del mundo real.
	Máquina de Soporte Vectorial (SVM)	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Se emplea para la estimación de costos paramétricos, se basa en la teoría del aprendizaje estadístico, presenta una alta capacidad de autoaprendizaje y un excelente desempeño en la generalización de modelos.</li> <li>-Es una estimación de costos rápida y fácil en las primeras etapas de la preparación del proyecto, puede obtener reglas de toma de decisiones y lograr minimizar los errores.</li> </ul>
Modelos Híbridos	Son modelos que combinan múltiples modelos de inteligencia artificial y algoritmos de aprendizaje para mejorar el rendimiento general de una estimación.	

Clase del Estimado de Costo	Técnica	Características
<b>Clase IV - II</b>	Software de estimación de costos	<p>-Herramientas automatizadas que con base a un conjunto de parámetros de entrada estiman el costo para un conjunto de actividades.</p> <p>-Genera estimaciones tanto conceptuales como detalladas. La clase de estimado resultante depende del desarrollo de ingeniería.</p> <p>-Emplean una amplia base de datos de cuotas de vendedores de equipos actualizados.</p>
<b>CLASE III- I</b>	Estimación Ascendente: Bottom Up	<p>-Estimación detallada en la que cada componente o grupo de componentes ha sido analizado cuantitativamente y procesado, utilizando el costo unitario más realista disponible.</p> <p>-Se agrupan las estimaciones de costo de cada elemento inferior hacia arriba a través de la estructura de desglose del trabajo del proyecto, se obtiene el estimado de costo de cada paquete de trabajo para obtener el estimado de todo el proyecto.</p> <p>-Estimación con alto grado de precisión, requiere mayor tiempo para su realización.</p>

En la Figura 13 se presenta un resumen de las técnicas que se pueden emplear para cada clase de estimado de costo, dependiendo de la información disponible a la hora de realizar el estimado será su precisión.

*Figura 13. Técnicas de Estimación para cada Clase de estimado de Costo.*



## **4. FACTORES QUE INCIDEN EN LA ESTIMACIÓN DEL COSTO**

El éxito de un proyecto se determina mediante el logro de objetivos de tiempo, costo, alcance y calidad. La estimación del costo del proyecto es crucial para el éxito del proyecto y debe considerarse desde las primeras etapas del proyecto; de lo contrario, una mala estimación podría conducir al fracaso del proyecto.

Para que los proyectos se entreguen según el presupuesto especificado, se debe realizar una estimación precisa de los costos y una evaluación realista de los factores que pueden afectar el costo del proyecto.

A la hora de realizar el estimado de costo de un proyecto hay una variedad de factores que influyen en el proceso de estimación y que además incidirán en el desempeño del proyecto.

Se han realizado diversas investigaciones para determinar los factores que impactan en la estimación del costo de los proyectos los cuales se presentan en este capítulo (Akintoye, 2000; An et al., 2011; Arif et al., 2015; Baloi & Price, 2001; Enshassi et al., 2005; Hatamleh et al., 2018; Lim et al., 2016; Liu & Zhu, 2007; Mahamid, 2015; Mahamid et al., 2014).

### **4.1. Complejidad del proyecto**

La complejidad de un proyecto está relacionada con el alcance, la complejidad del diseño y las limitaciones del sitio del proyecto. Se puede representar en términos del tamaño y tipo de trabajo, la velocidad de producción, el grado de repetición, el número de operaciones, el grado de especialidad, la previsibilidad de las operaciones, así como también en la complejidad técnica de las actividades y la interdependencia de los procesos y etapas del proyecto.

Los rápidos cambios en las tecnologías, la reducción del tiempo del ciclo tecnológico y el riesgo de que la tecnología se vuelva obsoleta hacen que los proyectos sean complejos.

La complejidad se relaciona a su vez con la incertidumbre y ambigüedad del proyecto.

Que tan complejo sea un proyecto afectará su duración, la selección de la técnica de estimación y por ende su costo.

La complejidad del proyecto debe examinarse cuidadosamente, los estimadores deben comprender completamente el proyecto para proporcionar el mejor costo para cada actividad o proceso.

#### **4.2. Requerimientos tecnológicos**

Los requerimientos tecnológicos hacen referencia a la cantidad de trabajo especializado, el tiempo de entrega de materiales, la proporción de operaciones fuera del sitio y en sitio, la secuencia y las limitaciones de las operaciones, y, la capacidad de construcción.

La innovación en tecnología se debe tener en cuenta a la hora de realizar la estimación ya que impactan en la rentabilidad y la gestión de un proyecto. Por lo general cuando son nuevas tecnologías en el mercado la información sobre estas es limitada por lo que se debe estimar con precaución y hacer las consideraciones requeridas.

#### **4.3. Información del proyecto**

Al momento de realizar el estimado del costo la disponibilidad, la calidad y el flujo de información influirán en el proceso, dependiendo de la información disponible se determina la técnica de estimación influyendo a su vez en la precisión y en la eficiencia del estimado. Entre más definido se encuentre el proyecto mayor será la precisión del estimado.

Igualmente, a medida que se conoce más información es importante actualizar las estimaciones para un mejor desempeño y control.

#### **4.4. Alcance del proyecto**

A la hora de desarrollar el estimado de costo un proyecto este se hace con base a la información disponible y de acuerdo con el alcance establecido para el proyecto.

Es importante tener una definición clara del alcance ya que relaciona los requisitos y especificaciones del proyecto, los estimadores deben entender y comprender con claridad el alcance para una precisa estimación. Un alcance mal definido afectará la precisión del estimado.

Varios factores o eventos pueden requerir cambios en las especificaciones del proyecto durante el desarrollo del proyecto, incluidos cambios dinámicos en el mercado, nuevos requisitos percibidos por los clientes y requisitos legales relacionados con el proyecto.

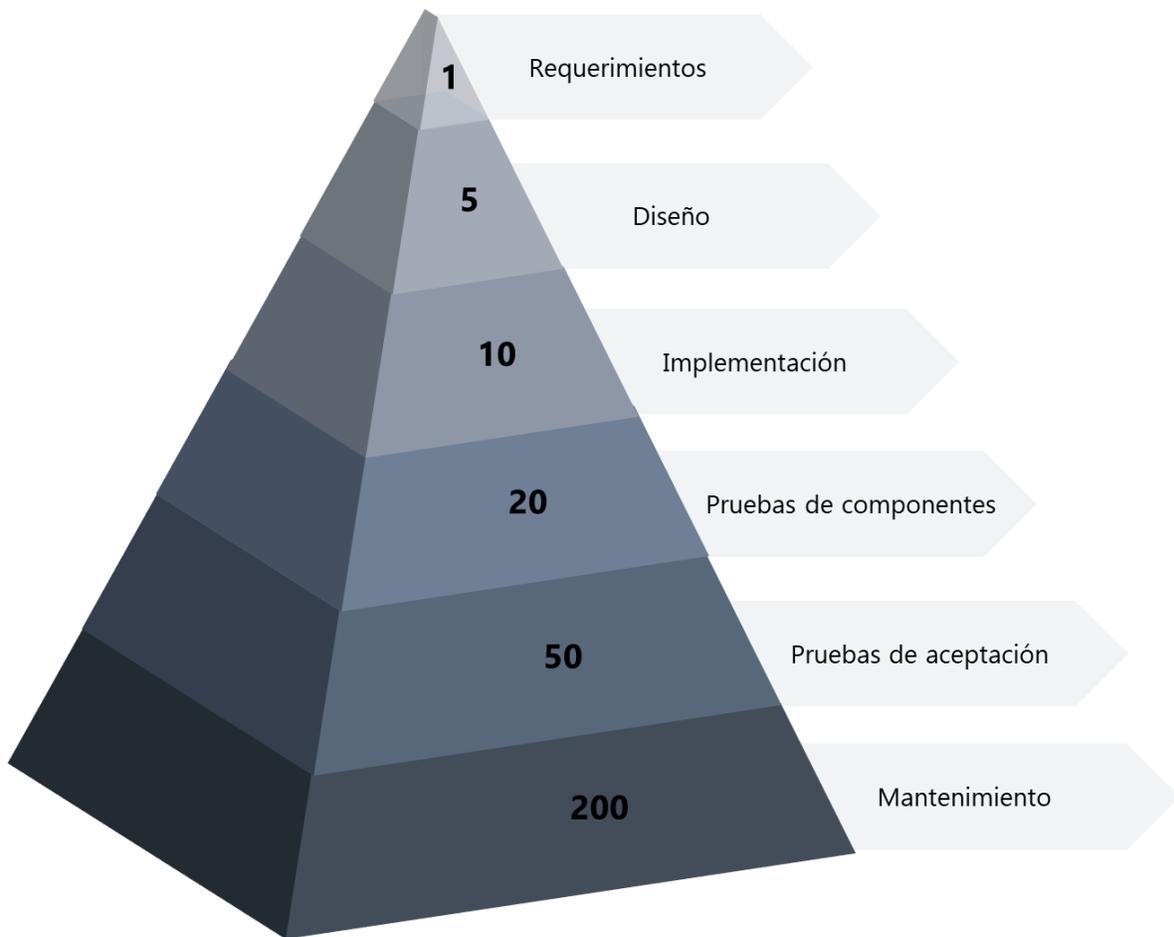
Cualquier cambio en el alcance y en las especificaciones durante el desarrollo del proyecto impactará en el costo, pudiendo este aumentar o disminuir significativamente.

El impacto en el costo por cambios en el alcance depende principalmente de la fase en la que se encuentra el proyecto, si el cambio es requerido en la fase inicial se esperaría que el costo sea relativamente bajo, por el contrario, si el cambio ocurre durante la implementación el costo por ese cambio incrementa considerablemente.

En la Figura 14 se aprecia el costo relativo por cambios en el alcance durante las diferentes etapas del proyecto.

Generalmente, durante la fase de requerimientos no hay cambios significativos en el costo. En la fase de diseño los cambios pueden generar que el nuevo costo sea hasta cinco veces el costo. En la fase de prueba de componentes, veinte veces el costo, y en la fase de prueba de aceptación, cincuenta veces el costo.

Figura 14. Costo por cambios en el alcance



#### 4.5. Confiabilidad de los datos históricos

Es una práctica común emplear datos históricos de proyectos similares para realizar el estimado de costo de un nuevo proyecto, por lo que la calidad y disponibilidad de datos históricos tendrán una gran influencia en el estimado.

La selección de datos de costos de proyectos anteriores es crucial para la precisión de la estimación, es fundamental que se usen datos de proyectos que sean similares. Por lo general, es necesario hacer ajustes para convertir los datos a las condiciones que rodean el nuevo proyecto (año, ubicación, situación del mercado).

De la calidad de los datos históricos a emplear dependerá la calidad del nuevo estimado, si se emplean datos que no son acordes al nuevo proyecto, el estimado que se obtenga no tendrá validez.

La disponibilidad de una base de datos y llevar un registro de las estimaciones pasadas podría contribuir a obtener una estimación precisa en el futuro.

#### **4.6. Duración y ubicación del proyecto**

La duración del proyecto influye significativamente en el costo, proyectos con larga duración por lo general requieren de un mayor estudio e información para estimar su costo, las variaciones o cambios tienen un impacto potencial en el tiempo de finalización de un proyecto y en los recursos necesarios para desarrollar el proyecto. La ubicación del proyecto influye por los costos de transporte al sitio de trabajo, y en los de la construcción y montaje de planta. A la hora de realizar el estimado se debe analizar si existen elementos de costos que sean únicos para la ubicación y que tengan un efecto significativo en la estimación de costos.

#### **4.7. Nivel de experiencia del estimador**

La estimación de costos es un proceso basado en la experiencia, los estimadores generalmente son conscientes de la incertidumbre y las circunstancias desconocidas que afectan los costos de los proyectos en las primeras etapas, debido a que hay información limitada disponible al momento de preparar las estimaciones, el uso de datos históricos y el juicio subjetivo del estimador juegan un papel crítico. La experiencia del estimador tiene una influencia significativa en la precisión.

Es importante que el equipo que desarrolla la estimación del costo tenga experiencia en esa área, así como en la realización de estimados en proyectos similares, ya que la experiencia del estimador incidirá en la confiabilidad, precisión y calidad del estimado. Igualmente, su experiencia influye en la duración que tome realizar el estimado.

La experiencia de un estimador le da la capacidad de hacer buenos juicios subjetivos, la cual es crucial para producir estimaciones más precisas. Los

estimadores deben enfocarse en hacer estimaciones realistas, basar su estimado en eventos optimistas podrían llevar a un estimado incorrecto y posibles sobrecostos durante la ejecución del proyecto.

Los estimadores experimentados tienen más confianza en la selección de información para estimar y son más consistentes en su razonamiento para su elección y uso de datos de costos.

La realización del estimado por un equipo no experimentado puede llevar a una estimación errónea.

Los estimadores deben considerar la importancia que tiene la estimación del costo y su influencia en el éxito o fracaso del proyecto, se requiere de compromiso del equipo para lograr una estimación perfecta. De igual manera, los estimadores deben entender el proyecto y su alcance para realizar un estimado más preciso.

#### **4.8. Método de Estimación**

Hay una gran variedad de técnicas y herramientas para desarrollar el estimado de costo, las cuales se presentaron en el apartado anterior, la elección del método de estimación también es clave para la precisión del estimado. Cada técnica requerirá una determinada cantidad y calidad de información, por lo que la precisión entre los diferentes métodos varia, hay técnicas que ofrecen una mayor confiabilidad y precisión que otras, por ejemplo, las técnicas de estimación paramétricas son más precisas que las análogas. A su vez, el tiempo requerido para desarrollar el estimado difiere de acuerdo con la técnica, algunas requerirán más tiempo que otras.

Por lo general, la selección del método de estimación se ve influenciado por la etapa en la que se encuentre el proyecto y la información disponible, además se ve influenciado por el tiempo disponible para preparar el estimado.

#### **4.9. Contingencias**

Las contingencias son asignaciones adicionales hechas en la estimación como protección para tratar con elementos o costos de proyecto desconocidos o imprevistos que pueden afectar un proyecto.

El empleo de un valor por contingencias incide en el desempeño del proyecto, si se subestiman el proyecto puede fallar y podría resultar en sobrecostos, por otro lado, grandes cantidades de contingencia puede hacer que el proyecto se vuelva demasiado costoso y el proyecto pueda ser abortado.

El nivel de precisión de una estimación se determina en gran medida por los documentos proporcionados y la cantidad de contingencia que se asigna para el alcance del trabajo. La técnica empleada para determinar el valor de contingencia influirá en la precisión del estimado.

#### **4.10. Inadecuada planeación**

En todos los proyectos es fundamental que se realice una correcta y detallada planificación en todas las etapas con el fin de que el desempeño del proyecto sea óptimo. En la fase inicial se debe realizar una planificación de actividades y recursos requeridos para el desarrollo del proyecto, esto permite determinar los costos asociados a ellos.

Si se realiza una mala planeación, se puede llegar a omitir recursos importantes que impactarán en el costo del proyecto, afectando la precisión del estimado. A su vez una mala planificación puede llevar al fracaso de los proyectos. Es recomendable realizar un detallado WBS que facilite la identificación de los recursos requeridos para la ejecución del proyecto.

#### **4.11. Falta de Escalación de los datos**

Una de las causas que puede llevar a estimados erróneos del costo es la falta de escalación de los datos empleados en la estimación, se debe tener en cuenta que si son datos históricos de años anteriores es necesario realizar la correcta actualización del dato a la fecha actual a partir de índices de costos. De igual manera, algunos de los ítems de los costos se incurrirán en algún momento futuro por lo que se debe ajustar los precios actuales para reflejar el costo esperado en la fecha de pago real futura.

Para obtener un estimado realista se requiere escalar los costos correctamente.

#### **4.12. Factores Económicos**

El estimador durante el proceso de estimación debe tener en cuenta las tendencias en las condiciones del mercado y las implicaciones en los costos de los recursos para el proyecto.

Existen algunos factores económicos que impactan el desempeño del costo del proyecto, razón por la cual es importante tenerlos en cuenta a la hora de realizar el estimado. Entre esos factores se encuentra la fluctuación de precios de equipos, materiales y mano de obra, ocasionada por la inflación, la disponibilidad de los recursos, la oferta y la demanda o por situaciones políticas o económicas que produzcan una variación en los precios.

A su vez algunos proyectos requieren de la importación de equipos y materiales por lo que variaciones en el tipo de cambio impactarán en el estimado del costo.

#### **4.13. Riesgos del proyecto**

El riesgo de un proyecto es un evento o condición incierta que, de producirse, tiene un efecto positivo o negativo en uno o más de los objetivos del proyecto, tales como el alcance, el cronograma, el costo y la calidad (*Project Management Institute, 2017*).

Las condiciones de riesgo pueden incluir aspectos del entorno del proyecto o de la organización que contribuyan a poner en riesgo el proyecto, es importante identificar los riesgos a los que puede estar expuesto el proyecto, analizarlos y planificar respuestas para tales riesgos. Cuando se realice el estimado de costo se deben tener en cuenta los riesgos y de ser necesario incluir una reserva de contingencia.

Todos los proyectos pueden verse afectados por eventos de fuerza mayor que impacten el desarrollo del proyecto, aunque presentan una baja probabilidad de ocurrencia pueden ocurrir eventos como terremotos, huracanes, pandemias, atentados, inundaciones, entre otros. Tales eventos impactarían significativamente el costo del proyecto.

#### **4.14. Selección de proveedores**

La selección de los proveedores tiene una fuerte incidencia en el costo del proyecto, ya que un gran porcentaje del costo total está relacionado con la compra de equipos y materiales, por lo que se deben seleccionar proveedores confiables que tengan la experiencia en los recursos a procurar para garantizar que los equipos o materiales cumplan con los requisitos especificados. Se debe realizar una correcta evaluación técnica y comercial de los proveedores.

Hay que garantizar que los proveedores tengan la capacidad e infraestructura para cumplir con las órdenes de compra, una mala selección de los proveedores puede llevar a sobrecostos o retrasos en la ejecución del proyecto.

En la Figura 15 se presentan algunos elementos típicos que pueden generar desviaciones en los estimados de costos.

*Figura 15. Elementos típicos que generan desviaciones en el estimado de costos*

<b>Desviaciones en el estimado de costos</b>	
<input type="checkbox"/>	Alcance mal definido.
<input type="checkbox"/>	Cambios en el alcance.
<input type="checkbox"/>	Cambios en el diseño.
<input type="checkbox"/>	Control del proyecto deficiente.
<input type="checkbox"/>	Definición incompleta del proyecto.
<input type="checkbox"/>	Empleo de una técnica de estimación no adecuada.
<input type="checkbox"/>	Escasa administración de riesgos.
<input type="checkbox"/>	Estimador inexperto.
<input type="checkbox"/>	Estimados poco realistas y optimistas.
<input type="checkbox"/>	Factores económicos.
<input type="checkbox"/>	Falta de escalación de los datos.
<input type="checkbox"/>	Falta de información histórica.
<input type="checkbox"/>	Fluctuaciones en los precios de los elementos a procurar.
<input type="checkbox"/>	Identificación incompleta de las actividades y recursos.
<input type="checkbox"/>	Inadecuada planeación.
<input type="checkbox"/>	No incluir contingencias en el estimado.
<input type="checkbox"/>	Poca disponibilidad de información del proyecto.
<input type="checkbox"/>	Requisitos ambiguos del proyecto.

Es importante establecer al comienzo del proyecto un plan de gestión de costos que describa la manera en que se va a planificar, estructurar y controlar los costos del proyecto, entre los componentes del plan de gestión se encuentran:

- Unidades de medida definidas para cada uno de los recursos que se emplearán en las mediciones.
- Nivel de precisión, grado de redondeo, hacia arriba o hacia abajo, que se aplicará a las estimaciones del costo de las actividades.
- Nivel de exactitud, especifica el rango aceptable que se utilizará para hacer estimaciones realistas sobre el costo del proyecto.
- Enlaces con los procedimientos de la organización, permite que haya una coherencia entre la estructura de desglose de trabajo con las estimaciones.
- Umbrales de control definidos, se emplean para monitorear el desempeño del costo, se definen umbrales de variación, que establecen un valor acordado para la variación permitida antes de que sea necesario realizar una acción.
- Reglas para la medición del desempeño.
- Formatos de los informes, se debe definir los formatos y la frecuencia de presentación de los diferentes informes de costos.
- Descripciones de los procesos. Se documentan las descripciones de cada uno de los procesos de gestión de los costos.

El estimado de costo debe cumplir con unos requerimientos de calidad que garantice la aplicación de las mejores prácticas en su desarrollo.

- Se debe contar con documentación que permita una clara y completa descripción de la forma en la que se obtuvo el estimado. El documento debe incluir como mínimo una descripción del alcance, metodologías, referencias y definición de los entregables utilizados, supuestos y exclusiones hechas, aclaraciones, ajustes realizados, descripción de cómo se calculó la contingencia y escalación, rango de precisión esperada.

- El WBS del proyecto debe estar alineado con el estimado de costos, es decir, cada uno de los paquetes de trabajo estimados deben existir en el WBS del proyecto.
- La estimación de la contingencia debe ser el resultado de la cuantificación de los riesgos.
- La estimación de la escalación se debe realizar de acuerdo con el flujo de caja definido para el proyecto y debe corresponder al cronograma de este.
- El estimado debe especificar la clase de estimado de costo, la fecha de realización, y la moneda de referencia.

## 5. CONTROL DEL COSTO

Una vez se ha realizado la estimación del costo es necesario llevar un seguimiento y control periódico al costo con el fin de analizar su desempeño y detectar variaciones entre el costo planificado y el costo real. Llevar un control durante la ejecución del proyecto permite determinar posibles desviaciones en el costo y tomar acciones correctivas tempranas para que el proyecto vuelva al estado deseado del plan.

El control de costos es el proceso de monitorear el estado de un proyecto mediante la actualización del presupuesto del proyecto y la gestión de cambios en la línea base del costo.

La eficiencia del control de costos puede reflejarse en el logro de los objetivos de control (*Hwang et al., 2018*), los principales objetivos son: mantener un proyecto dentro de su presupuesto, obtener un beneficio máximo según lo programado y dentro del presupuesto, mantener los gastos dentro del presupuesto inicial estimado, ofrecer al cliente una buena relación calidad-precio, monitorear el estado del proyecto y lograr una distribución equilibrada de los fondos del proyecto.

La comparación entre el costo real y el costo planificado muestra la variación del costo en una fecha determinada. Esta variación se debe principalmente a dos aspectos: los recursos utilizados para realizar el proyecto se han pagado más de lo planeado o se han consumido mayor cantidad de recursos de lo planeado (*Dinsmore & Cabanis, 2014*).

Hay una variedad de herramientas y técnicas empleadas para el control de costos entre las que se encuentran: la gestión o análisis del valor ganado, la curva S, técnicas de pronósticos, simulación Monte Carlo, Software de gestión de proyectos y recopilación automática de datos de costos.

## 5.1. GESTIÓN DEL VALOR GANADO

La gestión del valor ganado conocido por sus siglas en inglés como **EVM** (Earned Value Management) es uno de los métodos más empleados para el control de proyectos, se utiliza para medir el desempeño del proyecto en términos de costo y de tiempo.

Proporciona una estimación realista del rendimiento del proyecto en función de un presupuesto, a partir del progreso del proyecto pronostica el costo total del proyecto y la fecha de finalización. Para su aplicación toma como base los datos del WBS y el presupuesto del proyecto para cada paquete de trabajo.

En la Tabla 20 se presentan los principales indicadores del análisis de EVM, a partir de estos se puede determinar el desempeño del proyecto, analizar si en un momento determinado el proyecto está acorde con lo planeado o si se requerirán más recursos para finalizar el proyecto.

Adicionalmente, permite hacer pronósticos para conocer el estimado de costo a la conclusión del proyecto, que en otras palabras es el valor total que costará el proyecto teniendo en cuenta su desempeño actual.

Tabla 20. Indicadores del análisis de la Gestión del Valor Ganado.

INDICADOR	
<b>Valor planificado (PV)</b>	Es el presupuesto autorizado que se ha asignado al trabajo programado.
<b>Valor ganado (EV)</b>	Es el presupuesto asociado con el trabajo autorizado que se ha completado. Se calcula multiplicando el porcentaje total de trabajo completado hasta la fecha por el presupuesto planificado (BAC).
<b>Costo real (AC)</b>	Es el costo total incurrido por el trabajo en un cierto período de tiempo.
<b>Variación del costo (CV)</b>	Representa la diferencia entre el valor ganado y el costo real. <b>CV=EV – AC.</b>
<b>Variación del cronograma (SV)</b>	Representa la diferencia entre el valor ganado y el valor planificado <b>SV=EV – PV.</b>
<b>Índice de desempeño de costo (CPI)</b>	Es una medida de eficiencia del costo de los recursos presupuestados, expresado como la razón entre el valor ganado y el costo real (EV/AC). Si CPI es inferior a 1 indica un costo superior al planificado con respecto al trabajo completado, si es mayor a 1 indica un costo inferior con respecto al desempeño hasta la fecha.
<b>Índice de desempeño del cronograma (SPI)</b>	Es una medida de eficiencia del cronograma que se expresa como la razón entre el valor ganado y el valor planificado (EV/PV). Un valor de SPI inferior a 1 indica que la cantidad de trabajo llevada a cabo es menor que la planeada, si es superior a 1 indica que la cantidad de trabajo efectuada es mayor a la planeada.
<b>Índice de Desempeño del Trabajo por Completar (TCPI)</b>	Es una medida del desempeño del costo que se debe alcanzar con los recursos restantes a fin de cumplir con un determinado objetivo de gestión. <b>TCPI= (BAC – EV) / (BAC – AC).</b>
<b>Estimado a la Conclusión (EAC)</b>	Estima cuánto costará el proyecto al finalizar, representa la suma de los costos incurridos hasta la fecha y los costos estimados para el trabajo restante. Su cálculo depende de tres supuestos: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Todo el trabajo futuro se llevará a cabo de acuerdo con la tasa presupuestada. <b>EAC = AC + (BAC – EV)</b></li> <li>2. El trabajo restante se realizará según el índice de desempeño del costo (CPI) acumulativo en el que el proyecto ha incurrido hasta la fecha. <b>EAC = BAC / CPI</b></li> <li>3. El trabajo restante se realizará según una tasa de eficiencia que toma en cuenta tanto el CPI como el SPI. <b>EAC = AC + [(BAC – EV) / (CPI × SPI)]</b></li> </ol>
<b>Estimación hasta la conclusión del proyecto (ETC)</b>	Es el costo restante para completar todo el trabajo del proyecto, se calcula como la diferencia entre EAC y lo que se ha gastado hasta la fecha (AC). <b>ETC = EAC- AC</b>
<b>Variación a la conclusión (VAC)</b>	Indica la desviación positiva o negativa esperada al finalizar. <b>VAC = BAC – EAC.</b>

*Fuente: Adaptado de: A Guide to the Project Management Body of Knowledge (Project Management Institute, 2017) & Analysis of Project Cost Management Indicators at Residential Buildings (Ronald & Lumbantoruan, 2019)*

La efectividad de EVM como métrica de desempeño depende de algunos factores importantes. La primera, es la disponibilidad de información actualizada y muy precisa sobre el porcentaje de paquetes de trabajo completados, ya que es vital para determinar el valor ganado en un momento determinado. La precisión del valor ganado calculado depende de un sistema de informes, así como de la integridad de los miembros del equipo del proyecto para definir el porcentaje de trabajo realizado.

En la práctica, las organizaciones usan reglas de decisión simples para asignar porcentajes de finalización a los paquetes de trabajo (*Venkataraman & Pinto, 2008c*). Los métodos comunes para determinar los porcentajes de finalización son:

- **Regla 0/100:** esta regla asigna un valor de cero a una actividad del proyecto hasta que se complete. Una vez que la actividad es completada, se asigna un porcentaje de finalización del 100%. Esta regla es más adecuada para paquetes de trabajo que tienen duraciones muy cortas, ya que prácticamente no proporciona información sobre el estado del paquete de trabajo de forma continua.
- **Regla 50/50:** esta regla de decisión asigna un valor de finalización del 50% para cualquier actividad que se haya iniciado y lleva este valor hasta que se complete, en cuyo momento el valor de finalización cambia al 100 por ciento. Al igual que la regla 0/100, esta regla de decisión se usa con mayor frecuencia para paquetes de trabajo de muy corta duración.
- **Porcentaje de regla completa:** con esta regla de decisión los miembros del equipo deciden mutuamente sobre un conjunto de hitos de finalización. Por ejemplo, estos hitos de finalización predeterminados pueden ser 25%, 50%, 75% y 100%, o cualquier otro conjunto de valores definidos por el equipo.

La información en tiempo real proporcionada por EVM puede ser invaluable para recopilar información de costos más actualizada y para desarrollar planes realistas y significativos para abordar y rectificar cualquier problema sistemático asociado con la gestión de costos del proyecto.

## 5.2. CURVA “S”

La curva “S” es una gráfica del flujo de efectivo en función del tiempo, se utiliza ampliamente para realizar el control de costos en los proyectos, el progreso del proyecto se monitorea en función de los costos acumulados y se calcula en función del tiempo para los montos presupuestados y los costos reales.

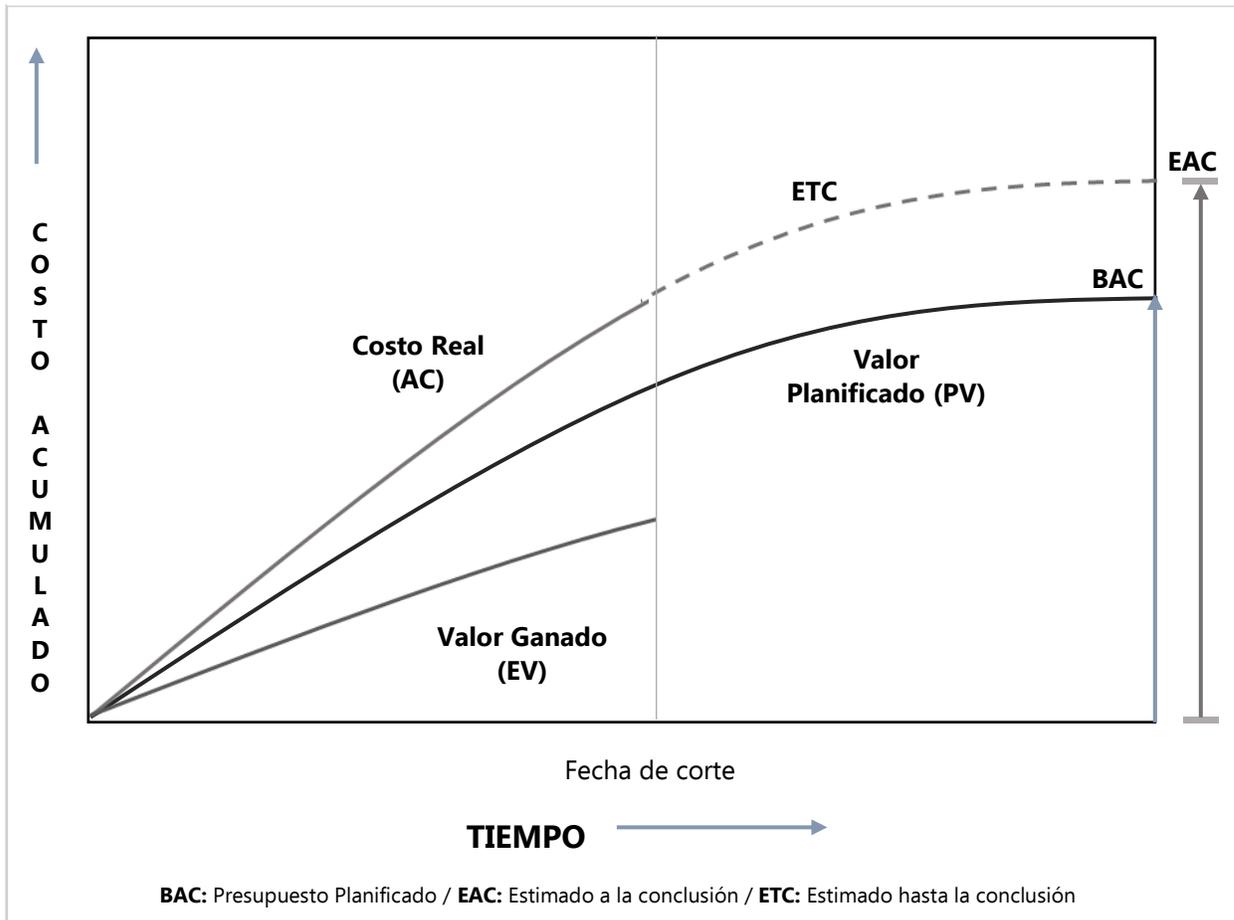
La relación entre el tiempo y el costo se representa gráficamente con el tiempo en el eje horizontal “x”, y con el costo en el eje vertical “y”. La forma típica de esta relación es en forma de S, donde los costos presupuestados en la etapa inicial son bajos y aumentan rápidamente durante la etapa principal de ejecución del proyecto, y luego hay una desaceleración a medida que se finaliza el trabajo.

La curva S representa la línea base del presupuesto del proyecto contra la cual se evaluarán los gastos reales del proyecto. Para monitorear el estado de un proyecto utilizando una curva “S”, los gastos acumulados del presupuesto del proyecto hasta la fecha se comparan con los patrones de gasto reales al final de cada período de interés. Cualquier desviación significativa fuera del rango establecido entre los gastos reales y planificados constituye un problema potencial que debe investigarse con el fin de tomar medidas correctivas.

Tanto la curva “S” como EVM son herramientas de control de costos similares que han sido ampliamente utilizadas por los gerentes de proyecto para medir el progreso de un proyecto determinado.

En la Figura 16 se presenta la Curva “S” en la cual se presentan los datos del costo real, valor planificado y valor ganado en un tiempo determinado. A partir de estos datos se realiza el estimado a la conclusión del proyecto, se aprecia que para el caso ilustrado el costo excede el presupuesto y además el proyecto se encuentra atrasado. Esta curva permite al equipo a partir de una manera visual dar un seguimiento y control al costo del proyecto.

Figura 16. Curva "S"



### 5.3. SOFTWARE PARA EL CONTROL DEL COSTO

Los desarrollos en los programas informáticos han hecho posible el seguimiento y monitoreo de proyectos a mayor detalle. Adicional a las técnicas anteriores, se emplea el uso de software para el control de costos.

Varios estudios han mostrado gran interés en mejorar el control de costos a través de software de gestión de proyectos, los más empleados son Primavera, Microsoft Project, Project Costing System, PRISM, SAP, COINS y WinQS. El empleo de Software permite conocer en tiempo real el progreso y desempeño del proyecto facilitando el control.

## 6. CASO DE ESTUDIO

A partir de la información de un proyecto desarrollado en el año 2013 por una empresa mexicana de una Planta Isomerizadora se realiza el estimado de costos clase V, clase IV y clase III, empleando diferentes técnicas de estimación. Los estimados obtenidos se comparan con el último estimado del proyecto, se define la precisión de cada técnica y clase de estimado, esto con el fin de cotejar la precisión dada en el marco teórico.

La información de la Planta Isomerizadora solo será empleada para fines académicos, por lo que solo se dará a conocer datos relevantes del proyecto requeridos para la estimación del costo.

El proyecto es una unidad de proceso Penex con un desisohexanizador, la cual isomeriza la nafta ligera de destilación directa ( $C_5/C_6$ ) en moléculas  $C_5/C_6$  ramificadas de mayor octanaje, la entrada del proceso es una materia prima de nafta ligera (pentanos y hexanos mezclados) y se convierten a componentes de mezcla de gasolina de motor. La planta se diseña con una capacidad de 21.000 barriles por día.

### 6.1. Estimación Análoga

Con datos recopilados del HPI Construction Boxscore Update se desarrolló un programa en Excel con una base de datos que presenta información de más de 800 proyectos ejecutados/planeados en diferentes países del mundo para diferentes años. La base de datos recopila 255 diferentes tipos de plantas entre las que se pueden encontrar: acetona, amoníaco, almacenamiento de gas y petróleo, azufre, biodiesel, cloruro de vinilo, coquizadora, cráqueo, destiladora, etanol, hidrotratadora, isomerizadora, nafta, recuperación de hidrógeno, separación Gas/Oil, tratamiento de agua, entre otras plantas.

El programa presenta el país y año en el que se ejecutó el proyecto, compañía a cargo, tipo de proyecto o planta, capacidad y su costo de venta para el año base.

Figura 17. Interfaz del programa con la base de datos.

The screenshot shows a window titled "BASE DE DATOS DE PROYECTOS EN LA INDUSTRIA QUÍMICA: Realizado por Camila Alejandra Lizarazo". The interface is divided into two main search sections. The top section, "Búsqueda de proyectos por país", includes a "CONTINENTE:" dropdown menu set to "AMÉRICA" and a "PAÍS:" dropdown menu set to "Colombia". Below these are "GO" and "EXIT" buttons. The bottom section, "Búsqueda de proyectos por tipo de planta", includes a "TIPO DE PLANTA:" dropdown menu set to "Isomerizadora" and a "Buscar" button. A separate search area on the left prompts the user to "Digite el nombre del tipo de planta que desea buscar." with an empty text input field and a "Buscar" button. At the top left, there is a "BASE DE DATOS COMPLETA:" label and an "IR" button.

El usuario al usar el programa puede decidir entre ver la base de datos completa, ver todos los proyectos de un país específico, o ver los proyectos de un tipo de planta seleccionado. Al ejecutarse, el programa actualiza los costos de los proyectos al año 2020, y presenta los diferentes proyectos, costo y capacidad.

Con la información de la base de datos el estimador puede realizar una estimación análoga basándose en la información pasada de proyectos similares, con un rango de precisión promedio de -30% / +50% al ser un estimado de orden de magnitud, este estimado se realiza en la etapa inicial del proyecto ya que la información es limitada, el dato de entrada para la estimación es la capacidad de la nueva planta.

Para estimar el costo de la nueva planta el usuario ingresa la capacidad del nuevo proyecto en las unidades solicitadas por el programa, con la información de los proyectos históricos se estima el costo que tendría el proyecto tomando como referencia cada uno de los casos, e igualmente da un costo estimado final referente al promedio de todos los costos estimados. En caso de que el usuario no quiera incluir algún caso histórico en específico debe eliminarlo antes de realizar la estimación.

Figura 18. Estimado de Costo Clase V base de datos.

Se realiza la estimación análoga para la planta Isomerizadora con el programa, obteniendo la información histórica de 12 proyectos desarrollados entre los años 2001-2009 la cual se presenta en la Tabla 21.

Tabla 21. Planta Isomerizadora: Base de datos

País	Compañía	Capacidad (Mbpd)	Costo (millones de USD)	Año base	Costo actualizado (millones de USD)
Bielorrusia	Naftan Refinery	6.02	\$ 20.00	2006	\$ 23.87
Irán	Esfahan Oil Refinery Co	27	\$ 188.00	2009	\$ 214.76
Pakistán	National Rfy Ltd	5	\$ 55.30	2009	\$ 63.17
Rusia	Achinsk Oil Refinery	6.02	\$ 100.00	2007	\$ 113.48
Rusia	Lukoil Permnefteorgsyntez	7.03	\$ 70.00	2007	\$ 79.43
Taiwan	Chinese Petroleum Corp	5	\$ 5.40	2003	\$ 8.01
México	PEMEX	10.5	\$ 39.47	2006	\$ 47.10
Venezuela	PDVSA	22	\$ 73.00	2001	\$ 110.38
Filipinas	Petron Corp	10	\$ 35.00	2002	\$ 52.75
Rumania	Rompetro Rafinare	3.51	\$ 18.40	2009	\$ 21.02
Sri Lanka	Ceylon Petr Corp	3.67	\$ 2.50	2009	\$ 2.86
Trinidad	Petroleum Co Trinidad & Tobago Ltd	10	\$ 32.00	2002	\$ 48.23

Al incluir todos los casos históricos el programa arroja un estimado Clase V de \$100.240.000 USD para la planta isomerizadora con capacidad de 21.000 BPD.

*Figura 19. Estimado Clase V caso de estudio.*

The screenshot shows a software window titled "Estimado de Costo Clase V" with a close button (X) in the top right corner. The window content is as follows:

- Header: **Planta de Isomerizadora**
- Input 1: **Capacidad nueva planta:**  **Mbpd**
- Input 2: **Costo nueva planta:**  **Millones USD**
- Button: **Estimar costo** (centered)
- Button: **Quit** (bottom left)
- Button: **RESET** (bottom right)

Igualmente se incluye el costo estimado tomando como referencia cada caso histórico por separado. El costo estimado de la nueva planta oscila entre 8 y 240 millones de dólares, para el caso de estudio se decide no incluir los casos históricos de Bielorrusia, Taiwán y Sri Lanka, ya que sus costos estimados no se relacionan con los valores obtenidos en los demás casos.

Tabla 22. Resultados Estimado Clase V para los diferentes casos en la base de datos.

País	Compañía	Capacidad (Mbpd)	Costo (millones de USD)	Año base	Costo actualizado (millones de USD)	Estimado de costo nueva planta (millones de USD)
Bielorrusia	Naftan Refinery	6.02	\$ 20.00	2006	\$ 23.87	\$ 50.52
Irán	Esfahan Oil Refinery Co	27	\$ 188.00	2009	\$ 214.76	\$ 184.70
Pakistán	National Rfy Ltd	5	\$ 55.30	2009	\$ 63.17	\$ 149.44
Rusia	Achinsk Oil Refinery	6.02	\$ 100.00	2007	\$ 113.48	\$ 240.16
Rusia	Lukoil Permnefteorgsyntez	7.03	\$ 70.00	2007	\$ 79.43	\$ 153.16
Taiwan	Chinese Petroleum Corp	5	\$ 5.40	2003	\$ 8.01	\$ 18.95
México	PEMEX	10.5	\$ 39.47	2006	\$ 47.10	\$ 71.39
Venezuela	PDVSA	22	\$ 73.00	2001	\$ 110.38	\$ 107.34
Filipinas	Petron Corp	10	\$ 35.00	2002	\$ 52.75	\$ 82.33
Rumania	Rompetrol Rafinare	3.51	\$ 18.40	2009	\$ 21.02	\$ 61.49
Sri Lanka	Ceylon Petr Corp	3.67	\$ 2.50	2009	\$ 2.86	\$ 8.15
Trinidad	Petroleum Co Trinidad & Tobago Ltd	10	\$ 32.00	2002	\$ 48.23	\$ 75.27

Se realiza nuevamente la estimación del costo Clase V sin incluir los casos anteriormente mencionados, y se obtiene un costo de 125.000.000 USD.

Figura 20. Estimado Clase V caso de estudio II.

Estimado de Costo Clase V

Planta de Isomerizadora

Capacidad nueva planta:  Mbpd

Costo nueva planta:  Millones USD

Al costo obtenido por el programa se le agrega un valor de contingencia, se toma como referencia el porcentaje sugerido por AACE (*Rothwell, 2005*) del 50% al encontrarse el proyecto en la etapa conceptual. El valor de contingencia es de 63.000.000 USD.

Finalmente, el estimado clase V obtenido es de 188.000.000 USD con un rango de precisión de -30% en el lado más bajo y +50% en el lado más alto. Con estos datos se espera que el costo real del proyecto se encuentre entre 131.600.000 y 282.000.000 USD.

## **6.2. Estimación por factores de Lang**

Al desarrollar una estimación de costo a partir de factores se obtiene un estimado Clase V o Clase IV dependiendo del nivel de detalle e información disponible, para el caso de estudio el estimado obtenido con los factores de Lang será un Clase IV debido a que se cuenta con información detallada de los equipos de la planta. En este método el dato de entrada es el costo de los equipos, el cual se tomará del valor de los equipos obtenido en la simulación realizada en Aspen Capital Cost Estimator como dato de referencia, el cual es de **\$ 24.025.500 USD**, en el siguiente apartado se aborda con mayor detalle el estimado con Aspen.

Para el estimado Clase IV se emplearán los factores de Lang para una planta de procesamiento de fluidos.

En la tabla 23 se presenta un desglose de los costos obtenidos con los factores de Lang.

Tabla 23. Estimación Factores de Lang

PLANTA DE PROCESAMIENTO DE FLUIDOS				
<b>COSTOS DIRECTOS</b>	<b>Material</b>	<b>Mano de Obra</b>	<b>Total</b>	<b>Total</b>
Compra de Equipo	1	N/A	1	\$ 24,025,500
Ajuste de equipo	0.014	0.024	0.04	\$ 961,020
Desarrollo del sitio	0.016	0.029	0.05	\$ 1,201,275
Hormigón	0.028	0.052	0.08	\$ 1,922,040
Acero estructural	0.1	0.03	0.13	\$ 3,123,315
Edificios	0.016	0.006	0.02	\$ 480,510
Tubería	0.52	0.45	0.97	\$ 23,304,735
Instrumentación y control	0.14	0.28	0.42	\$ 10,090,710
Eléctrico	0.088	0.072	0.16	\$ 3,844,080
Aislamiento	0.06	0.012	0.07	\$ 1,681,785
Pintura	0.008	0.05	0.06	\$ 1,441,530
<b>Total Costos Directos =</b>	<b>1.99</b>	<b>1.01</b>	<b>3</b>	<b>\$ 72,076,500</b>
<b>COSTOS INDIRECTOS</b>				
Mano de obra indirecta & Costos de campo	0.22	0.5	0.72	\$ 17,298,360.00
Contratista de Ingeniería & Honorarios	0.02	0.89	0.91	\$ 21,863,205.00
Ingeniería & Supervisión	0.085	0.33	0.41	\$ 9,850,455.00
<b>Total Costos Indirectos =</b>	<b>0.32</b>	<b>1.72</b>	<b>2.04</b>	<b>\$ 49,012,020.00</b>
<b>COSTO TOTAL</b>	<b>2.32</b>	<b>2.73</b>	<b>5.04</b>	<b>\$121,088,520.00</b>

Al valor obtenido se le agrega un porcentaje de utilidad (7%), que al sumarlo del costo de Lang da como resultado el subtotal del proyecto, se incluye además el valor de contingencia, se toma como referencia el porcentaje sugerido por (PEMEX, 2012) del 20% para estimados clase IV.

Tabla 24. Estimado Clase IV.

<b>COSTO TOTAL LANG</b>	<b>2.32</b>	<b>2.73</b>	<b>5.04</b>	<b>\$ 121,088,520</b>
UTILIDAD			7%	\$ 8,476,196
<b>SUBTOTAL</b>				\$ 129,564,716
CONTINGENCIA			20%	\$ 25,912,943
<b>TOTAL DEL PROYECTO (USD)</b>				<b>\$ 155,477,660</b>

Finalmente, el estimado Clase IV para el proyecto es de \$ 155.477.660 USD con un rango de precisión de -20% / +35%, se esperaría que el costo total del proyecto se encuentre entre \$124,382,128 y \$209,894,841 USD.

### 6.3. Estimación por Aspen Capital Cost Estimator

A partir de los datos de ingeniería y las hojas de datos de los equipos del proyecto de la planta Isomerizadora se realiza una estimación clase III en el software Aspen Capital Cost Estimator, se incluyen 60 equipos en la estimación, en la tabla 25 se presenta un resumen con los resultados obtenidos en la simulación.

Tabla 25. Estimación por Aspen Capital Cost Estimator

Aspen ICARUS							
		Project Cost Summary					
Name: CAMILA ALEJANDRA LIZARAZO CASTELLANOS							
Project Title: Planta Isomerizadora 21.000 BPD							
Project Name: Planta Isomerizadora				Scenario Name: Planta Isomerizadora		Prep. By: CAMILA LIZARAZO	
Proj. Location: México			Job No: REV 1		Currency: DOLLARS USD		
Estimate Date: 25NOV21 17:09:03		Est. Class: Clase III					
Account	MH	Wage Rate	Labor Cost	Matl Cost	Total Cost	Percentages	
(2) Equipment	55,730	19.51	1,087,452	24,025,500	25,112,952	45.4%	
(3) Piping	135,979	19.17	2,606,713	3,747,648	6,354,361	11.5%	
(4) Civil	96,331	15.40	1,483,694	2,601,972	4,085,666	7.4%	
(5) Steel	90,608	17.83	1,615,376	2,976,302	4,591,678	8.3%	
(6) Instruments	42,631	19.67	838,404	7,566,421	8,404,824	15.2%	
(7) Electrical	74,059	18.77	1,389,953	2,607,724	3,997,677	7.2%	
(8) Insulation	81,968	14.56	1,193,487	670,820	1,864,307	3.4%	
(9) Paint	46,294	14.28	661,236	216,337	877,573	1.6%	
<b>Total Direct Field Costs</b>	<b>623,601</b>	<b>139.19</b>	<b>10,876,313</b>	<b>44,412,724</b>	<b>55,289,037</b>	100.0%	

De la simulación de Aspen se toma el valor de costo directo total de campo (\$50.570.613 USD) que incluye el rubro de equipos, tuberías, área civil y eléctrica, instrumentación, aislamiento y pintura. A partir de ese dato se calcula el valor por fletes, gastos de aduana, seguros, maniobras y refacciones (**8%**).

Del programa se toma el valor de renta de maquinaria, pruebas y puesta en marcha, las horas de ingeniería requeridas. Con los rubros anteriores se obtiene el costo directo total.

Tabla 26. Estimado Clase III: Costo directo total

<b>Total Direct Field Costs</b>	<b>55,289,037</b>	100.0%	of TDC
FLETES, GASTOS DE ADUANA, SEGUROS, MANIOBRAS Y REFACCIONES	3,553,018	8.0%	OF TDC
RENTA DE MAQUINARIA (Renta de Equipos, andamios, maquinaria menor y consumibles)	4,002,201		
INGENIERIA BÁSICA	1,406,200	14,062	\$ 100.00
INGENIERIA DETALLE Y COMPLEMENTARIA	3,065,100	52,800	\$ 60.00
PERMISOS	882,631	1.5%	
PRUEBAS Y PUESTA EN MARCHA	7,940,501		
<b>COSTO DIRECTO TOTAL (USD)</b>	<b>76,241,588</b>		

En la tabla 27 se presenta un resumen con los rubros del costo indirecto.

Tabla 27. Estimado Clase III: Costo indirecto

 <b>Aspen ICARUS</b> <b>Indirect Field Cost Summary by Contractor</b>			
Code	Description	Ind MH	Ind Cost
	Fringe Benefits	0	2,284,001
	Burdens	0	2,610,301
	Misc (Insurance, Etc)	0	821,200
	Field Services	0	1,326,800
	Temp Const, Utilities	0	289,100
	Home Office Const Suppt	17,480	1,787,400
	G and A Overheads	0	2,146,894
	Contract Fee	0	3,068,589
	<b>INDIRECT COSTS</b>	<b>0</b>	<b>14,334,285</b>

Se incluye un porcentaje de utilidad de la suma del costo directo e indirecto, estos 3 rubros dan el subtotal del proyecto.

Tabla 28. Estimado Clase III: Subtotal del proyecto.

<b>COSTO DIRECTO TOTAL (USD)</b>	<b>76,241,588</b>	
<b>COSTO INDIRECTO</b>	<b>14,334,285</b>	19.2%
<b>UTILIDAD</b>	<b>6,340,311</b>	7.0%
<b>SUBTOTAL DEL PROYECTO (USD)</b>	<b>96,916,184</b>	

El porcentaje de contingencia para el estimado clase III que se emplea es el 15% del subtotal del proyecto, se toma como referencia el porcentaje dado en el Manual del Sistema Institucional de Desarrollo de Proyectos (*PEMEX, 2012*).

*Tabla 29. Estimado Clase III: Total del proyecto sin escalación.*

<b>SUBTOTAL DEL PROYECTO (USD)</b>	<b>96,916,184</b>	
<b>CONTINGENCIAS</b>	<b>14,537,428</b>	<b>15.0%</b>
<b>TOTAL DE PROYECTO SIN ESCALACIÓN (USD)</b>	<b>111,453,612</b>	

Finalmente, para obtener el estimado clase III se debe incluir un monto por escalación que hace frente a las variaciones de los niveles de precios por condiciones económicas, de mercado y tecnológicas que pueden ocurrir durante la ejecución del proyecto, toda vez que se asume que no todos los pagos del proyecto se hacen en el momento cero. Para el caso de estudio el porcentaje de escalación obtenido es del 5.53% del total del proyecto sin escalación, para más información ver ANEXO 2.

*Tabla 30. Estimado Clase III*

<b>TOTAL DE PROYECTO SIN ESCALACIÓN (USD)</b>	<b>111,453,612</b>	
<b>ESCALACIÓN</b>	<b>6,163,385</b>	<b>5.53%</b>
<b>TOTAL DE PROYECTO (USD)</b>	<b>117,616,996</b>	

El estimado clase III del proyecto es de \$117.616.996 USD con un rango de precisión de -15% / +25%, por lo que se espera que el costo del proyecto se encuentre entre \$99.974.447 y \$147.021.245 USD.

#### **6.4. Comparación Estimados vs Costo real del proyecto**

En la tabla se presenta un resumen del valor obtenido en los estimados clase V, clase IV, clase III, y el rango del costo esperado del proyecto basado en la precisión de cada clase de estimado, además se presenta el costo del proyecto actualizado.

*Tabla 31. Comparación Estimados de costo.*

	<b>Costo (USD)</b>	<b>Rango esperado</b>		
<b>CLASE V</b>	\$ 188,000,000	\$ 131,600,000	-	\$ 282,000,000
<b>CLASE IV</b>	\$ 155,477,660	\$ 124,382,128	-	\$ 209,894,841
<b>CLASE III</b>	\$ 117,616,996	\$ 99,974,447	-	\$ 147,021,245
<b>REAL</b>	\$ 124,590,106			

Se evidencia que el costo del proyecto se encuentra dentro del rango esperado de las 3 clases de estimado, por lo que se comprueba la precisión de las técnicas empleadas.

Se comprueba que conforme avanza el proyecto el estimado es más preciso, ya que se cuenta con información más detallada, por otro lado, las contingencias disminuyen al conocer más costos que eran desconocidos o que no estaban cuantificados.

	<b>Costo (USD)</b>	<b>Contingencia</b>	
<b>CLASE V</b>	\$188,000,000	50%	\$ 63,000,000
<b>CLASE IV</b>	\$155,477,660	20%	\$ 25,912,943
<b>CLASE III</b>	\$117,616,996	15%	\$ 14,537,428
<b>REAL</b>	\$124,590,106		

## 7. CONCLUSIONES

- La técnica de estimación análoga puede emplearse para la estimación Clase V, esperando un rango de precisión del -30% / +50%, se requiere contar con información de proyectos similares su costo y capacidad, para realizar el estimado, es importante actualizar los valores empleando índices de costos para obtener valores más reales.
- La estimación con factores de Lang se empleó con éxito para la estimación Clase IV al contar con el estimado de costo de los equipos, para su aplicación es fundamental contar con ese dato ya que a partir del valor del costo de los equipos se estima el resto de los costos directos e indirectos. De la confiabilidad del costo del equipo dependerá la clase de estimado ya que puede ser un Clase V o Clase IV.

Al comparar el resultado del estimado Clase IV (**\$155.477.660**) con el costo del proyecto se obtiene una precisión del estimado de **-20%**, el costo del proyecto fue menor al estimado, lo cual nos indica que en caso de haber utilizado el costo estimado no se iban a incurrir en sobrecostos a la hora de ejecutar el proyecto, además el valor del proyecto se encuentra dentro del rango esperado confirmando la precisión de los Factores de Lang para la estimación del costo Clase IV, toda vez que se cuente con información confiable del costo de los equipos.

- Al emplear el software de estimación “Aspen Capital Cost Estimator“ se obtuvo un estimado Clase III con un rango de precisión de -15% / +25%, se utilizaron las hojas de datos de los equipos con sus especificaciones técnicas para obtener el estimado del costo de los equipos.

Al comparar el resultado del estimado Clase III (**\$117.616.996**) con el costo del proyecto se obtiene una precisión del estimado de **+6%**, el cual cae dentro del rango esperado de precisión de la técnica, por lo cual, se recomienda la aplicación del programa Aspen Capital Cost Estimator para la realización de estimados Clase III, recalando la importancia de contar con la ingeniería detallada del proyecto y la información técnica de los equipos.

- Es importante incluir un valor de contingencia en el estimado que haga frente a las incertidumbres y variabilidades inherentes al proyecto en todas sus etapas, la contingencia toma en cuenta 2 tipos de rubros; costos conocidos/no cuantificables, así como elementos de costos aún no reconocidos. Conforme avanza el proyecto los costos conocidos/cuantificables aumentan debido a que hay más información disponible, mientras que la cantidad de contingencia disminuye (costos conocidos/no cuantificables y costos aún no reconocidos) ya que se cuenta con información del proyecto más detallada. En el caso de estudio se pudo observar como el rubro de contingencia disminuía al avanzar en la clase de estimado.
- Al momento de realizar el estimado de costo de un proyecto hay una variedad de factores que influyen en el proceso de estimación y que además incidirán en el desempeño del proyecto. Entre los factores que afectan la precisión se encuentran: información disponible de proyecto, técnica de estimación empleada, confiabilidad de los datos históricos, experiencia del estimador, cambios en el alcance del proyecto, factores económicos y riesgos del proyecto. Es importante tener en cuenta estos factores a la hora de desarrollar el estimado.
- Durante las primeras etapas de un proyecto se tiene una mayor capacidad para influir en el resultado de un proyecto que durante las etapas posteriores, de igual forma el impacto de las decisiones tomadas en las primeras etapas tiene una mayor influencia en el costo final de un proyecto. Una mayor definición del proyecto en las etapas tempranas puede traer consigo menores cambios durante la ejecución del proyecto.  
A medida que avanza un proyecto las decisiones o cambios que se realicen se traduce en mayores gastos. La mayoría de las oportunidades para influir en el costo del proyecto ocurren antes de iniciar la ingeniería de detalle, por lo que es importante una buena planeación y definición del proyecto para evitar sobrecostos durante la ejecución.
- Se recomienda el empleo de la metodología FEL al desarrollar un proyecto, FEL se basa en un concepto de puertas de decisión o compuertas, en la que antes de pasar a la siguiente etapa se debe haber finalizado y aprobado la fase anterior

con el fin de garantizar el cumplimiento de los objetivos del proyecto y reducir costos.

La metodología FEL mide e incrementa el nivel de definición de un proyecto, aumentando así la probabilidad de éxito en términos de costo, cronograma y operabilidad.

- En el documento se abordaron diferentes técnicas y herramientas para estimar costos de proyectos, las cuales se clasificaron de acuerdo con la clase de estimado en la que es más acorde su aplicación.

En un estimado Clase V se puede emplear la estimación Análoga, escalación de Capacidad, estimación Paramétrica, estimación por Factores de equipos, Análisis de Regresión.

Para un estimado Clase IV se recomienda la estimación Paramétrica, estimación por Factores de equipos, estimación por Análisis de Regresión, estimación por Inteligencia Artificial y Software de estimación de costos.

En un estimado Clase III y Clase II se puede usar Software de estimación de costos y una estimación Ascendente: Costo unitario semidetallado.

Finalmente, en el estimado Clase I se emplea una estimación Ascendente: Costo unitario detallado.

Hay técnicas que se pueden emplear para varias clases de estimado, su aplicación y precisión dependerá de la información disponible, así como de la calidad y confiabilidad de la información a emplear.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- AACE International. (2005). *AACE International Recommended Practice No. 18R-97: COST ESTIMATE CLASSIFICATION SYSTEM – AS APPLIED IN ENGINEERING, PROCUREMENT, AND CONSTRUCTION FOR THE PROCESS INDUSTRIES*. 18.
- AACE International. (2008). *AACE International, Recommended Practice No. 40R-08, CONTINGENCY ESTIMATING – GENERAL PRINCIPLES*.
- AACE International. (2011). *AACE International, Recommended Practice No. 59R-10, DEVELOPMENT OF FACTORED COST ESTIMATES – AS APPLIED IN ENGINEERING, PROCUREMENT, AND CONSTRUCTION FOR THE PROCESS INDUSTRIES*.
- AACE International. (2019). *AACE International, Recommended Practice 18R-97, COST ESTIMATE CLASSIFICATION SYSTEM – AS APPLIED IN ENGINEERING, PROCUREMENT, AND CONSTRUCTION FOR THE PROCESS INDUSTRIES*.
- Acar Yildirim, H., & Akcay, C. (2019). Time-cost optimization model proposal for construction projects with genetic algorithm and fuzzy logic approach. *Revista de La Construcción*, 18(3), 554–567. <https://doi.org/10.7764/rdlc.18.3.554>
- Akintoye, A. (2000). Analysis of factors influencing project cost estimating practice. *Construction Management and Economics*, 18(1), 77–89. <https://doi.org/10.1080/014461900370979>
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2013). Practical Guide to Cost Estimating. In *AASHTO*. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.102958>
- An, S. H., Cho, H., & Lee, U. K. (2011). Reliability assessment of conceptual cost estimates for building construction projects. *International Journal of Civil Engineering*, 9(1), 9–16.
- An, S. H., Park, U. Y., Kang, K. I., Cho, M. Y., & Cho, H. H. (2007). Application of Support Vector Machines in Assessing Conceptual Cost Estimates. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 21(4), 259–264. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(2007\)21:4\(259\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(2007)21:4(259))
- Arata, A. (2009). *Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales: Aplicación de la Plataforma R-MES*. RIL Editores.
- Arif, F., Lodi, S. H., & Azhar, N. (2015). Factors influencing accuracy of construction project cost estimates in Pakistan: Perception and reality. *International Journal of Construction Management*, 15(1), 59–70. <https://doi.org/10.1080/15623599.2015.1012141>
- Asmoro, T. H. (2014). Facing Project Cost Exposure during Front End Loading (FEL) Implementation. *PM World Journal*, III(IX), 1–7.
- Azofeita, C. (2004). Aplicación de la Simulación Monte Carlo en el cálculo del riesgo usando Excel. *Tecnología En Marcha*, 17(1), 97–109. <https://doi.org/10.2307/3279087>
- Bakhshi, P., & Touran, A. (2014). An overview of budget contingency calculation methods in construction industry. *Procedia Engineering*, 85, 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.528>
- Baloi, D., & Price, A. D. F. (2001). Evaluation of Global Risk Factors Affecting Cost Performance in Mozambique. *RICS Construction and Building Conference*.
- Batavia, R. (2001). Front-End Loading for Life Cycle Success. *Offshore Technology Conference*. <https://doi.org/10.4043/12980-ms>
- Bayram, S., Ocal, M. E., Laptali Oral, E., & Atis, C. D. (2016). Comparison of multi layer perceptron (MLP) and radial basis function (RBF) for construction cost estimation: the case of Turkey. *Journal of Civil Engineering and Management*, 22(4), 480–490. <https://doi.org/10.3846/13923730.2014.897988>
- Biggeri, M., & Dusek, A. S. (2018). Desarrollo de estimados de costos de un proyecto. *Petrotecnia*, 5, 58–63.
- Bingham, E., & Gibson, G. E. (2017). Infrastructure Project Scope Definition Using Project Definition Rating Index. *Journal of Management in Engineering*, 33(2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000483](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000483)
- Cerezo Narváez, A., Pastor Fernández, A., Otero Mateo, M., & Ballesteros Pérez, P. (2020). Integration of Cost and Work Breakdown Structures in the Management of Construction Projects. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/app10041386>
- Cheng, M. Y., & Hoang, N. D. (2014). Interval estimation of construction cost at completion using least squares support vector machine. *Journal of Civil Engineering and Management*, 20(2), 223–236. <https://doi.org/10.3846/13923730.2013.801891>
- Cheng, M. Y., Tsai, H. C., & Sudjono, E. (2010). Conceptual cost estimates using evolutionary fuzzy hybrid neural network for projects in construction industry. *Expert Systems with Applications*, 37(6), 4224–4231. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.11.080>

- Choi, H. H., Cho, H. N., & Seo, J. W. (2004). Risk Assessment Methodology for Underground Construction Projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 130(2), 258–272. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2004\)130:2\(258\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2004)130:2(258))
- Couper, J. (2003). *PROCESS ENGINEERING ECONOMICS*. Marcel Dekker.
- D Negri, C., & De Vito, L. (2006). Introducción al razonamiento aproximado: lógica difusa. *Revista Americana de Medicina Respiratoria*, 6(3), 126–136.
- de Oliveira, G. L., Kiperstok, A., Kalid, R. de A., Esquerre, K. P. S. O. R., & Sales, E. A. (2016). TECLIM method for rational water use in industry: the bank of ideas in the context of the front-end loading methodology. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 21(4), 753–764. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016109240>
- Dinsmore, P., & Cabanis, J. (2014). Project Cost Management in Practice. In *The AMA Handbook of Project Management* (4th ed., pp. 105–112).
- Elmousalami, H. H. (2020a). Artificial Intelligence and Parametric Construction Cost Estimate Modeling: State-of-The-Art Review. *Journal of Construction Engineering and Management*, 146(1). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001678](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001678)
- Elmousalami, H. H. (2020b). Comparison of Artificial Intelligence Techniques for Project Conceptual Cost Prediction. *IEEE Transactions on Engineering Management*. <https://doi.org/10.1109/TEM.2020.2972078>
- Elmousalami, H. H., Elyamany, A. H., & Ibrahim, A. H. (2018a). Evaluation of Cost Drivers for Field Canals Improvement Projects. *Water Resources Management*, 32(1), 53–65. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1747-x>
- Elmousalami, H. H., Elyamany, A. H., & Ibrahim, A. H. (2018b). Predicting Conceptual Cost for Field Canal Improvement Projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 144(11), 1–8. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001561](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001561)
- Elzomor, M., Burke, R., Parrish, K., & Gibson, E. (2018). Front-End Planning for Large and Small Infrastructure Projects: Comparison of Project Definition Rating Index Tools. *Journal of Management in Engineering*, 34(4), 1–12. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000611](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000611)
- Emsley, M. W., Lowe, D. J., Duff, A. R., Harding, A., & Hickson, A. (2002). Data modelling and the application of a neural network approach to the prediction of total construction costs. *Construction Management and Economics*, 20(6), 465–472. <https://doi.org/10.1080/01446190210151050>
- Enshassi, A., Mohamed, S., & Madi, I. (2005). Factors affecting accuracy of cost estimation of building contracts in the Gaza Strip. *Journal of Financial Management of Property and Construction*, 10(2), 115–125. <https://doi.org/10.1108/13664380580001069>
- Guang, L. (2013). Application of Genetic Algorithm and Neural Network in Construction Cost Estimate. *Advanced Materials Research*, 756–759, 3194–3198. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.756-759.3194>
- Hameed Memon, A., Ahmed Memon, N., Nasir Laghari, A., Akram Akhund, M., Ahmed, S., & Usama Imad, H. (2018). Common Factors of Cost Escalation in Construction Industry of Pakistan. *Technology & Applied Science Research*, 8(6), 3508–3511. <https://www.researchgate.net/publication/329895152%0ACommon%0Awww.etasr.com>
- Hammad, M. W., Abbasi, A., & Ryan, M. J. (2015). A New Method of Cost Contingency Management. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 38–42. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2015.7385604>
- Haque, K. M. A., & Hasin, M. A. A. (2012). Genetic Algorithm for Project Time-Cost Optimization in Fuzzy Environment. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 5(2), 364–381. <https://doi.org/10.3926/jiem.410>
- Hatamleh, M. T., Hiyassat, M., Sweis, G. J., & Sweis, R. J. (2018). Factors affecting the accuracy of cost estimate: Case of Jordan. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 25(1), 113–131. <https://doi.org/10.1108/ECAM-10-2016-0232>
- Henry, R. M., McCray, G. E., Purvis, R. L., & Roberts, T. L. (2007). Exploiting organizational knowledge in developing IS project cost and schedule estimates: An empirical study. *Information and Management*, 44(6), 598–612. <https://doi.org/10.1016/j.im.2007.06.002>
- Humphreys, K. K. (2005). *Project and Cost Engineers' Handbook* (K. K. HUMPHREYS (ed.); 4th ed., Vol. 4). Marcel Dekker. <https://doi.org/10.1080/03043799308928353>
- Hwang, B. G., Shan, M., Zhu, L., & Lim, W. C. (2018). Cost control in megaprojects: efficacy, tools and techniques, key knowledge areas and project comparisons. *International Journal of Construction*

- Management*, 20(5), 437–449. <https://doi.org/10.1080/15623599.2018.1484976>
- Ji, S. H., Park, M., & Lee, H. S. (2010). Data Preprocessing-Based Parametric Cost Model for Building Projects: Case Studies of Korean Construction Projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(8), 844–853. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000197](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000197)
- Jin, R., Han, S., Hyun, C., & Kim, J. (2014). Improving Accuracy of Early Stage Cost Estimation by Revising Categorical Variables in a Case-Based Reasoning Model. *Journal of Construction Engineering and Management*, 140(7), 1–11. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000863](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000863)
- Jrade, A., & Alkass, S. (2001). A Conceptual Cost Estimating Computer System for Building Projects. *AACE International Transactions*, 1–10.
- Jrade, A., & Alkass, S. (2007). Computer-Integrated System for Estimating the Costs of Building Projects. *Journal of Architectural Engineering*, 13(4), 205–223. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0431\(2007\)13:4\(205\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0431(2007)13:4(205))
- Kalogirou, S. A. (2014). Designing and Modeling Solar Energy Systems. In *Solar Energy Engineering* (pp. 553–664).
- Kim, G. H., An, S. H., & Kang, K. I. (2004). Comparison of construction cost estimating models based on regression analysis, neural networks, and case-based reasoning. *Building and Environment*, 39(10), 1235–1242. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.02.013>
- Kim, K. J., & Kim, K. (2010). Preliminary Cost Estimation Model Using Case-Based Reasoning and Genetic Algorithms. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 24(6), 499–505. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000054](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000054)
- Kim, S. (2013). Hybrid forecasting system based on case-based reasoning and analytic hierarchy process for cost estimation. *Journal of Civil Engineering and Management*, 19(1), 86–96. <https://doi.org/10.3846/13923730.2012.737829>
- KPGM. (1997). *Failure rate statistics over IT projects failure rate*.
- Lim, B., Nepal, M., Skitmore, M., & Xiong, B. (2016). Drivers of the accuracy of developers' early stage cost estimates in residential construction. *Journal of Financial Management of Property and Construction*, 21, 4–20.
- Liu, L., & Zhu, K. (2007). Improving cost estimates of construction projects using phased cost factors. *Journal of Construction Engineering and Management*, 133(1), 91–95. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2007\)133:1\(91\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2007)133:1(91))
- Mahamid, I. (2015). Factors affecting cost estimate accuracy: Evidence from Palestinian construction projects. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 10(2), 117–125. <https://doi.org/10.1080/17509653.2014.925843>
- Mahamid, I., Al-Ghonamy, A., & Aichouni, M. (2014). Factors affecting accuracy of pretender cost estimate: Studies of Saudi Arabia. *International Journal of Applied Engineering Research*, 9(1), 21–36.
- Maronati, G., & Petrovic, B. (2019). Estimating cost uncertainties in nuclear power plant construction through Monte Carlo sampled correlated random variables. *Progress in Nuclear Energy*, 111(August 2018), 211–222. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2018.11.011>
- Marzouk, M., & Elkadi, M. (2016). Estimating water treatment plants costs using factor analysis and artificial neural networks. *Journal of Cleaner Production*, 112, 4540–4549. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.015>
- Mat Deris, A., Mohd Zain, A., & Sallehuddin, R. (2011). Overview of Support Vector Machine in Modeling Machining Performances. *Procedia Engineering*, 24, 308–312. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2647>
- Mignard, D. (2014). Correlating the chemical engineering plant cost index with macro-economic indicators. *Chemical Engineering Research and Design*, 92(2), 285–294. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2013.07.022>
- Motta, M., Gonçalves, O. L., & Rodrigues, J. (2011). ALIGNING PROJECT TECHNICAL GOALS WITH BUSINESS STRATEGIES: A CONTRIBUTION OF FEL METODOLOGY FOR CAPITAL INVESTMENTS MANAGEMENT. *Revista Gestão Industrial*, 7(4), 99–117.
- Muhammad, N. Z., Keyvanfar, A., Majid, M. Z. A., Shafaghat, A., Magana, A. M., Lawan, H., & Balubaid, S. (2015). Assessment of Cost Escalation Factors for Building and Civil Engineering Projects in Nigerian Construction Industry: A multiple Regression Approach. *Jurnal Teknologi*, 74(4), 85–91. <https://doi.org/10.11113/jt.v74.4614>
- Nabil Ibrahim El-Sawalhi. (2015). Support Vector Machine Cost Estimation Model for Road Projects. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 9(9), 1115–1125. [143](https://doi.org/10.17265/1934-</a></p>
</div>
<div data-bbox=)

- Oexmann, J., & Kather, A. (2009). Post-combustion CO<sub>2</sub> capture in coal-fired power plants: Comparison of integrated chemical absorption processes with piperazine promoted potassium carbonate and MEA. *Energy Procedia*, 1(1), 799–806. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.01.106>
- Page, J. (1996). Conceptual cost estimating manual. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (2nd ed., Vol. 2, Issue 9). Gulf Professional Publishing. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Pamulaparthi, A. R., CREESE, R. C., GANGARAO, H. V., & JARIDI, M. (2016). Cost Estimation Comparisons Between Least Square Regression and Quantile Regression on Fiber Reinforced Bridge Projects. *International Journal of Electronics, Mechanical and Mechatronics Engineering*, 6(4), 1293–1305. <https://doi.org/10.17932/iau.ijemme.21460604.2016.6/4.1293-1305>
- PEMEX. (2012). *Manual Del Sistema Institucional de Desarrollos Proyectos*.
- Peters, M. S., Timmerhaus, K. D., & West, R. E. (2003). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers* (McGraw-Hill Chemical Engineering Editorial (ed.); 5th ed.). McGraw-Hill.
- Project Management Institute. (2009). Practice Standard for Project Risk Management. In *Project Management Institute, Inc. (PMI). Project Management Institute, Inc.*
- Project Management Institute. (2017). *A Guide to the Project Management Body of Knowledge* (Project Management Institute (ed.); Vol. 6, Issue C).
- Project Management Institute. (2019). *Practice Standard for Work Breakdown Structures* (3rd ed.). Project Management Institute.
- Putra, G. A. S., & Triyono, R. A. (2015). Neural Network Method for Instrumentation and Control Cost Estimation of the EPC Companies Bidding Proposal. *Procedia Manufacturing*, 4, 98–106. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.11.019>
- Rajan, V. (2019). Alternative Solutions for Improved Cost Estimation Process in IT Projects using MADM. *PM World Journal*, VII(Vii), 1–20.
- Remer, D. ., & Chai, L. . (1993). Process Equipment, Cost Scale-up. In *Encyclopedia of Chemical Processing and Design* (pp. 306–317).
- Ronald, M., & Lumbantoruan, H. (2019). Analysis of Project Cost Management Indicators at Residential Buildings ( Case Study : Building Construction Project in Rusun Penggilingan Jakarta ). *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 508. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/508/1/012044>
- Rothwell, G. (2005). Cost contingency as the Standard Deviation of the Cost Estimate. *Cost Engineering (Morgantown, West Virginia)*, 47(7), 22–25.
- Saputelli, L., Black, A., Passalacqua, H., & Barry, K. (2013). Front-End-Loading (FEL) Process Supporting Optimum Field Development Decision Making. *Society of Petroleum Engineers - Kuwait Oil and Gas Show and Conference, KOGS 2013, July 2012*, 990–1001. <https://doi.org/10.2118/167655-ms>
- Sarde, R. R., Peth, M., Galli, J., & Katta, H. (2016). An Overview of Front-End Planning for Construction Projects. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 3(7), 1–4.
- Scanlan, J., Hill, T., Marsh, R., Bru, C., Dunkley, M., & Cleevely, P. (2002). Cost modelling for aircraft design optimization. *Journal of Engineering Design*, 13(3), 261–269. <https://doi.org/10.1080/09544820110108962>
- Sequeira, S., & Lopes, E. (2015). Simple Method Proposal for Cost Estimation from Work Breakdown Structure. *Procedia Computer Science*, 64, 537–544. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.08.559>
- Shlopak, M., Emblemavag, J., & Oterhals, O. (2014). Front End Loading as an Integral Part of the Project Execution Model in Lean Shipbuilding. *22nd Annual Conference of the International Group for Lean Construction: Understanding and Improving Project Based Production, 6001*, 207–220.
- Shrivastava, N. K. (2012). Project risk management--another success-boosting tool in a PM's toolkit. *PMI® Global Congress 2012*.
- Silla, H. (2003). CHEMICAL PROCESS ENGINEERING: Design and Economics. In *Textbook*. Marcel Dekker. <https://doi.org/10.1201/9780203912454>
- Stoy, C., Pollalis, S., & Dursun, O. (2012). A concept for Developing Construction Element Cost Models for German Residential Building Projects. *International Journal of Project Organisation and Management*, 4(1), 38–53. <https://doi.org/10.1504/IJPOM.2012.045363>
- Supriadi, L. S. R., Wisusatama, B., & Latief, Y. (2018). Development of Work Breakdown Structure (WBS) Dictionary for Road Construction Works. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 195(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/195/1/012007>
- Tih-Ju, C., An-Pi, C., Chao-Lung, H., & Jyh-Dong, L. (2014). Intelligent Green Buildings Project Scope Definition Using Project Definition Rating Index (PDRI). *Procedia Economics and Finance*,

- 18(September), 17–24. [https://doi.org/10.1016/s2212-5671\(14\)00908-3](https://doi.org/10.1016/s2212-5671(14)00908-3)
- Touran, A. (2006). *Owners Risk Reduction Techniques Using a CM* (Issue October). Northeastern University.
- Traynor, B. A., & Mahmoodian, M. (2019). Time and cost contingency management using Monte Carlo simulation. *Australian Journal of Civil Engineering*, 17(1), 11–18. <https://doi.org/10.1080/14488353.2019.1606499>
- Uppal, K. B. (2009). Cost Estimating, Project Performance and Life Cycle. *AACE International Transactions*, 1–10.
- Venkataraman, R. R., & Pinto, J. K. (2008a). Cost Estimation. In *Cost and Value Management in Projects* (pp. 43–81). John Wiley & Sons, Inc.
- Venkataraman, R. R., & Pinto, J. K. (2008b). Project Budgeting. In *Cost and Value Management in Projects* (pp. 83–104). <https://doi.org/10.4135/9781412985529.n25>
- Venkataraman, R. R., & Pinto, J. K. (2008c). Project Cost Control. In *Cost and Value Management in Projects* (pp. 105–126). John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781119084129.ch4>
- Wain, Y. A. (2014). Updating the Lang Factor and Testing its Accuracy, Reliability and Precision as a Stochastic Cost Estimating Method. *PM World Journal*, III(X), 1–17. [www.pmworlplibary.net](http://www.pmworlplibary.net)
- Wang, Y.-R., & Gibson, G. E. (2002). Using PDRI for project risk management. *PMI Research Conference 2002: Frontiers of Project Management Research and Applications*.
- Wang, Y. R., Yu, C. Y., & Chan, H. H. (2012). Predicting construction cost and schedule success using artificial neural networks ensemble and support vector machines classification models. *International Journal of Project Management*, 30(4), 470–478. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2011.09.002>
- Wu, Y., & Huang, Z. (2008). Application of a Case-Based Reasoning Method in Estimating the Power Grid Project Cost. *2008 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WiCOM 2008*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/WiCom.2008.1743>
- Xenidis, Y., & Stavrakas, E. (2013). Risk Based Budgeting of Infrastructure Projects. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 74, 478–487. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.03.049>
- Zima, K. (2015). The use of fuzzy case-based reasoning in estimating costs in the early phase of the construction project. *Conference on Numerical Analysis and Applied Mathematics, April 2015*. <https://doi.org/10.1063/1.4912842>