

# DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA LA EVALUACION DE COSTOS DE EQUIPOS DE PROCESOS INDUSTRIALES



## **INVESTIGADORES**

**HUGO M. LOPEZ ESPITIA**

**LUIS C. MALDONADO ALFARO**

## **DIRECTORA**

**ISABEL CRISTINA PAZ, PhD.**

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA LA  
EVALUACION DE COSTOS DE EQUIPOS DE PROCESO INDUSTRIALES



HUGO .M. LOPEZ ESPITIA  
LUIS .C. MALDONADO ALFARO

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TITULO DE  
INGENIERO QUIMICO

ISABEL CRISTINA PAZ, PhD.  
DIRECTORA

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
INGENIERIA QUIMICA

CARTAGENA DE INDIAS D, T Y C

2012

## DEDICATORIAS

A Dios por darme la vida y la sabiduría para poder alcanzar los logros trazados hasta este momento, y por haberme dado una familia maravillosa.

A mis padres Luis Carlos Maldonado Rubio y Caridad María Alfaro Arias por todo el amor que me han brindado, y por todo el sacrificio que han hecho para poder estar hoy donde estoy. Papá y mamá, los amo.

A mis hermanos Luis Fernando y María de los Ángeles, que son unas excelentes personas y me han brindado su compañía y apoyo en todas las situaciones de la vida.

A mis abuelos, tíos y primos que entre todos hemos conformado una gran familia.

A todos mis amigos y compañeros de estudio, por compartir tantas experiencias y por pasar tantos momentos inolvidables.

**Luis Carlos Maldonado Alfaro.**

## **DEDICATORIAS**

Este logro se lo dedico a Dios, mi razón de ser y quien me ha dado todo, a El debo este gran logro, todos mis sueños, metas y propósitos por cumplir

A Jaime López y Omaidá Espitia y Dioselina Gamero, mis padres, les agradezco  
A Jaime y Guillermo, mis hermanos por sus valiosos consejos y su incondicional apoyo.

A toda mi familia y amigos, pues de una forma u otra, ellos fueron parte importante dentro de este proceso de formación académica.

**Hugo Mauricio LópezEspitia**

## **AGRADECIMIENTOS**

Damos gracias en primer lugar a Dios, pues por El, el hoy podemos ver este proyecto culminado.

A nuestra directora, la profesora Isabel C. Paz Astudillo, PhD, pues no solamente fue un apoyo académico durante el desarrollo de este proyecto, sino también fue un invaluable apoyo moral, gracias por toda la atención y sabiduría que nos brindó en este ciclo.

Al profesor Pedro Meza, y al Ing. Manuel Serrano, por toda la ayuda brindada en este proyecto.

A mis compañeros de estudio, que siempre estuvieron al pendiente y con la disposición de colaborar en todo lo que pudiesen.

## ABSTRACT

This project presents the development of a computational tool to make costs estimation free on board (f.o.b) for industrial process equipment's. We made a classification based on four simulators of commercial processes equipment: Hysis, Unisim, Chemcad and SuperPro Designed, obtaining a matrix that show the most common equipment used in those simulators: tanks, heat exchangers, pumps, compressors, and some others. Furthermore, this matrix helps to notice the less common equipment and the importance in some specific industries (e.g. fermenters). The methods for estimating the equipment costs used in this project, were select based on data reported in literature. It was observed that the majority of the graphic methods showed good fittings to actual values and those were most effective because they were not related to a construction-based cost. They also were related to different factors such as: pressure and type of material which can be relevant for the cost evaluation. Although these estimates were given based on a reference year they can be actualized using cost indices, such as Marshall and Swift (MS) industrial Index. From these results, we developed the computational tool UDCOST, which is the software tool for cost estimating. To validate the effectiveness of the UDCOST, it was compared to the commercial software Aspen (Plant Cost application). Considering three study cases, including equipments such as distillation columns, evaporators, and the heat exchanger, all of them representatives of chemical and biotechnology processes. The values obtained with the UDCOST were overestimated as compared with the value reported from the Aspen application. The relative error varied between 5.44% (distillation columns) and 8% (evaporator) considering the Aspen values as the basis, except one case, where the error in a heat exchanger differed by 38% because of the new technologies used to reduce cost for the manufacturer process.

Keywords: f.o.b cost, CEPCI index, MS index

## RESUMEN

Este trabajo presenta el desarrollo de una herramienta computacional para estimar los costos puestos en puerto (f.o.b, por sus siglas en ingles) de equipos de procesos industriales. Para esto se hizo una clasificación de los equipos comunes utilizando los simuladores de procesos comerciales: Hysys, Unisim, Chemcad y SuperProDesign, de donde se obtuvo una matriz de estos equipos, como por ejemplo los tanques, intercambiadores de calor, bombas, compresores, entre otros. Además dicha matriz también permitió observar los equipos que sean poco comunes y que sean de interés de industrias específicas, por ejemplo el fermentador. A partir de lo cual se determinaron los métodos de estimación más acertados, que posteriormente serían programados, Observándose que la mayoría de métodos gráficos daban un ajuste cercano a la realidad y eran más efectivos, debido a que no solo relacionaban un costo base de construcción, sino, que también relacionaban distintos factores como los de presión, tipo y material, los cuales permiten un ajuste más preciso de los costos. Estos costos de compra, están dados para un año de referencia, y se actualizan mediante unos índices de costos, los más usados son los Índices de Costos de Equipos e Ingeniería Química y los Índices de Costos para Industrias de Marshall and Swift. Después se desarrolló la herramienta objeto de este proyecto, llamada UDCOST. Para validar la efectividad de esta herramienta los resultados obtenidos se compararon con los arrojados por el software Aspen In PlantCost evaluando tres casos de estudio que incluían equipos tales como columna de destilación, evaporador e intercambiador de calor los cuales son representativos de industrias de procesos químicos y biotecnológicos. Los porcentajes de error obtenidos de esta comparación fueron 5.44% (columna de destilación), 8 % (evaporador) y 38 % (intercambiador de calor), siendo este ultimo un poco mayor debido a que en el mercado han entrado nuevas tecnologías que disminuyen los costos de manufactura del equipo y que son consideradas por el software de Aspen.

Palabras claves: costos f.o.b, índices de costo, equipos industriales, validación

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	1
2. JUSTIFICACIÓN .....	5
3. OBJETIVOS.....	6
Objetivo General.....	7
Objetivos Específicos .....	7
4. MARCO DE REFERENCIA.....	7
4.1. Antecedentes históricos y Estado del arte .....	8
4.2 Marco teórico.....	12
4.2.1 Tipos de estimación de costos .....	13
4.2.2 Clasificación de los costos .....	13
4.2.3 Factores que influyen en la inversión .....	14
4.2.4 Factores de costo de la inversión en capital .....	15
4.2.5 Métodos de estimación de costos de equipos. ....	16
4.2.5.1 Estimación de costos de equipo por el método de expansión.....	16
4.2.5.2 Método de Lang.....	16
4.2.5.3 Método de Guthrie.....	17
4.2.6 Índices de costos .....	18
4.2.6.1 Índices de costos de planta de Chemical Engineering (CE o CEPCI).....	19
4.2.6.3 Índices de costos de equipos de Marshall y Swift (MS o MSCI) .....	20
4.2.6.4 Índices de costo de construcción de refinerías N F.....	20
5. METODOLOGIA .....	22
5.1 tipo de investigación:.....	22
5.2 Técnicas de recolección de información .....	22
5.2.1 Fuentes de información primaria.....	22
5.2.2 Fuentes de información secundaria.....	22
5.3 Variables .....	22
5.4 procedimiento.....	24



5.4.1 Identificación de equipos .....	24
5.4.2 Determinación del método de evaluación.....	24
5.4.3 Desarrollo de la herramienta para la evaluación de costos .....	27
<b>6. RESULTADOS Y ANALISIS.....</b>	<b>28</b>
6.1 Clasificación y selección de los equipos .....	28
6.2 Selección de los métodos de evaluación.....	34
6.2.1 Bombas .....	35
6.2.1.1 Bombas centrífugas .....	35
6.2.1.2 Bombas de Engranaje.....	38
6.2.2 Motores Eléctricos .....	40
6.2.4 Intercambiadores de Calor .....	43
6.2.4.1 Intercambiador de calor de tubo y coraza.....	43
6.2.4.2 Intercambiador de calor de doble tubo .....	44
6.2.4.3 Intercambiadores de calor air cooled fin-fan .....	45
6.2.4.4 Intercambiador de calor de espiral de placa.....	46
6.2.5 Filtros .....	46
6.2.5.1 Filtros de placa y marco .....	46
6.2.5.2 Filtros rotatorios de Vacío .....	47
6.2.6 Autoclaves .....	47
6.2.7.1 Cristalizador de enfriamiento continuo .....	48
6.2.7.2 Cristalizador de evaporado batch .....	48
6.2.7.3 cristalizador de evaporado continuo .....	48
6.2.8 Hidrociclones.....	49
6.2.9 Extractor líquido –líquido .....	49
6.2.10 Ciclones .....	50
6.2.11 Secadores .....	50
6.2.11.1 Secador de bandeja.....	50
6.2.11.2 Secadores rotatorios.....	51
6.2.11.3 Secadores de sprays.....	51
6.2.13 Fermentador .....	52
6.2.14. Molinos.....	53

6.2.15 Trituradoras .....	54
6.2. 16 CSTR enchaquetado .....	54
6.2.17 Hornos.....	55
6.2.18 Tanques.....	56
6.2.19 Torres .....	58
6.3 Análisis de la variación de los índices de costos CEPCI y MSC.....	60
6.4. Casos de estudio.....	63
6.4.1 Caso de estudio 1: evaluación de un intercambiador de calor .....	63
6.4.2 Caso de estudio 2: Evaluación de una columna de destilación.....	66
6.4.3 Caso de estudio 3. Proceso de producción de cristales de $MgSO_4$ .....	67
7. CONCLUSIONES .....	71
8. RECOMENDACIONES .....	73
9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	74

## INDICE DE TABLAS

### No se encuentran elementos de tabla de ilustraciones.

Tabla 1. Porcentajes típicos de capital fijo de inversión de costos directos e indirectos de plantas .....	18
Tabla 2. Componentes principales del índice CEPCI .....	22
Tabla 3. Componentes principales de los índices MSCI.....	23
Tabla 4. Índices de costos de Marshall & Swift , y engineering new record.....	24
Tabla 5. Variables independientes del proyecto .....	26
Tabla 6. Variables dependientes del proyecto.....	26
Tabla 7. .Ecuaciones de costos de intercambiadores de tubo y coraza con diferentes configuraciones.....	28
Tabla 7. Matriz de clasificación de equipos industriales presentes en distintos simuladores comerciales.....	30
Tabla 8. Clasificación de equipos industriales.....	36
Tabla 9. Equipos industriales incluidos en la herramienta.....	37
Tabla 10. Relaciones de parámetros de evaluación de las bombas centrífugas.....	39
Tabla 11. Factores de material para las bomba.....	40
Tabla 12. Factores de material para bombas alternativas de pistón.....	42
Tabla 13. Factores de tipo de motor.....	44

Tabla 14. Factor de tipo de compresores.....	45
Tabla 15. Factor de material de compresores.....	45
Tabla 16. Factor de material para intercambiadores de tubo y coraza.....	46
Tabla 17. Factor de longitud para intercambiadores de tubo y coraza.....	47
Tabla 18. Factor de material para intercambiadores doble tubo.....	47
Tabla 19. Factor de material para intercambiadores de calor fin – fan.....	48
Tabla 20. Factores de materiales para intercambiadores de Espiral de placas.....	49
Tabla 21. Factor de material para filtros de placa y marco.....	49
Tabla 22. Relación de material, costo base y rango de validez para Autoclaves.....	50
Tabla 23. Relación tipo de evaporador continuo - Costo base.....	51
Tabla 24. Factores de materiales para secadores de bandeja.....	53
Tabla 25. Relación de costos base, rango y tipo de secador rotativo.....	54
Tabla 26. Relación de costo base, tipo de evaporador y rango de validez.....	55
Tabla 27. Factores de materiales para Fermentadores.....	56
Tabla 28. Factor de presión para fermentadores.....	56
Tabla 29. Relación tipo de molinos, costo base y rango de validez.....	57
Tabla 30. Relación de costo base, tipo y rango de validez para trituradores.....	57
Tabla 31. Relación de costo base, materiales, presión de operación y rango de validez para CSTR.....	58
Tabla 32. Factores de material para tanques.....	60
Tabla 33. Factor de tipo de plato para torres.....	62
Tabla 34. Factor de material de platos de torres de destilación.....	62
Tabla 35. Parametros de evaluación del caso de estudio 1.....	68
Tabla 36. Estimaciones de costos del caso de estudio 1.....	68

Tabla 37. Condiciones de diseño del caso de estudio 2.....	70
Tabla 38. Estimaciones de costos del caso de estudio 2.....	70
Tabla 39. Relación de equipos principales del caso base con sus factores de medida.....	72
Tabla 40. Relación de equipos y costos de adquisición del caso de estudio 3.....	72
Tabla 41. Variación de costos de secadores de bandejas.....	74

## INDICE DE ANEXOS

Anexo A. tabla de correlaciones de costos de equipos.....	88
Anexo B. Curva de costos para intercambiadores fin- fan.....	89
Anexo C. Curva de costos para intercambiadores de plato en espiral.....	90
Anexo D. Curva de costos de Bombas centrifugas.....	91
Anexo E. Índices de costos CE y MS.....	92

## INTRODUCCION

Al realizar el diseño conceptual, para el montaje de una planta de producción, la evaluación económica de la propuesta es de vital importancia, puesto que, determina de forma contundente la viabilidad del proyecto, así como, una información que les permite a los inversionistas tomar las decisiones más acertadas acerca de la inversión o no, de capital en el proyecto.

Dentro de la evaluación y estimación económica de un proyecto, para el montaje de una planta industrial, se evalúan diversos aspectos tales como, el dimensionamiento y estimación de costos de los equipos, la estimación del capital de inversión y de los costos totales de operación y la evaluación económica global (flujos de caja por periodos, rentabilidad). La decisión del inversionista de colocar su capital en el proyecto, dependerá de la buena realización de cada uno de estos estudios económicos.

Para realizar las estimaciones económicas de la planta, entre ellas el costo de los equipos del proceso, se han desarrollado diversas herramientas que permiten obtener estos datos de una forma práctica y teniendo en cuenta las condiciones de diseño de cada equipo. El mayor problema, está en el acceso a estos programas, debido a los altos costos de adquisición de las licencias, y el conocimiento técnico que se requiere para poder trabajar con ellos, siendo entonces, las grandes compañías, las únicas con las capacidades (económicas y de personal) para adquirir este tipo de herramientas.

Aparte de los software comerciales para evaluar los costos de equipos industriales, existen algunos de acceso libre disponibles en línea, como la aplicación de la empresa MATCHE [1], esta herramienta ofrece una estimación económica para diversos tipos de equipos pero su mayor limitante radica en la actualización de los costos, puesto que dichas estimaciones están dadas para el año 2007.

En el presente proyecto, se hará un estudio acerca de los métodos de estimación de costos de equipos, incluyendo los métodos matemáticos comunes y los gráficos. Posteriormente, se utilizará el método más acertado, para realizar un programa de una interface applicativa sencilla, usando como plataforma Microsoft Access y Visual Basic, que permita hacer la estimación económica del costo de los equipos industriales, convencionales y no convencionales. Se hará un análisis de los índices y factores que inciden en los precios de compra y la actualización de los mismos, se evaluarán y compararán varios casos de estudio con otras herramientas con el fin de comprobar la efectividad de estos.



## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Uno de los mayores inconvenientes que se presentan al momento de plantear el diseño conceptual de una planta, está relacionado con la evaluación económica de los equipos y máquinas utilizadas en los procesos de transformación industriales. El costo aproximado de estos equipos puede ser complejo de determinar, puesto que depende de las condiciones de operación propias del proceso tales como presión, temperatura, flujos, propiedades intrínsecas de las materias primas, y de los productos, además, de los costos directos relacionados con la instalación y montaje [2] y de las políticas de importación y exportación vigentes en el país donde se montará la planta de producción, ya que éstas políticas pueden ser determinantes en la decisión de importar los equipos o adquirirlos en el país.

Para realizar la evaluación económica de los equipos se han desarrollado muchas técnicas, y establecido algunos métodos que ya se encuentran estandarizados y pueden encontrarse en cualquier libro de diseño económico de planta [2 - 3], Aparte de esto se han desarrollado varios software como complementos a los ya conocidos simuladores de planta, es por ejemplo el caso de *Aspen Icarus®*, una herramienta de evaluación económica de plantas que se usa como complemento a los simuladores Aspen. El problema de usar las técnicas y modelos matemáticos para evaluar los costos de los equipos radica en que pueden llegar a ser cálculos extensos, iterativos, y si se comete un error, por mínimo que sea, puede llevar a un sobredimensionamiento del equipo lo que influiría directamente en el presupuesto establecido, mientras que el problema de los simuladores y herramientas informáticas, radica en la difícil accesibilidad a estos sistemas, puesto que las licencias de estos productos son demasiado costosas, y solo tienen acceso a ellas las grandes industrias que cuentan con la capacidad económica para su adquisición.

Algunas de estas herramientas se encuentran fácilmente para su descarga, pero con licencias que no son originales. El uso de estas herramientas sin licencia no es recomendado, puesto que según la normatividad colombiana, toda sociedad debe presentar un informe de gestión, que entre otras cosas incluye el estado de cumplimiento de las normas sobre propiedad intelectual y derechos de autor por parte de la sociedad[4], y de ser detectada alguna anomalía en este informe, el representante legal de la sociedad podría incurrir en una pena entre los 5 y ocho años de cárcel así como el pago de una multa entre los 26.66 y los 1000 salarios mínimos mensuales legal vigente[5]. Las anteriores son razones por las cuales el uso de estos software con licencias no originales no serían adecuados ni convenientes para ninguna compañía.

En conclusión, se puede ver que existe una problemática para realizar la evaluación económica de los equipos en el diseño conceptual de una planta, puesto que el uso de las herramientas informáticas comerciales actuales está limitado por el alto costo de las licencias de estos productos.

## 2. JUSTIFICACIÓN

El crecimiento industrial en Colombia, entre los años 2005 y 2007 significó un incremento del 19,8% en la capacidad productiva [6], esto se vió reflejado en el aumento de la capacidad instalada, además en lo que va corrido del año 2011, en se ha presentado un aumento del 2,4 %, respecto al mismo periodo del año anterior, en el sector manufacturero [7]. Con base en lo anterior se prevé un incremento en las capacidades de producción y en la creación de nuevas industrias, hecho que evidencia la necesidad que tendrán algunas de éstas de expandir sus plantas manufactureras, o bien la creación de nuevas. Por esta razón es necesario contar con una herramienta computacional que permita la evaluación y estimación aproximada de costos de equipos que pueden llegar a representar un alto porcentaje del capital de inversión al hacer el montaje de la planta de producción.

Este proyecto podrá beneficiar a pequeñas y medianas industrias de distintos sectores como el manufacturero o el sector agroindustrial que no cuentan con las capacidades económicas para adquirir las licencias de los evaluadores comerciales que se encuentran disponibles en el mercado, así como muchas de ellas no cuentan con el personal capacitado para el manejo de éste tipo de herramientas.

Con el desarrollo de ésta herramienta computacional, que evaluará los costos económicos de diversos equipos industriales, se podrá solucionar un problema de accesibilidad a software evaluadores económicos, así como también el problema de manejo de este tipo de herramientas, puesto que la interface operativa de éste programa será sencilla, de modo que se requerirán conocimientos básicos en manejo de computadoras para poder trabajar con ésta aplicación.

El desarrollo de éste proyecto también podrá beneficiar no solo a aquellas industrias que deseen expandir o crear nuevas plantas, sino también a aquellas empresas que fabrican equipos industriales, puesto que les servirá para tener una base de precio de venta cuando les sea solicitado un equipo con características operativas específicas. Es de esperarse que éste sea un mercado potencial, pues en Cartagena existen 61 empresas que tienen como actividad principal la fabricación de equipos industriales [8], según datos proporcionados por la Cámara de Comercio de Cartagena.

### 3. OBJETIVOS

#### **Objetivo General**

Diseñar una herramienta computacional que permita evaluar costos de equipos de procesos industriales.

#### **Objetivos Específicos**

- ◆ Obtener una clasificación general de los equipos industriales estándares y no convencionales incluidos dentro de algunos simuladores comerciales.
- ◆ Definir los métodos que se utilizarán para estimar los costos de los equipos estándares y no convencionales según su aplicabilidad y margen de error teórico.
- ◆ Diseñar y programar la interfaz visual de la herramienta computacional para la evaluación de costos de equipos industriales estándares y no convencionales.

## 4. MARCO DE REFERENCIA

### 4.1. Antecedentes históricos y Estado del arte

Uno de los primeros avances en el campo de herramientas computacionales aplicadas en procesos químicos y aún más en la evaluación económica de estos, fue desarrollado aproximadamente entre finales de la década de los setenta e inicio de los ochenta, al plantearse y posteriormente mejorarse, un código llamado OPTIMO CODE, que era un sistema específicamente creado para la evaluación y el análisis de los procesos químicos, fraccionado en varias partes. El programa contenía originalmente los códigos capaces de realizar los balances de masa y energía, siendo completado por la valoración de la eficiencia de los procesos térmicos presentes, posteriormente fue modificado, dándole así mayor cabida a una descripción más detallada del acoplamiento de otras plantas y mejorando las rutinas para la estimación de los costos de producción de la planta [10].

Otro de los avances en el desarrollo de estas herramientas de las cuales se tienen conocimiento, lo realizó un grupo de investigadores de la Universidad de Valldemossa – España y el laboratorio de procesos de análisis funcional de Francia, en el año de 1989, en el proyecto se elaboró un sistema informático para la estimación económica de procesos químicos. Esta herramienta se desarrolló con el fin de llevar a cabo estudios de viabilidad económica en las etapas preliminares de un proyecto industrial, trabajando sobre una estructura modular que permitía amoldarse a las diferentes situaciones técnico-económicas que se presentaran. El sistema partía de un modelo general de estimación de costos de los equipos utilizando algunas correlaciones y luego lo almacenaba en una base de datos llamada (FCD), este modelo general estaba basado en el cálculo de los balances de masa y energía de los procesos, la estimación de los costos de materia prima y manufactura, y un análisis de rentabilidad, como elementos fundamentales para la evaluación económica de los procesos químicos.

Una de las grandes ventajas de esta herramienta, era la posibilidad de acoplar el sistema con un simulador de procesos químicos llamado Prosim que permitía el cálculo de los balances de masa y energía. También, el modelo incluía un método de evaluación de costos conocido como Método de Guthrie, que se fundamenta básicamente en la estimación del costo de un equipo o planta instalada. Además de esto, el método incluye también un algoritmo para la estimación de los costos de fabricación y análisis de rentabilidad. Al final de todo, el sistema computacional, partiendo de un proceso alimentado en el simulador, y regulando las condiciones y datos necesarios para las estimaciones de costos, arrojaba un análisis de rentabilidad económico que incluía valores de inversión en equipos, flujos de capital, costos indirectos de fabricación, costos variables y depreciaciones de equipos [11].

Además del desarrollo de este tipo de herramientas, también se han realizado estudios sobre los métodos de valoración económica, puesto que los métodos existentes tienen una aplicabilidad muy limitada y precisión decepcionante. Es por esto que han surgido diversos estudios como el desarrollado por Petley.G y Edwards D.W [12], ellos trabajaron con un método de coincidencias aproximada, este, se fundamenta básicamente en la hipótesis de que las plantas con características similares (capacidad, condiciones de procesos, etc.) tienen costos similares por lo que utilizan una especie de estimación de los costos de una nueva planta, basados en la estimación de los costos de una planta ya existentes y con cierta similitud con la nueva. Dichas estimaciones son almacenadas en una base de datos que posteriormente son optimizadas al corregirse los parámetros o al asignárseles funciones mejores y más acordes a la planta. Este método se amplió para tener en cuenta los materiales de construcción de la planta y el distinto grado de influencia de las especificaciones de cada equipo sobre los costos de capital. Este método resultó ser efectivo al ofrecer estimaciones preliminares de planta y a ser comparado con otros métodos resulto con un margen de error mínimo.

El uso de estos sistemas informáticos, ha trascendido las fronteras de la ingeniería química, y ha hallado un amplio campo de acción en otras ciencias tales como la electrónica. Un ejemplo claro y real de esto fue demostrado por investigadores del

departamento de ciencias e ingeniería aplicada de la Universidad de Binghamton en Nueva York, al desarrollar una herramienta asistida para la evaluación de costos (CACE) para la producción al escala de tecnologías electrónicas BGA/DCA, dicha herramienta permitía un estimativo económico de la rentabilidad de uso de estas tecnologías, puesto que eran incipientes y no eran muy comerciales [13].

La necesidad de la evaluación y estimación de costos de montajes de una planta, y de análisis de rentabilidad de un proyecto, ha llevado a grandes compañías, que ofrecen sistemas informáticos para la industria y campos de la ingeniería afines, tales como los simuladores, a ofrecer dentro de sus paquete de productos, herramientas de evaluación financiera y económica, se puede ver Honeywell, Aspen Plus, o Aspen Hysys. Un claro ejemplo de estos complementos es Aspen Icarus Project Manager ®, una de las grandes cambios de esta herramienta, radica en el hecho de que para hacer la evaluación del costo de los equipos, no la hace en base a curvas de factor costo-capacidad, sino que siguen modelos de instalación rigurosos basados en el diseño de cada equipo[14], estos, han sido proporcionados por empresas que han desarrollado sus propios criterios de evaluación; entre estas se destacan Honeywell, John ZinkCompany, DOW Plastic-linedpipingproducts. La efectividad de estos complementos informáticos ha sido demostrada en diferentes estudios, uno de los cuales fue realizado por docentes de la Universidad de Caldas y la Universidad Nacional de Colombia, quienes utilizaron el evaluador de procesos Aspen IcarusProcessEvaluator (IPE) versión 11.1 (Aspen Technologies, inc. EUA), para hacer la evaluación económica de un proyecto para el montaje de una planta de bioetanol [15]. Este complemento informático les permitió realizar los diseños detallados, estimaciones, análisis de inversión y cronogramas a partir de una mínima información como los resultados de la simulación de procesos, que eran arrojados por el simulador de procesos Aspen Plus. También estos programas son utilizados para el diseño de nuevas metodologías de investigación, Hossain K y Khan F [16] desarrollaron la IECP (IntegratedEnvironmental and CostPotential) que fue diseñada y apoyada en un simulador de procesos comercial como Hysys, y cuyo fin era permitir una



evaluación cuantitativa y rápida de una opción de diseño en sus diferentes niveles de síntesis.

Ahora bien, aparte del desarrollo de herramientas computacionales, que ayudan en la evaluación económica para el montaje de una planta, también es necesario contar con nuevos métodos y modelos matemáticos que permitan predecir o estimar, en un margen de error aceptable estos costos. Hans Lang[17] introdujo el concepto de que el costo total de una planta era equivalente al costo total de sus equipos sumados a una serie de factores de experiencia, este factor depende esencialmente de dos aspectos; del tipo de proceso y de la fase predominante del proceso, de este modo, este factor variaba con valores entre 3 y 5 dependiendo del proceso, la limitante de este método radicaba en que no se incluían otro tipo de costos, fijos o variables, que podían afectar en forma significativa el valor estimado de los equipos y por ende de la planta. Es por esta razón que otros autores han desarrollado correlaciones y modificaciones sobre este método, W. Hand y Guthrie, sugirieron, que el factor de experiencia no debía depender del tipo de proceso, sino, más bien, de cada elemento constituyente de la planta, de esa forma el factor no era propio del proceso, sino de cada equipo que iba a ser utilizado, estas modificaciones luego demostrarían, que el costo de cada equipo iba a depender básicamente del tipo de material, la construcción y el montaje del equipo, este método se conoce como IchemE, y tiene una serie de pasos consecutivos para cada equipo[18] ; en primer lugar se determina el precio base de cada equipo, luego se ajusta ese precio de compra con un costo teniendo como material principal el acero al carbón, este ajuste se puede hacer dividiendo el costo del equipo entre un factor  $f_m$  (referente al material de construcción), posterior a esto, aplican otros factores propios de las tuberías, montaje, estructuras e instrumentación. Esto se hace con cada equipo de la planta y luego se suman con el resto de costos fijos del montaje de la planta.

En los últimos 4 años, el desarrollo de los sistemas y herramientas computacionales utilizados para la evaluación de costos de equipos industriales, ha tenido grandes avances al pasar de trabajar en una interface con los simuladores comerciales a utilizar sistemas de redes neuronales artificiales o bien

conocidas como RNA, el uso de un modelo de RNA, es posible obtener una predicción bastante exacta, aun cuando la información suficiente y adecuada no está disponible en las primeras etapas del proceso de diseño. Esta misma herramienta fue utilizada por investigadores de la Universidad Pontificia Católica de Chile y la Universidad Passo Fundo de Brasil, con el objetivo de desarrollar un modelo de estimación de costos que les permitiera evaluar las implicaciones económicas de un depósito de intercambiadores de calor de tubo [19].

El uso de estas herramientas neuronales o bien conocidas como inteligencia artificial (IA), ha trascendido el campo de la informática y cada día más se van utilizando en el campo de la industria, con pequeñas incursiones en la evaluación de costos, esto fue demostrado en un estudio que se realizó y en donde se evaluó la efectividad del uso de métodos y sistemas de inteligencia artificial en la evaluación de costos para producción de sistemas electrónicos [20].

Aparte de los nuevos sistemas como los RNA, o los IA, también se ha trabajado sobre los tradicionales lenguajes de programación como C++ con una interface en Windows, un ejemplo claro de esto, fue desarrollado por el Departamento de Ingeniería mecánica del Instituto Indio de Tecnología, un grupo de investigación de dicho departamento, desarrolló un software asistido que permitía la evaluación de costos de implementación de moldes de inyección, este sistema trabajaba con modelos de proceso de jerarquía analítica difusa (fuzzy-AHP)[21].

## **4.2 Marco teórico**

La evaluación económica de un proyecto constituye un balance de las ventajas y desventajas de asignar al proyecto analizado los recursos necesarios para su realización. Este balance se basa en las conclusiones de todos los análisis hechos en la etapa del anteproyecto definitivo.

Normalmente la decisión final sobre la realización efectiva del proyecto se basa sobre todo en su evaluación económica, en la cual, al estar integradas y elaboradas las conclusiones de los estudios de mercado, técnico y financiero, se

abarcan todos los aspectos que necesitan analizarse en un proyecto de inversión para el desarrollo económico y social [22].

El término estimación de costos a menudo se utiliza para describir el proceso mediante el cual se pronostican las consecuencias presentes y futuras de los diseños de ingeniería.

Los resultados de la estimación de costos sirven para varios propósitos entre los cuales están los siguientes[24]:

- ◆ Proporcionar una información útil para fijar precio de venta,
- ◆ Determinar si el producto que se desea fabricar implica una utilidad,
- ◆ Evaluar cuánto capital debe justificarse,

Establecer parámetros para programas de mejoramiento de la productividad.

#### **4.2.1 Tipos de estimación de costos**

Existen tres tipos de estimaciones de costos que dependen básicamente de la etapa de desarrollo en la que se encuentre el proyecto [3], la primera de ellas es la estimación aproximada, esta se utiliza para conocer el costo antes de decidir emprender o construir un proyecto. Usualmente están basadas en una variable representativa de la capacidad o medida física de diseño tales como el área o el volumen, la desventaja y riesgo por considerar es que no siempre el costo varía en forma lineal, y podría comportarse en forma logarítmica, exponencial e inclusive inversamente proporcional a la variable analizada. La segunda estimación, es la conceptual, también podría llamarse preliminar y está basada en el diseño conceptual del proyecto en la etapa en que la tecnología básica del diseño es conocida. La última estimación, es la detallada o definitiva, esta es realizada cuando el alcance del trabajo está claramente definido y el diseño detallado está en progreso de tal forma que las características esenciales son identificables.

#### **4.2.2 Clasificación de los costos**

Los costos pueden ser clasificados como: costos de producción, costos de administración, costos de venta y costos financieros [23].

Los costos de producción, son todos aquellos propios del proceso de producción, las determinaciones de estos se realizan mediante un estudio técnico, estos se anotan y se determinan de acuerdo a las siguientes bases: costos de materias primas, mano de obra, envases, costos de energía eléctrica, costos de agua, combustibles, control de calidad, mantenimiento, depreciaciones de los equipos, insumos para el personal entre otros.

Los costos de administración son como su nombre lo indica, los costos que provienen para realizar la función de administración en la empresa. Sin embargo tomados desde un sentido más amplio no solo representan el sueldo de un gerente o del personal administrativo. Incluyen todos aquellos costos de los departamentos que se encuentran por fuera de las áreas de producción y venta.

Los costos de venta, estos incluyen todos aquellos costos relacionados con el departamento de ventas, es decir, todo aquello que es necesario gastar para que el producto llegue a un intermediario o consumidor final.

En último lugar tenemos los costos financieros, estos tienen que ver con los intereses que se deben pagar en relación con capitales obtenidos en préstamos. Algunas veces estos costos se incluyen en los costos administrativos.

#### **4.2.3 Factores que influyen en la inversión**

Cuando un ingeniero químico determina los costos para cualquier tipo de proceso comercial, estos costos deben ser de una precisión suficiente para proporcionar las decisiones confiables. Para lograr esto, el ingeniero debe tener una comprensión completa de los muchos factores que pueden afectar los costos. Algunos de estos factores son los materiales, especificaciones de los equipos, y las fluctuaciones de los precios [3].

Uno de los principales costos involucrados en cualquier proceso químico es el de los equipos. En muchos casos la adquisición de los tanques, reactores u otros equipos, se puede hacer mediante empleo de equipos inactivos o comprando material reutilizado, lo reduce el costo. Si el equipo es nuevo y se requiere de especificaciones particulares, hay un incremento en los costos.

Por otro lado, en la sociedad económica moderna, los precios pueden variar ampliamente de un período a otro, este factor debe tenerse en cuenta cuando se determinan los costos del proceso de una actividad industrial. El ingeniero químico debe mantenerse al día en la información sobre precios para la comparación de los costos de los equipos adquiridos en diferentes momentos.

#### 4.2.4 Factores de costo de la inversión en capital

La inversión de capital, es la cantidad total de dinero necesario para suministro de la planta y los servicios necesarios de fabricación, más la cantidad de dinero que se requiere como capital de trabajo para el funcionamiento de las instalaciones.

Los costos proporcionales de cada uno de los principales componentes del capital fijo de inversión (costos directos e indirectos) están representados en la Tabla 2.

Tabla 42. Porcentajes típicos de capital fijo de inversión de costos directos e indirectos de plantas

FUENTE: Peters M, Timmerhaus, West R, plant design and economics for chemical engineers, second edition, pag 24.

COMPONENTE	RANGO DE FCI, %
<b>COSTO DIRECTO</b>	
Compras de equipo	15 – 40
Compras de equipo para instalación	6 – 14
Instrumentación y control ( instalado)	2-12
Tuberías instaladas ( instalados)	4- 17
Sistemas eléctricos ( instalados)	2-10
Construcciones (incluyendo servicios)	2-18
Modificaciones de patios	2-5
Infraestructura de servicios (instalados)	8-30
Terrenos	1-2
<b>COSTOS INDIRECTOS</b>	
Ingeniería y supervisión	4-20
Gastos de construcción	4-17
Gastos legales	1-3
Tarifa de contratistas	2-6
Contingencia	5-15

#### **4.2.5 Métodos de estimación de costos de equipos.**

Una vez definida la tecnología constructiva dependiendo de la etapa de desarrollo del proyecto, este puede ser dividido en elementos o niveles de detalle según los propósitos de la estimación de costos. Los métodos utilizados para la estimación de costos son muy variados y pueden ser vistos desde diferentes perspectivas [25].

##### **4.2.5.1 Estimación de costos de equipo por el método de expansión**

En ocasiones es necesario estimar el costo de un equipo cuando no se dispone de datos de costos particulares para la capacidad operativa. El método de estimación por expansión genera una buena aproximación del costo, se usa una relación logarítmica llamada factor de las seis décimas, conociendo el coste de un equipo similar de diferente capacidad.

La expresión viene dada por la Ecuación 1 [3]:

$$\text{Costo de equipo a} = (\text{costo de equipo b})X^{0.6} \quad (1)$$

Siendo X la unidad de capacidad.

El concepto de costo de capacidad es aplicable a aproximaciones de costo no superiores a diez veces la capacidad. El exponente de la Ecuación 1, llamado factor de carga, solo debe usarse si no se conoce información adicional del equipo, ya que este valor puede variar entre 0,3 y valores mayores a la unidad. Se debe ser muy cuidadoso al momento de hacer la selección del equipo a seleccionar puesto que influyen factores como el material, los rangos de operación de presión y temperatura y otras variables pertinentes.

##### **4.2.5.2 Método de Lang**

Este método clásico implica primero, sumar el costo base de los principales componentes del proceso, como se representa en la Ecuación 2, y luego multiplicar por una serie de factores de experiencia, como se expresa en la ecuación 3.

$$I_E = \sum I \quad (2)$$

$$I_f = (I_E + (\sum f_i I_e)) F_i \quad (3)$$

Donde  $I_e$  es el costo de los principales equipos,  $f_i$  es un factor para la estimación del costo de tuberías, instrumentación, edificios, y  $F_i$  toma en cuenta los gastos indirectos tales como los honorarios de ingeniero, contratistas, contingencia, etc.

El método de Lang consiste básicamente en estimar la inversión total de un proceso a partir del costo de sus equipos principales; por esta razón se usa un factor global de experiencia. Típicamente, puede esperarse que el factor de Lang tenga valores entre 3 y 4, lo cual se desprende del análisis de varios procesos existentes. Una buena experiencia del ingeniero de procesos, o una buena base de algún proceso similar, puede redundar en excelentes estimaciones de los factores de experiencia. [2]

#### **4.2 5.3 Método de Guthrie**

Esta técnica se usa para estimar el costo de una unidad instalada o una planta instalada. La información de este método está basada en datos de 42 proyectos de planta de proceso. Para la aplicación de este método, se divide la planta en módulos. Los módulos de equipo consisten en una combinación de varios elementos de costo, tales como:

- ◆ Costo de equipo (fob)
- ◆ Materia prima directa
- ◆ Mano de obra directa en campo
- ◆ Costo directo de material y mano de obra
- ◆ Costos indirectos
- ◆ Costos del módulo desnudo
- ◆ Costo del módulo total.

La estimación del costo de un módulo de equipo de proceso representa el costo de la construcción del equipo (intercambiador de calor, bomba, columna, etc.) y el costo de material, de mano de obra directa e indirecta, requerida para instalar el equipo en un circuito del proceso químico.

El método comienza con la estimación de un costo base en función de alguna dimensión del equipo. Ese costo base implica acero al carbón como material de construcción, una geometría base del equipo, una presión de operación moderada, y un año base (1968). Luego éste costo base se corrige al incorporar los datos del material real de construcción, la geometría del equipo, la máxima presión de operación y el año actualizado en cual se estima el costo. El método presenta para cada módulo tablas que contienen las ecuaciones básicas de estimación de la inversión, así como los respectivos valores de los factores de ajuste [2]

#### **4.2.5.4 Métodos Gráficos**

Estos métodos se basan en la utilización de curvas que relacionan un factor de medida (S) como parámetro principal para la evaluación de costo de equipos, con un costo de adquisición f.o.b (free onboard). Las correlaciones utilizadas en estos métodos dependen del tipo de equipo que se desee evaluar, y podemos encontrar distintas como las de Flowtran, Timmerhouse, Corripio, Walas, Seider y Garret, entre otros. [9]

#### **4.2.6 Índices de costos**

Los índices de costo se utilizan para actualizar los datos de costos obtenidos en el pasado. De manera que el precio de cierto equipo, se puede utilizar como base para conocer el precio en la actualidad.

Un índice de costos no es más que un factor de un punto dado en el tiempo que muestra el costo en ese momento en relación con una base de tiempo determinado [3].



$$\text{costo actual} = \text{costo original} \left( \frac{\text{índice de costo actual}}{\text{índice de costo original}} \right)$$

Los índices de costos pueden utilizarse para la estimación de los costos de los equipos. Algunos se aplican específicamente a mano de obra u otros campos específicos como construcción, materiales, etc. estos se pueden utilizar para dar una estimación general, pero que no tiene en cuenta todos los factores, tales como avances tecnológicos específicos o condiciones locales.

#### 4.2.6.1 Índices de costos de planta de Chemical Engineering (CE o CEPCI)

Para el cálculo de los índices, realiza un promedio de todas las industrias químicas de procesos, y son utilizados en la estimación de costos de construcción de plantas químicas; basándose en un índice de cien (100) para el periodo de 1957 y 1959. Existen cuatro componentes principales de este índice ponderados como se muestra en la tabla 2.

Tabla 43. Componentes principales del índice CEPCI

Componentes	Porcentaje
Equipos maquinarias y soportes.	61%
Manos de obra de instalación.	22%
Ingeniería y supervisión.	10%
Edificación, materiales y mano de obra.	7%

La parte de equipos y maquinaria incluyen principalmente costos de intercambiadores de calor, tanques, tuberías, bombas y compresores, estructuras, soportes y equipos eléctricos.

Los índices CEPCI son publicados mensualmente en la sección de indicadores económicos de la revista *Chemical Engineering*.

#### 4.2.6.3 Índices de costos de equipos de Marshall y Swift (MS o MSCI)

Los índices de costo se refieren al promedio de costos de adquisición de equipos en todas las industrias, basándose en un valor del índice de 100 para el año 1926; teniendo en cuenta los costos de maquinaria, costos de instalación, accesorios y herramientas relacionados con la fabricación de los equipos.

Los porcentajes que se utilizan para la ponderación de los índices de costo, relacionado con la industria se observan en la siguiente tabla:

Tabla 44. Componentes principales de los índices MSCI

INDUSTRIA	PORCENTAJE
CEMENTO	2%
PRODUCTOS QUÍMICOS	48%
ARCILLA Y VIDRIO	5%
PINTURA Y PAPEL	15%
PETRÓLEO	22%
CAUCHO	8%

Los índices MSCI, también son publicados mensualmente en la sección de indicadores económicos de la revista *ChemicalEngineering*.

#### 4.2.6.4 Índices de costo de construcción de refinerías de Nelson-Farrar (NF)

Estos índices de costo están restringidos a la industria petrolera; y son publicados mensualmente en la revista *Oil& gas Journal*, en base a un índice de cien (100) para el año 1946.

#### 4.2.6.5 Índices de costo de construcción de engineering new record (ENR )

Estos índices se refieren a un promedio general de costos en la industria de la construcción. Son publicados semanalmente en la revista *Engineering New-Record*, y cada en los indicadores económicos de la revista *ChemicalEngineering*.

Los índices comunes permiten estimaciones bastante precisas si el tiempo en cuestión es menor de 10 años respecto a la última publicación. Entre estos se

encuentran los índices de costos de Marshall & Swift, o los índices de costos de construcción de *EngineeringNews record*. Para actualizar los valores de los índices actuales, se hace una extrapolación de los valores o de las inflaciones esperadas. En la Tabla 4. Se muestra un ejemplo de cómo ha sido el comportamiento de estos índices desde el año 1987 hasta el año 2002.

Tabla 45. Índices de costos de Marshall & Swift , y engineering new record[2]

Índices de costo					
Equipos Instalados Marshall and swift			Índices de construcción Eng.news-record		
año	Todas las industrias	Industrias de proceso	1913=100	1949=100	1967=100
1987	814,52	830	4406	956	410
1988	852	853,3	4519	980	421
1989	895	905,6	4615	1001	430
1990	915,1	929,3	4732	1026	441
1991	930,6	949,9	4835	1049	450
1992	943,1	957,9	4985	1081	464
1993	964,2	971,4	5210	1130	485
1994	993,4	992,8	5408	1173	504
1995	1027,5	1029	5471	1187	509
1996	1039,1	1048,5	5620	1219	523
1997	1056,8	1063,7	5825	1264	542
1998	1061,9	1077,1	5920	1284	551
1999	1068,3	1081,9	6060	1315	564
2000	1089	1097,7	6221	1350	579
2001	1093,9	1106,9	6342	1376	591
2002	1102,5	1116,9	6490	1408	604

## **5. METODOLOGIA**

### **5.1 tipo de investigación:**

Con el fin, de poder alcanzar los objetivos propuestos en este proyecto, se realizó una investigación de tipo aplicada, porque, se fundamentó en métodos y modelos ya preestablecidos que fueron aplicados en una plataforma virtual diseñada para evaluar costos de equipo.

### **5.2 Técnicas de recolección de información**

#### **5.2.1 Fuentes de información primaria.**

Las fuente de información primaria fueron los valores de costos arrojados por los evaluadores económicos Aspen In PlantCost, y la herramienta computacional Udcost, desarrollada en este proyecto, en base a estos datos arrojados, se hizo gran parte de los análisis de resultados.

#### **5.2.2 Fuentes de información secundaria.**

Las fuentes secundarias este proyecto fueron principalmente los libros de diseño económico de planta de Peter Timmerhaus, y principios de diseño de productos y proceso de Warren Seider [3] [9], de estos, se tomaron la mayoría de modelos y métodos utilizados para hacer la evaluación económica de los equipos industriales, otras fuentes fueron suministradas por el Ingeniero Químico Pedro Meza y el Ingeniero de Sistemas Manuel Serrano, quienes aportaron ejemplos y experiencias que fueron significativas para el desarrollo del programa.

### **5.3 Variables**

En las tablas 5 y 6 se presentan las variables involucrados en el desarrollo del trabajo. Estas se clasifican en variables independientes y variables dependientes.

Tabla 46. Variables independientes del proyecto

Variable independiente	Descripción	Unidades
Espesor	Espesor de componentes de los equipos	Ft
Volumen	Volumen total o parcial del equipo	Ft <sup>3</sup> ó gal
Área de transferencia	Área de transferencia de calor o masa	Ft <sup>2</sup>
Diámetro	Diámetro interno o externo del equipo	Ft
Factor del material	Factor multiplicativo propio de cada material	Adimensional
Factor de presión	Factor multiplicativo relacionado con la presión de operación	Adimensional
Factor de tipo	Factor multiplicativo relacionado con variaciones o un tipo específico de equipo	Adimensional
Carga calorífica	Carga energética suministrada al equipo	Btu
Potencia	Potencia del motor utilizado en algunos equipos	Hp
Flujo volumétrico	Flujo volumétrico de gas o líquido	Gal/día, ft <sup>3</sup> /min
Flujo másico	Flujo másico de operación de algún equipo	Ton / día

Tabla 47. Variables dependientes del proyecto

Variable dependiente	Descripción	Unidades
Costo por componentes	Costo por componentes principales de cada equipo	U.S/ unidad de componente
Costo de equipos	Costo total del equipo	U.S / equipo

## **5.4 procedimiento**

A continuación se describe el procedimiento desarrollado para cumplir los objetivos propuestos.

### **5.4.1 Identificación de equipos**

Para identificar los equipos industriales (convencionales y no convencionales), en primer lugar se accedió a varios simuladores comerciales tales como: Hysys, Aspen Plus, SuperproDesigner, Chemcad, Unisim, con el fin de registrar todos los equipos que están disponibles para el usuario. Luego, fueron identificados los equipos que eran comunes a todos los simuladores y aquellos que constituían casos específicos (equipos industriales no convencionales). Paralelo a esto, a través de revisión bibliográfica, se establecieron otros equipos específicos cuyos costos han sido evaluados para casos particulares en la industria y/o investigación. Por último, de todos los equipos clasificados, se seleccionaron aquellos que son más relevantes para los procesos y operaciones unitarias de mayor relevancia para la industria.

### **5.4.2 Determinación del método de evaluación**

Con el fin de definir los métodos para evaluar los costos de los equipos, se realizó una revisión de información en libros, artículos científicos y bases de datos de software comerciales. La selección del método utilizado para estimar el costo de los diferentes equipos se basó en dos criterios de evaluación: La aplicabilidad del método a cada equipo y el margen de error teórico.

- ◆ Aplicabilidad del método a cada equipo.

Con relación a la revisión bibliográfica, permitió establecer que los métodos de evaluación de costos de equipos, las ecuaciones y gráficas se encuentran restringidas para un rango de condiciones de operación, por lo tanto, se encontró que para un mismo equipo que opera a las mismas condiciones (presión, flujo, capacidad) existen diferentes expresiones para evaluar su costo, dependiendo del proceso específico que se desarrolle en él. Lo anterior se convierte en uno de los principales criterios para la

seleccionar las técnicas o expresiones matemáticas más apropiadas para determinar el costo de un equipo particular. A continuación se describen los métodos, que se utilizaron:

➤ Método de Lang

Por ejemplo, cuando se evalúa el costo de intercambiadores de tubo y coraza, el método de Lang proporciona gráficas y ecuaciones que relacionan el costo del equipo con el factor de tamaño [9]; no obstante, es necesario especificar además la configuración geométrica del mismo. De manera que se obtienen curvas y ecuaciones específicas para intercambiadores de coraza con cabeza fija, tubos en U, tipo tetera o de cabeza flotante, como se indica en la Tabla 7.

Tabla 48. Ecuaciones de costos de intercambiadores de tubo y coraza con diferentes configuraciones.[9]

Configuración geométrica	Expresión matemática
Cabeza flotante	$C_B = \exp \{11.667 - 0.8709 [\ln(A)] + 0.09005 [\ln(A)]^2\}$
Cabeza fija	$C_B = \exp \{11.0545 - 0.9228 [\ln(a)] + 0.09861 [\ln(A)]^2\}$
Tubo – U	$C_B = \exp \{11.147 - 0.9186 [\ln(a)] + 0.09790 [\ln(A)]^2\}$
Vaporizador de tetera	$C_B = \exp \{11.967 - 0.8709 [\ln(a)] + 0.09005 [\ln(A)]^2\}$

Adicional a esto se presentan otros factores que multiplicados a este costo dan el valor total de equipo, uno de ellos es el factor de presión que está limitado para condiciones que varían entre 100 y 2000 psig. Dado el caso en que las condiciones de presión, no se encuentren dentro del rango establecido, o la

configuración del intercambiador de calor no sea del tipo que incluye el método, esta técnica no sería apropiada para hacer la evaluación económica del mismo.

La influencia del tipo de operación desarrollada en un equipo sobre el costo de éste, se puede ver en el Anexo 1. En el documento se puede observar, que para un equipo, utilizado con diferentes propósitos y que opera bajo las mismas condiciones (capacidad, presión), existen ecuaciones de costo diferentes, hecho que podría ser decisivo a la hora de seleccionar un método de evaluación, pues de acuerdo al proceso con el que se vaya a utilizar el equipo, va a existir una técnica de estimación apropiada.

➤ Métodosgráficos.

Estos métodos se basan en la utilización de curvas que relacionan un factor de medida (S) como parámetro principal para la evaluación de costo de equipos, con un costo de adquisición f.o.b(freeonboard). Las correlaciones utilizadas en estos métodos dependen del tipo de equipo que se desee evaluar, y podemos encontrar distintas como las de Flowtran, Corripio, Walas y Garret, entre otros.

Respecto al margen de error teórico, la revisión bibliográfica indicó que todos los métodos de evaluación económica poseen un margen de error debido a que estos se apoyan en curvas y regresiones matemáticas, el valor del error puede llegar a ser del 25 %. Teniendo en cuenta lo anterior este criterio se utilizó cuando dos o más métodos de evaluación eran aplicables al mismo equipo. Por lo tanto fue seleccionado aquel método cuyo margen de error teórico era menor. Debido a que se observó que el tipo de índice de costo utilizado es el principal factor que influye en el margen de error, también se evaluaron los distintos índices de costo, y sus relaciones de varianza con el fin de determinar cuál presentaba menor variabilidad.



### **5.4.3 Desarrollo de la herramienta para la evaluación de costos**

Para desarrollar la herramienta de evaluación de costos, en primer lugar se parametrizaron las curvas propias del método seleccionado para cada equipo, con el fin de obtener una ecuación característica; luego de esto, se elaboró un algoritmo de programación que definía la secuencia de cálculo de costos de los equipos; y posteriormente el algoritmo fue programado usando como plataforma Microsoft Access y Visual Basic, se diseñó la interface visual de forma que fuese versátil y de fácil uso para el usuario. La herramienta fue validada tomando tres casos bases de estudio y comparando los resultados entregados por el software Aspen In PlantCost, con los arrojados por la herramienta. Así mismo elaboró un manual para los usuarios potenciales de la herramienta.

## 6. RESULTADOS Y ANALISIS

### 6.1 Clasificación y selección de los equipos

Algunas de las fuentes que permiten conocer cuáles son los equipos industriales utilizados en distintos procesos y operaciones unitarias, son precisamente, los simuladores comerciales tales como Hysys, Unisim, super pro, Chemcad, entre otros

Al hacer la revisión de estos simuladores, la clasificación obtenida es la presentada en la tabla 8.

De las anteriores tablas de equipos, se puede establecer cuáles son los equipos convencionales (utilizados comúnmente en la industria y presentes en la mayoría de bibliografías y simuladores) y los no convencionales (equipos específicos para ciertos tipos de industrias). En la Tabla 9 se presentan una clasificación de estos equipos de procesos, cabe aclarar que en esta tabla se presentan los equipos principales, y no sus distintos tipos, por ejemplo, en la clasificación presentada en la Tabla 8 hay diversos tipos de fermentadores (batch, digestor anaerobios, aire comprimido) pero todos estos son una clasificación de un equipo principal (fermentadores). También hay que resaltar que en los simuladores comerciales, puede existir la posibilidad de que un mismo equipo sea utilizado en diversos procesos y operaciones unitarias, razón por la cual aparecen con nombres específicos, pero no se trata de que sean un equipo de proceso, sino que la cinética del proceso, hace que sea necesario desarrollar modelos y parámetros diferentes para la correcta simulación del proceso.

Tabla 49. Matriz de clasificación de equipos industriales presentes en distintos simuladores comerciales

OPERACIÓN / TIPO DE EQUIPO	EQUIPOS	SIMULADORES COMERCIALES		
		HYSYS - UNISIM	CHEMCAD	SUPER PRO
VESSELS ( TANQUES)				
	Separador de 3 fases	x		
	Tanques dinámicos		x	
	Tanques de mezclado			X
	Tanques horizontales			X
	Tanques verticales			X
	Tanques de fondo plano			X
EQUIPOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR	Enfriadores de aire	x		
	Enfriadores	x		X
	Intercambiadores de calor	x	x	
	Hornos	x	x	X
	Autoclaves			X
REACTORES	Reactor de tanque agitado continuo	x		X
	Reactor de flujo pistón	x		X
	Reactor Batch		x	X
	Reactor cinético		x	
	Reactores de polimerización		x	
	Fermentador			X
	Fermentador de aire comprimido			X
	Fermentador Batch			X
	Neutralizador			X
	Reactor de oxidación de aire húmedo			X
	Digestor anaeróbico			X
	Filtro precolado			X
	Reactor anoxico			X

Continuación Tabla 8.

OPERACIÓN / TIPO DE EQUIPO	SIMULADORES COMERCIALES				
	EQUIPOS	HYSYS - UNISIM	CHEMCAD	SUPER PRO	
COLUMNAS	Columnas de agotamiento de crudo	x			
	Absorbedor	x		x	
	Columna de destilación	x			
	Extractor liquido – liquido	x			
	Columna de destilación de petróleo	x			
	Absorbedor con rehervidor	x			
	Torre de destilación de 3 fases	x			
	Torre de vacío	x			
	scrubberventuri		x		
	Torre flash		x	x	
	Destilador Batch			x	
	SEDIMENTACION	Decantador			x
		Clarificador			x
Espesante				x	
Tanque de flotación				x	
Separador de aceite				x	
EQUIPOS ROTATIVOS	Compresor	x	x	x	
	Expansor	x			
	Bombas	x	x	x	
	Centrifugas		x		
	Centrifugas de disco			x	
	Decantador centrifugo			x	
	Ventilador			x	

Continuación Tabla 8.

OPERACIÓN / TIPO DE EQUIPO	EQUIPOS	SIMULADORES COMERCIALES		
		HYSYS -UNISIM	CHEMCAD	SUPER PRO
EQUIPOS DE TUBERIA	Tuberías de gas compresibles	X		
	Hidrociclones liquido - liquido	X		
	Mezcladores	X	x	x
	Segmentos de tubería	X		
	Válvulas de alivio	X		
	Válvulas en T	X		
	Válvulas	X	x	
	divisores		x	x
	Válvulas de control		x	
MANEJOS DE SOLIDO	sedimentador		x	
	Secador		x	
	Cristalizador		x	
	Trituradora		x	
	Molinos			x
COLUMNAS TRUNCADAS	Separador de componentes	X	x	
	Columnas truncadas	X	x	
EQUIPOS DE REFINERIA	Reformador catalitico	X		
	Crackeadorcatalitico	X		
	Hidrocrackeador	X		
	Lecho hidroprocesador	X		
	Unidad de isomerización	X		
	Manipulador	X		
	Columna de destilación de petroleo	X		
	Alimentador de petroleo	X		
	Reactor de conversión de petroleo	X		

Continuación tabla 8.

OPERACIÓN / TIPO DE EQUIPO	EQUIPOS	SIMULADORES COMERCIALES		
		HYSYS - UNISIM	CHEMCAD	SUPER PRO
CROMATOGRAFIAS	filtración en fel			X
	Intercambio ionico			X
	Intercambiador ionicomultipaso			X
	Columna de afinidad			X
	Columna de afinidad multipaso			X
FILTRACIÓN	Filtro de mangas	X	x	X
	Ciclones	X	x	X
	Hidrociclones	X	x	X
	Filtros rotatorios de vacío	X	x	X
	Separador de solidos simples	X	x	
	Microfiltros			x
	Ultrafiltros			x
	Filtros de Placa y marco			x
	Filtro de aire			x
	Filtro de bandas			x
SECADORES	Secador spray			x
	Liofilizador			x
	Secador de bandejas			x
	Secadora de tambor			x
	Secador rotatorio			x

Tabla 50. Clasificación de equipos industriales

Equipos convencionales	Equipos no convencionales
CSTR	Fermentadores
PFR	Trituradoras
Tanques	Molinos
Hornos	Secadores rotatorios
Intercambiadores de calor	Evaporadores
Compresores	Intercambiadores iónicos
Bombas	Filtros de osmosis inversa
Mezcladores	Autoclaves
Válvulas	Homogeneizadores
Filtros	
Hidrociclones	
Ciclones	
Cristalizador	
Columna de destilación	
Columnas truncadas	
Torres de absorción	
Secadores	

Debido a que el programa está dirigido a pequeñas y medianas industrias que no tienen acceso a los evaluadores económicos comerciales, por su alto costo de adquisición, la selección de los equipos que están incluidos en la herramienta, se hizo con base a este mercado objetivo. Por esta razón se descartaron la mayoría de equipos que son exclusivos de grandes refinerías y se optó por seleccionar equipos que son necesarios para empresas medianas como las agroindustriales, y algunas empresas de los sectores alimenticios, farmacéuticos, químicos y plástico. De acuerdo con lo anterior se seleccionaron equipos convencionales como bombas, intercambiadores de calor, compresores y filtros, debido a que son indispensables para el transporte de fluidos y para optimizar el rendimiento energético dentro de la planta. También se seleccionaron equipos de transferencia de masa comunes, tales como torres de destilación, secadores, y evaporadores. Así mismo, se tuvo en cuenta los tanques, debido a su utilidad para almacenar materia prima, productos terminados o residuos de proceso, lo cual es requerido en diferentes sectores industriales y para empresas de cualquier tamaño.

Finalmente se incluyeron bioreactores y autoclaves debido a que en la bioindustria, en los sectores farmacéuticos, alimenticios y agroindustriales, se trabaja con agentes biológicos que son necesarios cultivar, eliminar o inactivar. En la siguiente tabla se encuentran los equipos que se seleccionaron y que se encuentra incluido en el programa.

Tabla 51. Equipos industriales incluidos en la herramienta.

OPERACIÓN	EQUIPOS
TRANSFERENCIA DE CALOR	Intercambiador tubo y coraza Intercambiador en espiral Intercambiador doble tubo Intercambiador fin fan Hornos Autoclaves
REACCION	CSTR enchaquetado Fermentado
MANEJO DE SOLIDOS	Ciclones Hidrociclones Filtros de placa y marco Filtros rotativos Triturador Molino
EQUIPOS ROTATIVOS	Bombas centrífugas Bombas de pistón Bombas rotativas Compresores
TRANSFERENCIA DE MASA	Torre de destilación Evaporador Secador de tambor Secador de sprays Secador rotatorio Secador de bandeja Extractor liquido liquido
CAMBIO DE FASE	Cristalizador de enfriamiento continuo Cristalizador evaporado batch Cristalizador de evaporado continuo

.

## 6.2 Selección de los métodos de evaluación

A continuación se presentan las correlaciones utilizadas para la estimación de costos de los equipos incluidos en la herramienta, las cuales están directamente



relacionadas con los métodos de evaluación de costos seleccionados en la etapa anterior de este trabajo.

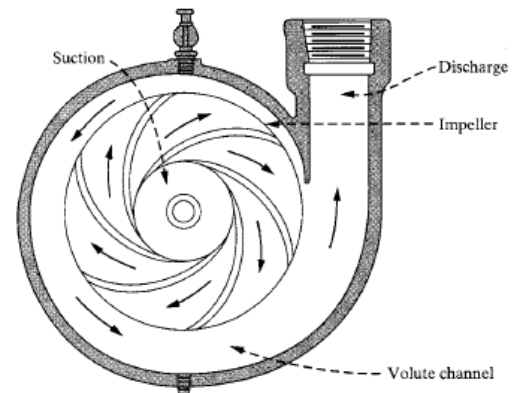
### 6.2.1 Bombas

El costo de adquisición de las diferentes tipos de bombas ya sea centrifugas, alternativas de pistón o de engranaje rotatorio viene dado por un costo base, que depende de un factor de magnitud específico para cada equipo, el cual incluye los componentes principales de acción de la bomba, y una serie de factores de material y de tipo de bomba. Este costo no incluye el motor eléctrico.

Los factores de magnitud con los que se obtienen las estimaciones más precisas son la potencia al freno, el caudal y cabeza de la bomba.

#### 6.2.1.1 Bombas centrifugas

El costo de adquisición de las diferentes tipos de bombas ya sea centrifugas, alternativas de pistón o de engranaje rotatorio viene dado por un costo base, que depende de un factor de magnitud específico para cada equipo, el cual incluye los componentes principales de acción de la bomba, y una serie de factores de material y de tipo de bomba. Este costo no incluye el motor eléctrico.



Los factores de magnitud con los que se obtienen las estimaciones más precisas son la potencia al freno, el caudal y cabeza de la bomba.

### 6.2.1.1 Bombas centrifugas

El método usado para la estimación del costo de adquisición es el de Flowtran desarrollado por la MosantoCompany.

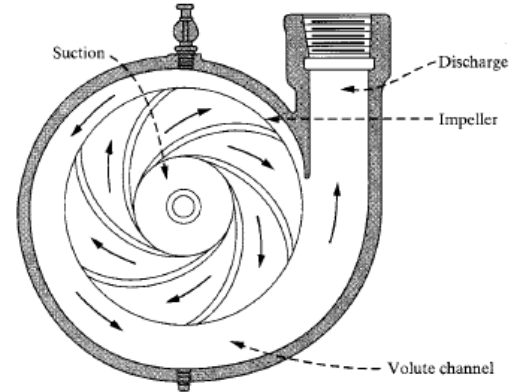


Figura 1. Bombas centrifugas

El costo de adquisición de la bomba centrífuga incluye la carcasa, los impulsores con sus álabes, pero no incluye el motor eléctrico de accionamiento. El costo está definido como el producto del costo base ( $C_B$ ), el factor de tipo ( $F_T$ ) y el factor de material ( $F_M$ ).

$$C_A = C_B F_T F_M * \left( \frac{I_{COSTO ACTUAL}}{I_{AÑO DE REFERENCIA}} \right) \quad (4)$$

Este usa un factor de magnitud  $S$ , que combina el flujo volumétrico con la cabeza de la bomba.

$$S = Q(H)^{0.5} \quad (5)$$

Dónde:

$S$ : Factor de magnitud del costo

$Q$ : flujo volumétrico de la bomba en galones por minuto

$H$ : cabeza de la bomba en pies de fluido = (diferencia de presión/densidad del líquido)

El factor de magnitud  $S$  viene dado para una bomba centrífuga con orientación VSC de hierro fundido que opera a 3600 rpm.

$$C_B = \exp( 9,2951 - 0,6019 \ln(S) + 0.0519 (\ln S)^2) \quad (6)$$

El factor de tipo ( $F_T$ ) lo definen las características y componentes de la bomba como la velocidad de rotación, número de impulsores en serie para alcanzar la cabeza deseada y la orientación de la bomba.

Existen dos tipos de orientación, HSC (eje horizontal) y VSC (eje vertical). En la tabla 11 se describe la relación de los factores de tipo con sus distintos parámetros.

Tabla 52. Relaciones de parámetros de evaluación de las bombas centrífugas

Numero de etapas	Revolución de eje (rpm)	Orientación	Rango de flujo (gpm)	Rango de cabeza de la bomba (ft fluido)	Potencia máxima del motor (hp)	Factor de tipo
1	3600	VSH	50-900	50-400	75	1
1	1800	VSH	50-3500	50-200	200	1,5
1	3600	HSC	100-1500	100-450	150	1,7
1	1800	HSC	250-5000	50-500	250	2
2	3600	HSC	50-1100	300-1100	250	2,7
2 <sup>+</sup>	3600	HSC	1000-1500	650-3200	1450	8,9

Con respecto al factor de material, la siguiente tabla nos muestra los factores para diferentes materiales de construcción de bombas.

Tabla 53. Factores de material para las bombas.

Material de Construcción	Factor de material $F_m$
Hierro fundido	1
Hierro dúctil	1.15
Acero fundido	1.35
Bronce	1.90
Acero inoxidable	2
Hastelloy c	2.95
Monel	3.30
Níquel	3.5
Titanio	9.70

El año de referencia es 2001 cuyo índice CE = 394.

Ahora bien, el método de Timmerhauss muestra las correlaciones de costo de adquisición (USD) en función de la capacidad volumétrica de la bomba incluyendo el costo del motor eléctrico; y factores de presión de operación y material. El cálculo se realiza de acuerdo a la Ecuación 4. Pero cambian los parámetros de evaluación. Los datos de costo base de la bomba centrífuga y factores de ajuste se encuentran en el anexo D. El costo está dado para el año 2002 y utiliza actualizaciones de costo de acuerdo a los índices Marshall and Swift.[3]

El criterio de selección que se tuvo para la utilización del método de estimación de Flowtran en la herramienta es que éste en comparación con el método de Timmerhauss, se presenta un factor de tipo que incluye características más específicas de la bomba como orientaciones y revoluciones de ejes. Además el uso de un factor de magnitud que relaciona no solo la capacidad volumétrica, sino también la cabeza de presión de la bomba, permiten una mayor especificidad y por ende una estimación de costo mucho más precisa.

#### 6.2.1.2 Bombas de Engranaje

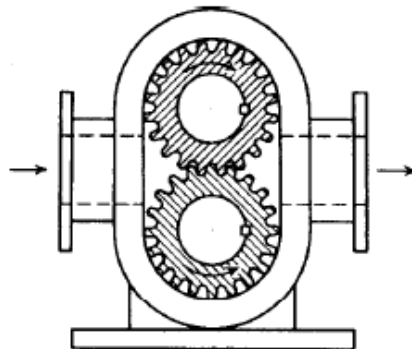


Figura 2. Bomba de engranajes rotatorios.

Se utiliza el método de estimación de Walas, con la capacidad volumétrica,  $Q$  (gal) como factor de magnitud para calcular el costo base. El costo total de adquisición viene dado por la ecuación 4

El costo base se calcula con la Ecuación 7, Aplicable a un rango de flujo volumétrico de 10 a 90 galones por minuto [9].

$$C_B = \text{EXP}(7,2744 + 0,1986(\text{Ln}Q) + 0,029(\text{Ln}Q)^2) \quad (7)$$

El factor de material es el mismo que se utiliza para las bombas centrifugas (tabla 12). El costo de adquisición de la bomba de engranaje rotatorio incluye la carcasa, y los piñones, pero no incluye el motor eléctrico de accionamiento. El año de referencia es 2001 y el índice CE= 394

### 6.2.1.3 Bombas alternativas de pistón.

La estimación del costo base de la bomba alternativa se realiza a partir de la potencia al freno o potencia absorbida (PB, brakehorsepower) como factor de magnitud. Esta se define como la potencia del eje, que es equivalente a la potencia hidráulica más las pérdidas que se generan en la bomba y es función de la capacidad volumétrica, la caída de presión y la eficiencia de la bomba. Se calcula mediante la ecuación:

$$P_B = \frac{QH\rho}{33000n_p} \quad (8)$$

Dónde: Q = capacidad volumétrica de la bomba en gpm.

H = cabeza de la bomba en pies de fluido

$\rho$  = densidad del fluido (lb/galón)

$n_p$  = eficiencia de la bomba

Para casos de estimación de costos, los cálculos de la potencia al freno se realizan para una eficiencia teórica de la bomba del 90%.

El costo total de adquisición de la bomba viene dado por la Ecuación 4.

El costo base viene dado por siguiente correlación:

$$C_B = \text{EXP}(7,3883 + 0,26986(\text{Ln}P_B) + 0,06718(\text{Ln}P_B)^2) \quad (9)$$

El costo de adquisición de las bombas alternativas se ajusta con factores de tipo de bomba y de materiales, los factores de tipo se muestran en la Tabla 11, y los factores de material en la Tabla 13.

Tabla 54. Factores de material para bombas alternativas de pistón.

Material de construcción	Factor de material
Hierro dúctil	1
Níquel, aluminio, bronce	1.15
Acero al carbón	1.5
Acero inoxidable	2.2

El año de referencia es 2001 y su índice CE = 394

### 6.2.2 Motores Eléctricos

Por lo general las bombas centrifugas son accionadas por motores eléctricos, cuyo costo se adiciona al costo de la bomba. El costo de adquisición de un motor eléctrico depende de su consumo de potencia, de la velocidad de rotación de su eje, y del tipo de carcasa del motor. Los costos del motor están dados para 1800 y 3600 rpm.

Los tres tipos de carcasa de motor más comunes son:

- ✦ carcasa abierta a prueba de goteo, el cual está diseñado para evitar la entrada de partículas de líquidos y la suciedad, pero no, la humedad en el aire, el polvo y humos corrosivos en las partes internas de trabajo del motor.
- ✦ carcasa totalmente cerrada con ventilación, que evita la entrada de aire, lo que protege contra la humedad, el polvo, la suciedad y vapores corrosivos

- ♦ caja a prueba de explosión, que protege el motor contra los peligros de explosión de gases combustibles, líquidos y polvo, mediante la presurización de la caja con un gas seguro.[9]

La evaluación de costos se realiza a partir de la correlación de costo de Corripio [2], que toma como costo base el de un motor eléctrico de carcasa abierta a prueba de goteo que opera a 3600 rpm; el cual está en función de la potencia de consumo (Pc), manejando un rango de 1 a 700 hp.

El costo total de adquisición de motor viene dado por la siguiente ecuación

$$C_{T\ motor} = C_B F_T * \frac{I_{ACTUAL}}{I_{AÑO\ DE\ REFERENCIA}} \quad (10)$$

El costo base del motor está dado por la Ecuación 11

$$C_B = EXP[5.4866 + 0.13141Ln(Pc) + 0.053255(Ln(Pc))^2 + 0.028628(Ln(Pc))^3 - 0.0035549(Ln(Pc))^4] \quad (11)$$

Donde FT representa el factor de tipo de motor, que se encuentra en la Tabla 17

Tabla 55. Factores de tipo de motor

Tipo de carcasa del motor	3600 RPM	1800 RPM
carcasa abierta a prueba de goteo	1	0.9
carcasa totalmente cerrada con ventilación	1.4	1.3
caja a prueba de explosión	1.8	1.7

### 6.2.3 Compresores

Para evaluar el costo de los compresores se utiliza el método de estimación de costos de Walas-Garrett que emplea como factor de magnitud representativo para

el costo base la potencia del compresor ( $P_c$ ) en caballos de potencia (hp). El costo base del compresor incluye el motor de accionamiento, y está dado para un compresor construido en hierro fundido y accionado por un motor eléctrico. El costo de adquisición de los compresores depende además del factor  $F_d$ , que se refiere al tipo de accionador del compresor, y al factor de material de construcción ( $F_m$ ), y viene dado por la Ecuación 4. Las siguientes ecuaciones expresan el costo base de los tres tipos de compresores más comunes en su aplicación a escala agroindustrial y las Tablas 14 y 15 relacionan los factores de tipo y de material respectivamente. El año base es 2001 cuyo índice  $CE = 394$  [9].

Compresor centrífugo  $C_B = EXP[7, 2223 + 0, 8Ln(P_c)](12)$

Compresor alternativo  $C_B = EXP[7, 6084 + 0, 8Ln(P_c)](13)$

Compresor de tornillo  $C_B = EXP[7, 7661 + 0, 7243Ln(P_c)](14)$

Tabla 56. Factor de tipo de compresores

Tipo de motor	Factor de accionador $F_d$
1	Motor eléctrico
1.15	Turbina de gas
1.25	Turbina de vapor

Tabla 57. Factor de material de compresores

Material de construcción	Factor de material
Acero al carbón	1
Acero inoxidable	2.5
Níquel	5



## 6.2.4 Intercambiadores de Calor

A continuación se describen las correlaciones utilizadas para estimar el costo de 4 tipos diferentes de intercambiadores de calor que tienen bastante aplicación en la industria química y bioquímica, estos son, Intercambiador de tubo y coraza, de tubos en espiral, doble tubo y los intercambiadores tipo fin- fan. El principal factor de medida para el cálculo del costo base, es el área de transferencia de calor.

### 6.2.4.1 Intercambiador de calor de tubo y coraza

El cálculo del costo de adquisición de este intercambiador se realiza a partir de las especificaciones de cada uno de sus componentes, como por ejemplo longitud aparente de los tubos, el área de transferencia de calor, que corresponde al área superficial externa de los tubos y material de los tubos y la carcasa.

El costo de adquisición de cada uno de estos equipos está determinado por la Ecuación 15. El factor de medida del costo base es el área de transferencia de calor,  $A$ , y viene dado para cada tipo de intercambiador, Este se estima a partir del costo de un intercambiador de calor cuyo material de construcción es acero al carbón para tubos y coraza, con una longitud de los tubos de 20 ft y una presión de operación de 100 psig, las correlaciones de los costos base de acuerdo al tipo de configuración, se encuentran relacionados en la tabla 7.

El factor de material, que viene dado por la Ecuación 16, donde  $a$  y  $b$  son constantes para varias combinaciones de material de tubo y coraza, que se encuentran en la tabla 16.

El factor  $FL$  representa una corrección de longitud de los tubos, que se muestra en la tabla 17. El factor de presión,  $FP$ , está basado en la presión sobre el lado de la carcasa,  $P$ , en psig y está dado por la Ecuación 17, aplicable a un rango de 100 a 2000 psig. El año base es 2001 y el índice  $CE= 394$ . [9]

$$C_{T \text{ intercambiadores}} = F_P F_M F_L C_B \quad (15)$$

$$F_M = a + \left(\frac{A}{100}\right)^b \quad (16)$$

$$F_P = 0.9803 + 0.018\left(\frac{P}{100}\right) + 0.0017\left(\frac{P}{100}\right)^2 \quad (17)$$

Tabla 58. Factor de material para intercambiadores de tubo y coraza

Material de construcción Coraza / tubos	a	B
Acero al Carbón/Acero al Carbón	0	0
Acero al Carbón/ Brass	1.08	0.05
Acero al Carbón/ acero inoxidable	1.75	0.13
Acero al carbón / Monel	2.1	0.13
Acero al carbón / Titanio	5.2	0.16
Acero al carbón / Cr-Mo	1.55	0.05
Cr-Mo / Cr-Mo	1.70	0.07
Acero inoxidable/acero inoxidable	2.70	0.07
Monel / Monel	3.3	0.08
Titanio/ Titanio	9.6	0.06

Tabla 59. Factor de longitud para intercambiadores de tubo y coraza

Longitud de los tubos (ft)	FL
8	1.25
12	1.12
16	1.05
20	1.00

#### 6.2.4.2 Intercambiador de calor de doble tubo

El uso de intercambiadores de calor de doble tubo se recomienda para áreas de transferencias de calor entre 2 y 200 ft<sup>2</sup>. El costo de adquisición está determinado por la Ecuación 18. El costo base se calcula a partir del costo de un intercambiador construido en acero al carbón, y que opera 600 psig. Se calcula a partir de la Ecuación 19, donde el área esta en pies cuadrados. El factor de material,  $F_M$ , se muestra en la Tabla 19; y el factor de presión,  $F_P$ , se calcula a partir de la presión de operación por la ecuación 20 y está dada para un rango de

presión, P, que opera con un rango de 600 a 3600 psig. El año de referencia es 2001 y el Índice de costo CE= 394. [9]

$$C_{Tinter.doble\ tubo} = F_P F_M C_B * \frac{Indice\ actual}{Indice\ año\ de\ referencia} \quad (18)$$

$$C_B = EXP[7.1248 + 0.16Ln(A)] \quad (19)$$

$$F_P = 0.8510 + 0.1292 \left(\frac{P}{600}\right) + 0.0198 \left(\frac{P}{600}\right)^2 \quad (20)$$

Tabla 60. Factor de material para intercambiadores doble tubo

Material de construcción Tubo exterior/tubo interior	F <sub>M</sub>
Acero al carbón /acero inoxidable	2
Acero inoxidable / acero inoxidable	3

### 6.2.4.3 Intercambiadores de calor air cooled fin-fan

El método de Timmerhauss, estima el costo base de este equipo mediante una correlación que depende del área de transferencia de calor, la cual viene presentada por la Ecuación 21, esta expresión es válida para un rango de 30 a 120.000 ft<sup>2</sup>, las curvas que fueron parametrizadas, se pueden observar en el Anexo B. El costo de adquisición se obtiene de la Ecuación 22, donde se ajusta el costo base por medio de un factor de material F<sub>M</sub> que se relaciona en la Tabla 20.

$$C_B = 1872.43 A^{0.43} \quad (21)$$

$$C_{BIntecambiador} = C_B F_M * \frac{Indice\ actual}{Indice\ año\ de\ referencia} \quad (22)$$

Tabla 61. Factor de material para intercambiadores de calor fin - fan

Factor de ajuste de material	
Material	Factor
acero al carbón	1
Aluminio	1.5
acero inoxidable	3.0

#### 6.2.4.4 Intercambiador de calor de espiral de placa

La estimación se realiza usando el método de Timmerhauss que presenta una correlación entre el área de transferencia de calor del intercambiador con el costo base de adquisición dado para un intercambiador de espiral de placas fabricado en acero al carbón.

El costo de adquisición viene dado por la Ecuación 22. El costo base se calcula mediante la ecuación 23, que se obtuvo por la parametrización de la correlación de Timmerhauss para un rango de área de transferencia de 1 a 2000 ft<sup>2</sup>(Anexo C).

$$C_B = 992.45 A^{0.5191} \quad (23)$$

Tabla 62. Factores de materiales para intercambiadores de Espiral de placas

Material	Factor
Acero al carbón	1
Cobre	1.2
acero inoxidable	2.3
Níquel alloy	2.8
Titanio	7.2

#### 6.2.5 Filtros

A continuación se describen las correlaciones, utilizadas para estimar los costos dos tipos de filtros diferentes.

##### 6.2.5.1 Filtros de placa y marco

. El factor de medida utilizado en este equipo es el área de filtrado (ft<sup>2</sup>). El costo total viene dado por la Ecuación 24, Donde C<sub>B</sub> está dado por la Ecuación 25, Siendo A el área de filtrado (ft<sup>2</sup>), y estando está limitado por un rango de A entre 130 y 800 ft<sup>2</sup>. El factor de material  $F_m$  esta relacionado en la Tabla 22. El costo base de este equipo está dado para el año 2001 con un índice CE = 394 [9].

$$C_{T\text{Filtro}} = (C_B * F_m) * \left( \frac{I_{CE \text{ actual}}}{I_{CE \text{ año de referencia}}} \right) \quad (24)$$

$$C_B = 3800 * A^{0.52} \quad (25)$$

Tabla 63. Factor de material para filtros de placa y marco.

MATERIAL	FACTOR DE MATERIAL
Acero al Carbón	1
Acero colado 304	1.3
Acero colado 316	1.5

### 6.2.5.2 Filtros rotatorios de Vacío

El factor de medida de este equipo viene dado por el área de filtrado. El Costo total al igual que el equipo anterior está dado por Ecuación 24, no obstante el Costo base está dado por la Ecuación 26, la cual es válida para un el área de filtrado, A (ft<sup>2</sup>) entre 30 a los 2500 ft<sup>2</sup>, el factor de material es el mismo presentado en tabla 24, el año de referencia es 2001 y su índice CE= 394. [9]

$$C_B = 960 * A^{0.71} \quad (26)$$

### 6.2.6 Autoclaves

Expresión para determinar el costo de autoclaves, está dada por la Ecuación 27. El Costo base depende del material de construcción. La relación entre el costo base y el material, así como el rango de operación, se encuentran en la Tabla 23. Donde S es el factor de medida, que en este caso, es el volumen del tanque (gal). El año de referencia de estos costos es el 2001 cuyo índice CE= 394. [9]

$$C_{T\text{Autoclave}} = (C_B) * \left( \frac{I_{CE \text{ actual}}}{I_{CE \text{ año de referencia}}} \right) \quad (27)$$

Tabla 64. Relación de material, costo base y rango de validez para Autoclaves

Material	Costo base ( USD)	Rango (gal)
Acero	825 S <sup>0.52</sup>	30 -8000
Acero Inoxidable	1560 S <sup>0.58</sup>	30 – 2000
Revestimiento en vidrio	1450 S <sup>0.54</sup>	30 - 4000

## 6.2.7 Cristalizadores

### 6.2.7.1 Cristalizador de enfriamiento continuo

La expresión para determinar el costo de cristalizadores de enfriamiento continuo están dados por la Ecuación 28, así mismo, el costo base está dado por la ecuación 29, Donde L es la longitud (ft). esa Ecuación es válida en un rango de longitud entre 15 y 200 ft, y el material de construcción es Acero Colado. El año de referencia para el costo base es de 2001 cuyo índice CE = 394 [9].

$$C_{T \text{ cristalizador}} = (C_B) * \left( \frac{I_{CE \text{ actual}}}{I_{CE \text{ año de referencia}}} \right) \quad (28)$$

$$C_B = 11400 L^{0.67} \quad (29)$$

### 6.2.7.2 Cristalizador de evaporado batch

El factor de medida para este cristalizador es el volumen del tanque (ft<sup>3</sup>), la relación del costo total de adquisición está dada por la Ecuación 30. el Costo base está dado por la Ecuación 31, Siendo V el volumen ( ft<sup>3</sup>), este costo es válido en un rango entre 50 y 1000 ft<sup>3</sup> y el material de construcción es acero colado. El año de referencia para este costo es el 2001 cuyo índice CE= 394 [9].

$$C_{T \text{ cristalizador}} = (C_B) * \left( \frac{I_{CE \text{ actual}}}{I_{CE \text{ año de referencia}}} \right) \quad (30)$$

$$C_B = 32200 V^{0.41} \quad (31)$$

### 6.2.7.3 cristalizador de evaporado continuo

Los cristalizadores de evaporado continuo se pueden dividir en dos tipos, los de circulación forzada y las de Corriente – tubo (draft – tube baffled), el factor de medida es el flujo másico, W( ton cristal/día) y la relación de costo total es la Ecuación 32. El costo base (C<sub>B</sub>), depende del tipo de evaporado que presente, se relaciona en la Tabla 24, el material de construcción para este equipo es Acero al

carbón, el año de referencia para el costo base es 2001, con un índice CE=394 [9].

$$C_{T \text{ cristizador}} = (C_B) * \left( \frac{I_{CE \text{ actual}}}{I_{CE \text{ año de referencia}}} \right) \quad (32)$$

Tabla 65. Relación tipo de evaporador continuo - Costo base

Tipo de evaporado	Costo Base ( USD)	Rango (ton/ día)
Circulación forzada	$27500 W^{0.56}$	10 – 1000
Draft – tuve baffled	$22200 W^{0.63}$	10 – 250

### 6.2.8 Hidrociclones

El factor de medida para los hidrociclones es el flujo volumétrico, Q (gal/min), El costo total está dado por la Ecuación 33. El costo Base está relacionado por la Ecuación 34, esta correlación es válida para un rango de operación entre 8 – 1200 gal/ min. El material de construcción es acero al carbón, y el año de referencia es 2001, siendo su índice CE=394. [9].

$$C_{T \text{ hidrociclon}} = (C_B) * \left( \frac{I_{CE \text{ actual}}}{I_{CE \text{ año de referencia}}} \right) \quad (33)$$

$$C_B = 190Q^{0.50} \quad (34)$$

### 6.2.9 Extractor líquido –líquido

El factor de medida para este equipo está dado por una correlación entre el diámetro y la altura del extractor, esta correlación la representa la ecuación

$$S = H * D^{1.5} \quad (35)$$

Donde H (ft) es la altura y D (ft) es el diámetro del extractor, con este factor de medida S, la expresión que describe el costo total de adquisición es la Ecuación 36, donde el costo base viene dado por la Ecuación 37. El material de construcción es acero al carbón, y el costo es válido mientras el facto S oscile 3 y

2000 ft<sup>2.5</sup>. El año de referencia para costo de equipo es 2001 y el índice CE =394 [8].

$$C_{T \text{ extractor liq-liq}} = (C_B) * \left( \frac{I_{CE \text{ actual}}}{I_{CE \text{ año de referencia}}} \right) \quad (36)$$

$$C_B = 250 S^{0.84} \quad (37)$$

### 6.2.10 Ciclones

Para este equipo, el factor de medida es el flujo volumétrico de gas (ft<sup>3</sup>/ min), el costo de adquisición está dado por la Ecuación 38, mientras que el costo base viene dado por la Ecuación 39. El rango de operación está entre 200 y 100.000 ft<sup>3</sup>/ min y el material de construcción es acero al carbón, el año de referencia es 2001 y el Índice CE para ese año, es CE=394.

$$C_{T \text{ ciclones}} = (C_B) * \left( \frac{I_{CE \text{ actual}}}{I_{CE \text{ año de referencia}}} \right) \quad (38)$$

$$C_B = \exp\{8.9845 - 0.7892[\ln(F)] + 0.08487[\ln(F)]^2\} \quad (39)$$

### 6.2.11 Secadores

#### 6.2.11.1 Secador de bandeja

El factor de medida para los secadores de bandeja es el área total de secado, A, (ft<sup>2</sup>), el costo total de adquisición está dado por la Ecuación 40, así mismo, la correlación del costo base es expresada por la Ecuación 41. El rango de validez para esta expresión esta entre 20 y 200 ft<sup>2</sup>. El factor de material se presenta en la Tabla 25, el año de referencia es 2001 y el índice de costo para ese año es CE= 394

$$C_{T \text{ sec.bandeja}} = (C_B * F_m) * \left( \frac{I_{CE \text{ actual}}}{I_{CE \text{ año de referencia}}} \right) \quad (40)$$

$$C_B = 3500 A^{0.38} \quad (41)$$



Tabla 66. Factores de materiales para secadores de bandeja

Material	Factor de material
Acero colado	1
Acero al carbón	0.7

### 6.2.11.2 Secadores rotatorios

Existen dos tipos de secadores rotatorios, los de suministros de calor directos, y los indirectos. El costo total de adquisición de estos tipos de secadores viene dado por la Ecuación 42. El factor de medida es el área superficial de contacto, A en ft<sup>2</sup>, y el costo base, C<sub>B</sub>, depende del tipo de secador. En la tabla 26 se presenta la relación entre los distintos tipos de secadores rotativos, su costo base y el rango de validez. El material de construcción es Acero inoxidable. El año de referencia es 2001 cuyo índice CE= 394 [9].

$$C_{TSec.rotatorios} = (C_B) * \left( \frac{I_{CE \text{ actual}}}{I_{CE \text{ año de referencia}}} \right) \quad (42)$$

Tabla 67 Relación de costos base, rango y tipo de secador rotativo

Tipo de sec. Rotativo	Costo base (USD)	Rango ( ft <sup>2</sup> )
Calor directo	$\exp\{8.9845 - 0.7892[\ln(A)] + 0.08487[\ln(A)]^2\}$	200 -3000
Calor indirecto –tubo	$1200 A^{0.92}$	60 – 480

### 6.2.11.3 Secadores de sprays

A diferencia de los otros tipos de secadores, el factor de medida de este, es la velocidad de evaporación, W en lb/ hr. El costo total está dado por la Ecuación 43, de igual forma el costo base es proporcionado por la Ecuación 44. Esta correlación es válida para un rango entre 30 y 30000 lb / hr. El año base es 2001 y el índice de costo CE =394 y el material de construcción es acero inoxidable.

$$C_{TSec.Sprays} = (C_B) * \left( \frac{I_{CE \text{ actual}}}{I_{CE \text{ año de referencia}}} \right) \quad (43)$$

$$C_B = \exp\{8.0556 + 0.8526[\ln(W)] - 0.0229[\ln(w)]^2\}$$

(44)

### 6.2.12 Evaporadores

El factor de medida es el área de transferencia de calor (ft<sup>2</sup>), el costo total de adquisición está dado por la Ecuación 45. Donde el costo base depende del tipo de evaporador. En la tabla se relacionan los tipos de evaporadores, el costo base y el rango de validez. El material de construcción es acero al carbón, excepto para el evaporador de película descendente que es acero inoxidable. El año de referencia es 2001 y el índice CE para ese año es 394. [9]

$$C_{Tevaporador} = (C_B) * \left( \frac{I_{CE \text{ actual}}}{I_{CE \text{ año de referencia}}} \right)$$

(45)

Tabla 68. Relación de costo base, tipo de evaporador y rango de validez

Tipo de evaporador	Costo base ( USD)	Rango ( ft <sup>2</sup> )
Tubos horizontales	3200 A <sup>0.53</sup>	100 – 8000
Tubos verticales	4500 A <sup>0.55</sup>	100 – 8000
Circulación forzada	$\exp\{8.0604 + 0.5329[\ln(A)] - 0.000196[\ln(A)]^2\}$	150 – 8000
Película descendente	10800 A <sup>0.55</sup>	150 - 4000

### 6.2.13 Fermentador

El factor de medida para este equipo es el Volumen del tanque, V en gal. El costo total de adquisición viene dado por la Ecuación 46, mientras que el Costo base viene representado por la Ecuación 47, y los factores de material y de presión se encuentran relacionados en la tabla 28 y 29 respectivamente. El año de referencia para este equipo es 2007 cuyo índice CE= 525.4 [3]

$$C_{Tfermentador} = (C_B * F_m * F_P) * \left( \frac{I_{CE \text{ actual}}}{I_{CE \text{ año de referencia}}} \right)$$

(46)

$$C_b = 962.45V^{0.5001} \quad (47)$$

Tabla 69. Factores de materiales para Fermentadores

Material	Factor de material
Hierro colado	1.099
Acero al carbón – revestimiento de vidrio	1.25
Acero al carbón – revestimiento de Plomo	1.35
Acero al carbón – revestimiento de Caucho	1.5
Acero inoxidable	2.4

Tabla 70. Factor de presión para fermentadores

PRESIÓN ( psi)	FACTOR DE PRESIÓN
< 14.7	1.5
14.7 – 25	1
150	1.38
300	2
600	3
900	4

#### 6.2.14. Molinos

El factor de medida de estos equipos es el Diámetro del molino (ft), el costo de adquisición viene dado por la Ecuación 48. E costo base depende del tipo de molino. En la tabla 30, se presenta la relación entre los tipos de molino, Costos base y rango de validez. El material de construcción es acero al carbón, y el año de referencia de estos costos, es 2007, cuyo índice de costo CE= 525.4

$$C_{Tmolino} = (C_B) * \left( \frac{I_{CE \text{ actual}}}{I_{CE \text{ año de referencia}}} \right) \quad (48)$$

Tabla 71. Relación tipo de molinos, costo base y rango de validez

Tipo de molino	Costo base ( USD)	Rango (ft)
Bolas	8774.7 D <sup>2.0817</sup>	3 – 20
Jaula	4757.4 D <sup>2.1039</sup>	2 – 5
Varillas	9198.6 D <sup>10.49</sup>	3 – 15
Piedra	5533.8 D <sup>2.2389</sup>	7 -20

### 6.2.15 Trituradoras

El factor de medida para los trituradores, al igual que los molinos es el Diámetro, D en ft, el costo de adquisición está dado por la ecuación 49. En la tabla 31 se relacionan el tipo de triturador, costo base y rango de validez. El material de construcción es acero al carbón, y el año de referencia es 2007, con un índice CE= 525.4

$$C_{Tmolino} = (C_B) * \left( \frac{I_{CE \text{ actual}}}{I_{CE \text{ año de referencia}}} \right) \quad (49)$$

Tabla 72. Relación de costo base, tipo y rango de validez para trituradores

Tipo triturador	Costo base ( USD)	Rango (ft)
De cono	26518 D <sup>1.7417</sup>	3 – 20
Giratorio	17823 D <sup>2.374</sup>	5 – 10

### 6.2. 16CSTR enchaquetado

El factor de medida utilizado en este reactor es la capacidad volumétrica (gal), el costo total de adquisición viene dado por la Ecuación 50. El costo base, depende de básicamente de la presión de operación, y del tipo de material usado en el reactor, en la Tabla 32 se muestra la relación entre los distintos tipos de material, presiones de operación, costo base y rango de validez. El año de referencia es 2002 cuyo índice CE= 395

$$C_{T\ CSTR} = (C_B) * \left( \frac{I_{CE\ actual}}{I_{CE\ año\ de\ referencia}} \right) \quad (50)$$

Donde

Tabla 73 Relación de costo base, materiales, presión de operación y rango de validez para CSTR

Material	Presión ( psia)	Costo base ( USD)	Rango (gal)
Acero al carbón	1500	4453 V <sup>0.5523</sup>	100 – 530
	300	700.29 V <sup>0.55</sup>	50 -3500
	50	524.19 V <sup>0.5622</sup>	50 – 3500
Acero inoxidable	1500	8579.1 V <sup>0.5088</sup>	50 – 3500
	300	1834.9 V <sup>0.5496</sup>	50 – 3500
	50	(1154.6V <sup>0.5206</sup> )	50 – 3500
Acero con recubrimiento en vidrio		1494V <sup>0.5206</sup>	50 -3500

### 6.2.17 Hornos

El costo de base de adquisición de hornos industriales depende de la cantidad de calor suministrado por el horno, Q, o calor absorbido por la corriente del proceso en Btu / hr. Se calcula en base al costo de adquisición en dólares de un horno fabricado en acero al carbón que opera a 500 psig, mediante la ecuación 30, para un rango de Q de 10 millones a 340 millones de BTU/H. El costo de adquisición se estima a través de factores de corrección de material de construcción y presión de operación mediante la Ecuación 51, mientras que el costo base se estima mediante la Ecuación 52.

$$C_A = F_P F_M C_B * \frac{Indice\ actual}{Indice\ año\ de\ referencia} \quad (51)$$

$$C_B = EXP[0.08505 + 0.766Ln(Q)] \quad (52)$$

el factor de material,  $F_m$ , es 1.4 para tubos de cromo o molibdeno aleado con acero y 1.7 para acero inoxidable. El factor de presión,  $F_p$ , se calcula por la Ecuación 53 para un rango de presiones entre 500 y 3000 psig.

$$F_p = 0.986 + 0.0035 \left( \frac{P}{500} \right) + 0.0175 \left( \frac{P}{500} \right)^2 \quad (53)$$

### 6.2.18 Tanques

La evaluación se hace mediante el método de Mulet, Corripio y Evans, este método presenta una correlación entre el costo de adquisición con el peso del tanque, que incluye la carcasa cilíndrica y las dos cabezas. El costo de adquisición,  $C_A$ , está dado para un tanque construido en acero al carbón que incluye plataformas, escaleras, una cantidad nominal de boquillas de entrada y salida y pozos de registro y acceso, y se calcula mediante la Ecuación 54 [8].

$$C_A = (F_M C_B + C_{PL}) * \frac{\text{INDICE ACTUAL}}{\text{INDICE AÑO DE REFERENCIA}} \quad (54)$$

Donde  $C_B$  es el costo base del tanque que incluye boquillas, pozos y soportes basado en el peso de la carcasa y las cabezas. Las ecuaciones de correlación para los dos tipos de orientaciones son:

- ♦ Tanques horizontales

para un peso,  $W$ , entre 1000 y 920000 libras.

$$C_B = \exp(8.717 - 0.2330 \ln(W) + 0.04333 (\ln W)^2) \quad (55)$$

- ♦ Tanques verticales

para un peso,  $W$ , entre 4200 y 1000000 libras.

$$C_B = \exp(6.775 - 0.18225 \ln(W) + 0.02297 (\ln W)^2) \quad (56)$$

El peso del tanque en la correlación de costo depende del espesor de pared de la carcasa y de las cabezas, que para casos de estimación se asume un espesor igual en todo el tanque y sus cabezas; viene dado por la Ecuación 57.

$$W = \pi(D + t)(L + 0.8D)t\rho \quad (57)$$

Dónde: D = Diámetro (ft) ; L = longitud o altura (ft); t = espesor de pared del tanque (ft);  $\rho$  = densidad del acero al carbón = 490 lb/ft<sup>3</sup>

Los costos adicionales,  $C_{PL}$ , son los costos de plataformas y escaleras que dependen del diámetro interno, D, en pies, y de la longitud, L, en pies, del tanque.

Tanques horizontales

Para  $3 < D < 12$

$$C_{LP} = 1580D^{0.20294} \quad (58)$$

Tanques verticales

para  $3 < D < 12\text{ft}$  y  $12 < L < 40\text{ft}$

$$C_{LP} = 285.1D^{0.73960}L^{0.70684} \quad (59)$$

El factor de material,  $F_M$ , para diferentes tipos de materiales de construcción, se aprecia en la tabla 33.

Tabla 74. Factores de material para tanques

Material de Construcción	Factor de material $F_M$
Acero al carbón	1
Acero de baja aleación	1.2
Acero inoxidable 304	1.7
Acero inoxidable 316	2.1
carpenter 20CB-3	3.2
Niquel-2000	5.4

Monel-400	3.6
Inconel-600	3.9
Incoloy-825	3.7
Titanio	7.7

### 6.2.19 Torres

El costo de la torres se calcula por la ecuación 60, donde el costo base de la torre incluye la carcasa cilíndrica y la dos cabezas, y es función del peso de la torre.

El costo Base está definido para un rango entre 9000 y 2500000 libras y se calcula mediante la ecuación 61. Los costos adicionales,  $C_{PL}$ , que incluyen la plataforma de soporte y escaleras, dependen del diámetro interno de la torre y de la altura,  $L$ , en pies, y se calcula por la ecuación 62 [8].

$$C_{T.Torre} = [(F_M C_B + C_{PL}) + C_{Tot.plato}] * \frac{\text{Indice actual}}{\text{Indice año de referencia}} \quad (60)$$

$$C_B = \exp(6.775 - 0.18225 \ln(W) + 0.02297 (\ln W)^2) \quad (61)$$

Para torres  $3 < D < 24\text{ft}$  y  $27 < L < 170\text{ft}$

$$C_{LP} = 237.1 D^{0.63316} L^{0.80161} \quad (62)$$

El calculo de los platos, se hace mediante el método de Mulet, que es usado para la estimación de los costos de adquisición e instalación de los platos en torres verticales. Se calcula a partir de un costo base del plato que depende del diámetro de la torre, y se ajusta por de una serie de factores, tales como factor de material, factor del tipo de plato y factor de numero de platos.

El costo total de los platos,  $C_T$ , está dado por

$$C_T = N_T F_{NT} F_{TT} F_{TM} C_{BT} \quad (63)$$



Donde  $N_T$  representa el número de platos. El costo base,  $C_{BT}$ , es el costo unitario del plato con índice de costo CE al año 2001 de 394, valido para un diámetro de la torre de 2 a 16 ft.

$$C_{BT} = 369e^{0.1739D} \quad (64)$$

El factor de numero de platos,  $F_T$ , es 1 si el número de platos es mayor o igual a 20. Si  $N_T < 20$ , el factor es mayor que 1, y se calcula por la Ecuación 65

$$F_{NT} = \frac{2.25}{1.0414^{NT}} \quad (65)$$

Los tipos de platos más comunes utilizados en torres de separación son los de tamiz o perforados, de válvula y de campanas de burbujeo, la Tabla 34 nos muestra los factores para estos tipos de platos.

Tabla 75. Factor de tipo de plato para torres

Tipo de plato	Factor de tipo
Perforado	1
Válvula	1.18
Campana de burbujeo	1.87

El factor de material,  $F_{TM}$ , depende del material y del diámetro de la columna, la tabla 35 nos muestra los factores para diferentes materiales de construcción.

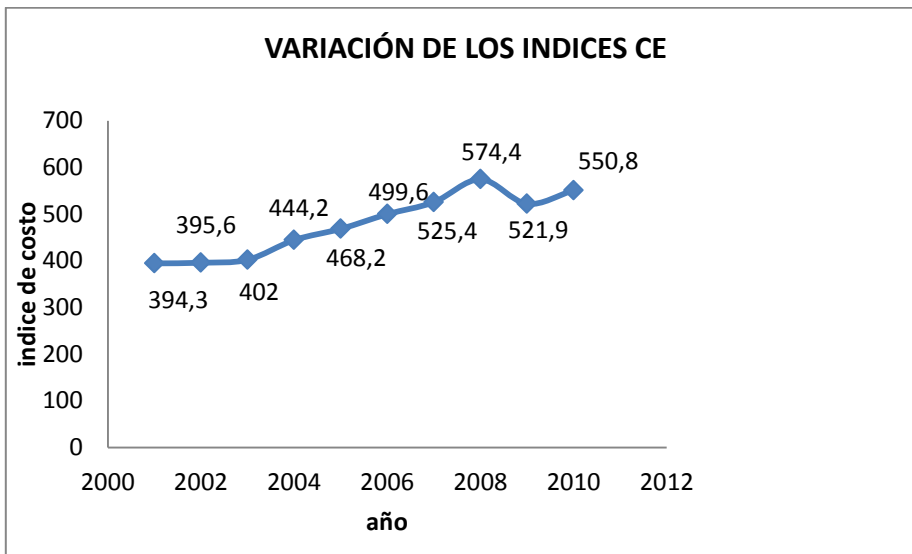
Tabla 76. Factor de material de platos de torres de destilación

Material de construcción	Factor de material
Acero al carbón	1
Acero inoxidable 303	$1.189 + 0.0577D$
Acero inoxidable 316	$1.401 + 0.0724D$
Carpenter 20CB-3	$1.525 + 0.0788D$
Monel	$2.306 + 0.1120D$

### 6.3 Análisis de la variación de los índices de costos CEPCI y MSC

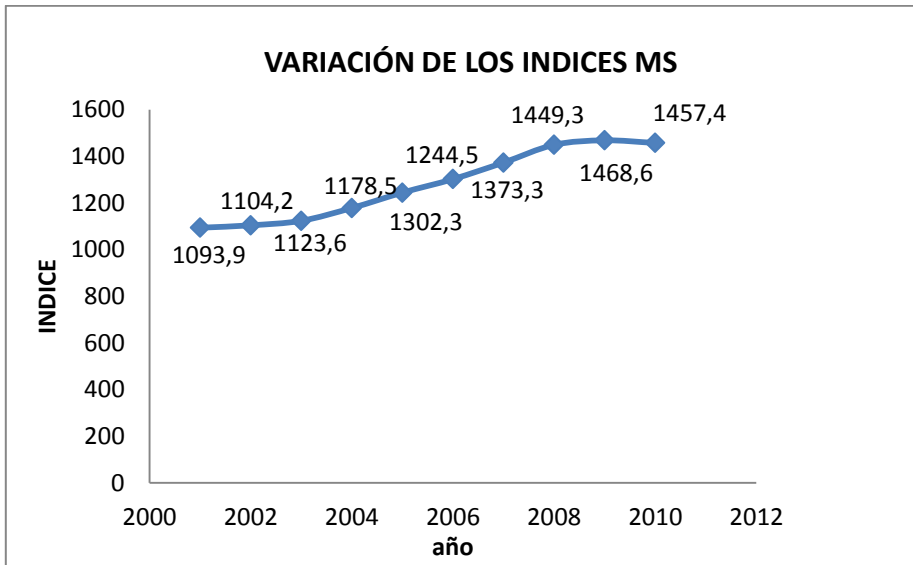
Para el cálculo de estimaciones de costos de equipos de proceso se recomiendan los índices de costo de ChemicalEngineering (CE) y los índices Marshall y Swift, con los cuales se obtienen resultados muy similares. Ambos índices se calculan de acuerdo a factores de mejoras de productividad, debido a que con el tiempo se van presentando cambios en los procesos de producción creando etapas más eficientes en los procesos, resultando en menores incrementos en costos de producción, de ahí que el incremento de estos índices con el paso de los años es menor que los índices NF y ENR.

En la graficas 1 y 2, notamos la tendencia creciente de los índices de costo CE y MS, esto se debe que también la inflación global tiene una tendencia hacia un aumento porcentual anual. El incremento de los índices de costos está relacionado con la variación del IPC (índice de precio al consumidor) de los Estados Unidos de América, el cual es una medida de la inflación.



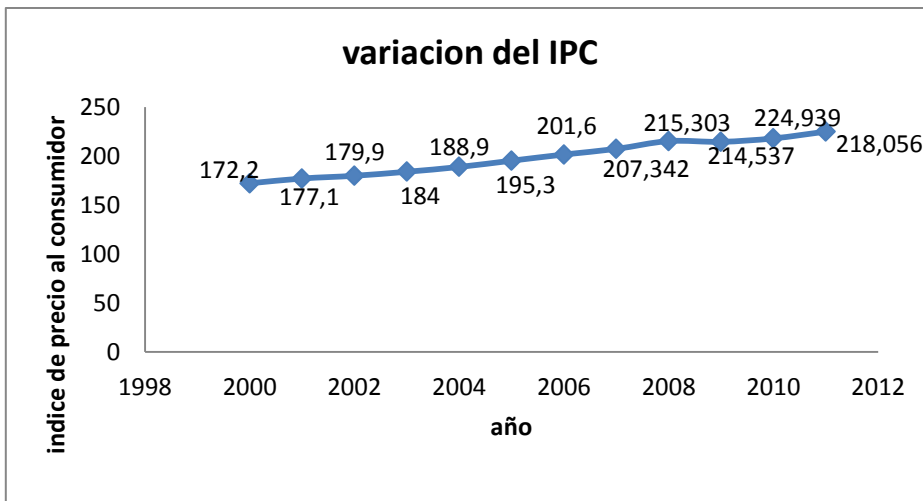
Grafica 1. Variación de los índice CE.

Fuente: *Chemical Engineering Journal, Economic Indicators*, , pag 68, abril 2011



Grafica 2. Variación de los índice MS.

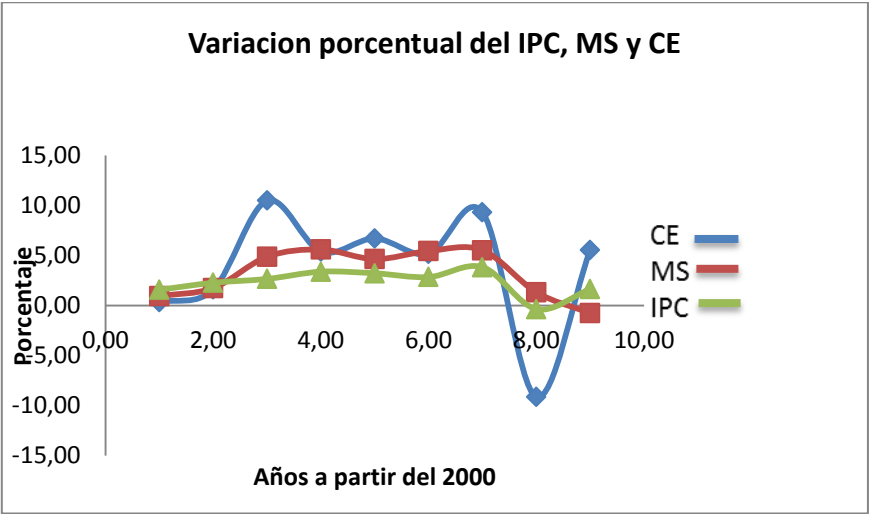
Fuente: *Chemical Engineering Journal, Economic Indicators*, pag. 68, abril 2011



Grafica 3. Variación del IPC del año 2000 al 2010

Fuente: Índice del consumidor, Oficina de estadísticas laborales, Whashington, D.C, UU.EE

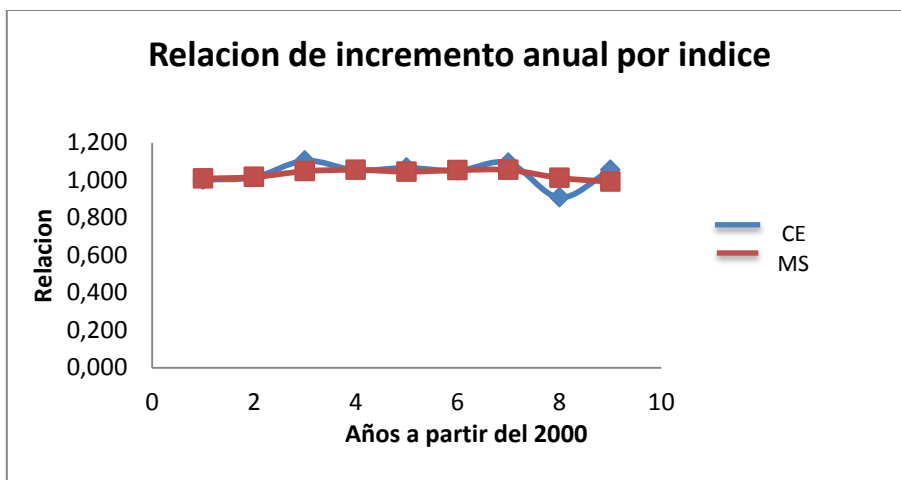
La gráfica 3 muestra la variación del IPC del año 2000 al año 2010, donde se muestra la tendencia creciente del fenómeno inflacionario que influye directamente en la variación de los índices de costo. La grafica 4, muestra la comparación entre la variación porcentual de los índices de costo y el IPC, donde se puede observar que siempre que hubo un incremento en el IPC, se reflejó en un incremento en los índices de costo. Mientras que a finales de 2007 e inicios del 2008 se registra un incremento brusco en los índices, acompañado de un decremento en el periodo 2008-2009, esta situación se debió a una alta inflación y una posterior deflación, este comportamiento anormal de la tendencia económica, se presentó por la crisis económica mundial que se dió en ése periodo.



Grafica 4. Variación de los índices de costos CE y MS respecto al IPC

La comparación de los índices se observa en la grafico 5, donde graficaron las relaciones de incremento anual, de cada índice. Se nota que el factor de incremento anual promedio para ambos indices es bastante aproximado, lo que demuestra que ambos factores arrojan valores de actualización de costos muy cercanos. Por lo tanto podría considerarse indiferente la utilización de cualquiera de estos dos indices, sobre todo por el comportamiento análogo a la variación

inflacionaria anual en la primera década del siglo XXI, ya que la corrección está dada por una relación del índice actual respecto a otro de referencia.



Grafica 5. Variación de los índices de costos CE y MS respecto al IPC

De esta forma se seleccionó índice CEPCI (*ChemicalEngineeringPlantCostIndex*) para las actualizaciones de costos realizadas en el programa de estimación de costos, el cual proyectamos que tenga un valor de 611,42 para finales del año 2012, por extrapolación de la variación del índice mostrada en la gráfica 1.

#### 6.4. Casos de estudio

Utilizando 3 casos de estudio, se compararon los costos calculados por la herramienta desarrollada en este trabajo con los costos estimados por el módulo de evaluación económica Aspen in PlantCostEstimator de la empresa Aspen Tech.

##### 6.4.1 Caso de estudio 1: evaluación de un intercambiador de calor

En el proceso de Hidrodesalquilación del tolueno, se realiza un balance de materia y energía, esto, da como resultado un flujo combinado de 5802 lbmol/hr que entran en el reactor de hidrodesalquilación, conteniendo una composición de 35% p.v de hidrogeno, 58% p.v metano, 7%p.v tolueno a 127°F y 569 psia. La corriente es calentada a 1000°F en un intercambiador de calor, por un efluente templado de

otro reactor que entra con un flujo de 6010 lbmol/hr a 1150 °F y 494 psia, y sale a 364.2°F y 489 psia. La transferencia de calor, Q, calculada es de 69,360,000btu/hr. Determinar el costo del intercambiador de calor.

Solución:

Teniendo en cuenta todos los procedimientos y consideraciones de diseños presentados para este caso, los parámetros necesarios para el cálculo de área de transferencia de calor, son:

$$Q = 69,360,000 \text{ Btu / hr}$$

$$U = 50 \text{ Btu/ hr-ft}^2\text{-}^\circ\text{F}$$

$$\Delta T_M = 190.4 \text{ }^\circ\text{F}$$

De donde

$$A = \frac{Q}{U(\Delta T_M)} = \frac{69,360,000}{50(190.4)} = 7290 \text{ ft}^2$$

Para este factor de medida, y las condiciones de temperatura, se seleccionó un intercambiador de calor de tubo y coraza con cabezal flotante, y con una longitud de tubos de 20 ft. Debido a que el rango de presión esta entre 500 y 600 psig, y teniendo en cuenta que la presión de diseño debe ser mayor a la de operación, se tomó como presión de diseño 700 psig. Como material de diseño se optó por utilizar acero al carbón para los tubos y corazas.

Los parámetros finales fueron los presentados en la tabla 36.

Tabla 77. Parametros de evaluación del caso de estudio 1

PARAMETROS	VALOR
Área de transferencia	7290 ft <sup>2</sup>
Tipo de intercambiador	Cabezal flotante
Presión en la coraza	700 psig

Material coraza/tubo	Acero al carbón / acero al carbón
Longitud de tubos	20 ft
Índice CE	570

Teniendo en cuenta los anteriores parámetros, y resolviendo el caso utilizando la herramienta computacional y evaluador de Aspen Tech, los resultados se resumen en la tabla 37

Tabla 78. Estimaciones de costos del caso de estudio 1.

Evaluador	Costo / Und. Área (USD/ ft <sup>2</sup> )	Costo Adquisición (USD)
ASPEN IN PLANT COST	24.760	180.500
UDCOST	34.278	249.888.

Tomando como valor nominal, el resultado arrojado por el simulador Aspen In plantcost, debido a que este software tiene acreditación internacional, se halló el porcentaje de error entre uno y otro.

$$\% \text{ Error} = \frac{|\text{Error nom} - \text{Error real}|}{\text{Error nom}} * 100 = \frac{|\mathbf{180,500} - \mathbf{249,888}|}{\mathbf{180,500}} * \mathbf{100}$$

El resultado obtenido fue un error del 38%, lo que indica que el estimado de costo, de la herramienta UDCOST está por encima de los valores arrojados por Aspen. Se considera que las razones por las cuales se presenta esta diferencia de costos, se pueden deber, en primer lugar, a los factores de materiales, si se observa dentro del simulador de planta, al momento de seleccionar los parámetros de evaluación, específicamente el de los materiales, se observa que para un solo tipo de material, en este caso, el acero al carbón, existen varios subtipos de acuerdo a las normas ASTM, inclusive, con referencia comercial, algunos de estos son: Acero al carbón CS A455, A515( C- SI), A 537 , entre otros. Dentro de la programación interna del Aspen, se hace una selección, del material más adecuado de acuerdo a las consideraciones de diseño, previamente

suministradas, esto, le da un rango de precisión más acertado, en comparación con la herramienta computacional que trabaja con un solo factor de material que al parecer es un promedio de estos distintos tipos de acero al carbón.

#### 6.4.2 Caso de estudio 2: Evaluación de una columna de destilación

Una columna de destilación es usada para separar Isobutano de n- Butano. La columna, que es equipada con 100 platos tipo sieve( tipo tamiz). Posee un diámetro interno de 10 ft (120 in) y una altura de 212 ft ( 2544 ft). Las condiciones de operación son 110 psia y 150 °F en la parte inferior de la torre y 100 psia y 120°F en la parte superior. El material de construcción es acero al carbón. La presión barométrica en la planta es de 14.5 psia. Estimar el costo de la columna.

Solución:

De las consideraciones de diseño, que incluyen la determinación de la presión de diseño (Pd), Espesor de pared, allowance de corrosión, entre otros, quedan los siguientes parámetros de evaluación

Tabla 79. Condiciones de diseño del caso de estudio 2

PARAMETRO	VALOR
Diámetro interno coraza	10 ft
Altura de la torre	212 ft
Espesor de pared	0.09 ft
Material coraza de la torre	Acero al carbón
Numero de platos	100
Tipo de platos	SIEVE
Diámetro del plato	10 ft
Material del plato	Acero al Carbón
Índice CE	570

Al evaluar la torre de destilación, utilizando Aspen in Plantcost, y la herramienta UDCOST, los resultados arrojados fueron los siguientes:



Tabla 80. Estimaciones de costos del caso de estudio 2

Simulador	Costo de plato x unidad ( USD/und)	Costo total adquisición ( USD)
Aspen in plantcost	2500	1,004,800.00
Udcost	3038	1,059,546.89

El porcentaje de error arrojado fue de 5.44 %. Al observar este margen de error teórico, se puede interpretar que para éste caso de estudio, existe mucha congruencia entre los resultados de los dos evaluadores económicos, ésta precisión puede deberse, a que hay más parámetros de evaluación, que reducen el nivel de error, es decir, son mejores los métodos que desglosan el equipo entre sus componentes principales, en este caso, se desglosa el costo de la torre entre su coraza (incluyen accesorios) y el costo de los platos. Además de esto, se comprueba la efectividad de los índices de costos CE, que permiten la actualización, de los precios de compra, cabe recordar que el índice CE para el 2012 no existe, así que por extrapolación de las curvas y aproximaciones, se está trabajando un índice CE de 570 como se indicó en la sección anterior.

#### **6.4.3 Caso de estudio 3. Proceso de producción de cristales de $MgSO_4$**

Considerando un proceso, como el que se muestra en la figura, para una producción continua de cristales de  $MgSO_4$ , sin embargo, se reemplaza la combinación de filtros hidrociclón – centrifuga, por un filtro rotatorio de vacío. Así, el magma va directamente al filtro, el cual produce el filtrado que se recircula al cristalizador y luego lo envía al secador. El cristalizador opera adiabáticamente, por lo tanto es calentado antes de entrar recirculado al cristalizador. Para la producción de 3504 lb/hr de  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ , que contiene un 1.5 % p.v de humedad, de una solución acuosa de  $MgSO_4$  a 14.7 psia y 70 °F, estimar los costos f.o.b de la mayoría de los equipos.

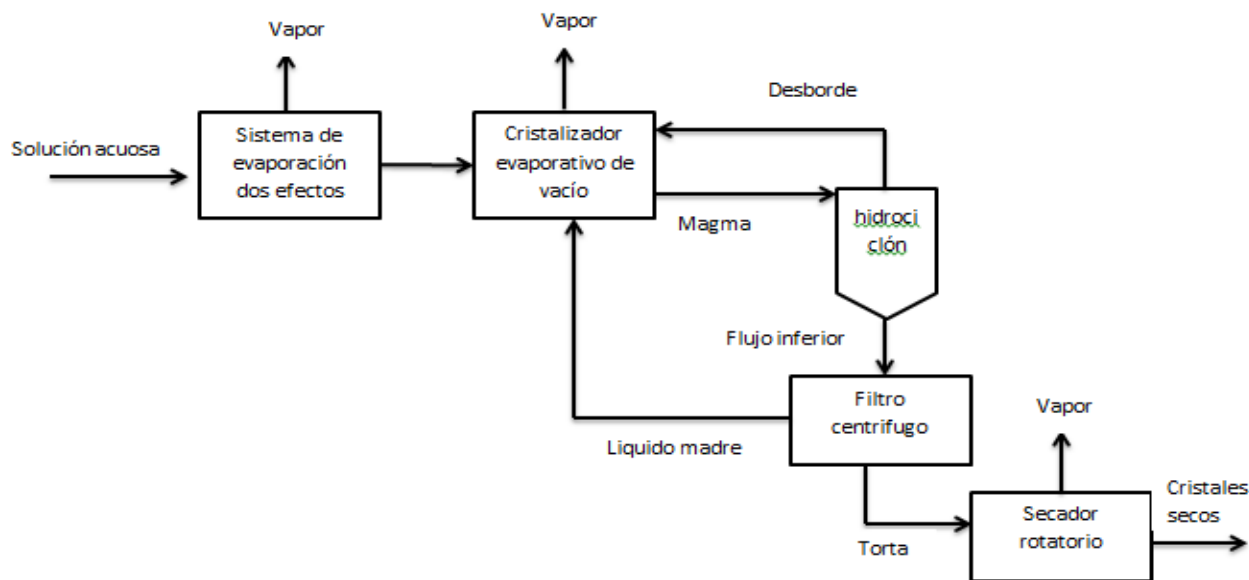


Figura 3. Diagrama de flujo de proceso de producción de cristales de  $MgSO_4$

Solución.

De los resultados de los balances de materia y energía de los principales equipos [8] obtenemos los datos representativos para la evaluación de los costos:

Tabla 81. Relación de equipos principales del caso base con sus factores de medida

Equipo	Tipo de equipo	Factor de medida	Valor
Evaporador efecto 1	Tubos vertical	Área de transferencia	585 ft <sup>2</sup>
Evaporador efecto 2	Tubos Vertical	Área de transferencia	585 ft <sup>2</sup>
Filtro	Rotatorio de Vacío	Área de contacto	47ft <sup>2</sup>
secador	Rotatorio calor directo	Área total de secado	220ft <sup>2</sup>
Cristalizador	Draft – tube	Flujo másico	34.2 ton / día

Al realizar la evaluación de los costos, los resultados obtenidos por los dos programas fueron los siguientes

**Tabla 82. Relación de equipos y costos de adquisición del caso de estudio 3**

Equipo	Tipo de equipo	Costo adquisición udcost(USD)	Costo adquisición aspen in plant cost (USD)	% error
Evaporador efecto 1	Tubos verticales	216,534.39	234,500	7.66
Evaporador Efecto 2	Tubos verticales	216,534.39	234,500	7.66
Filtro	Rotatorio de Vacío	21,371	Fuera de rango	-----
Secador	Rotatorio – calor directo	224,147.91	80,400	178
Cristalizador	Draft - tube	225,235.49	Equipo no disponible	-----

Del anterior caso, sólo se le puede hacer análisis comparativo a 2 equipos, debido a que en el Aspen in PlantCost las condiciones de diseño de uno de los equipos se encuentra fuera del rango de validez, y en el caso del cristalizador, el equipo no se encuentra disponible. En cuanto a los evaporadores se observa un margen de error del 7.66 %, un porcentaje aceptable, si se tiene en cuenta la aceptación y efectividad que le precede al software de Aspen®. Para este último equipo, ninguno de los evaluadores contaba con un factor de corrección de precio debido al tipo de material, en ambos casos el único material disponible era el acero al carbón, hecho que se convierte en una desventaja puesto que este material no va a ser el adecuado en muchos casos, y eso va a alterar el costo final del equipo requerido para una operación o proceso específico.

Con respecto al secador, se puede observar que hay un error muy grande, del 178 %, el problema, es que no se está en la capacidad de saber cuál evaluador está errado, puesto que el módulo de aspen es una caja negra, y no se conocen las correlaciones, y métodos de estimación que este posee. Sin embargo existen dos hipótesis para este posible error, la primera sería que los métodos que se utilizaron dentro de la herramienta estén desactualizados, y no se estén teniendo en cuenta las nuevas tecnologías que influyen en la disminución considerable de los costos de manufactura de los equipos. La otra hipótesis sería que el módulo

de aspen para este equipo este desactualizado, y dicha hipótesis no es errada, porque desde el punto de vista técnico, Aspen In PlantCost, y su módulo de simulación HYSYS, están dirigidos a industrias del sector petroquímico, y éste tipo de secador no es propio de esas industrias.

Para despejar dudas, se evaluó el mismo equipo en otra Herramienta llamada MATCHE creada para el mismo fin, el resultado que arrojó y actualizado con los índices CE, dió como resultado un costo de \$172,065.4 , con un margen de error no superior al 31 %, Esto hace pensar que la segunda hipótesis puede ser también valida.

Para ver si esta irregularidad se presentaba en otros tipos de secadores, se hizo una comparación tomando como equipo referente un secador de bandeja, utilizando acero al carbón y variando el área superficial entre 20 y 200 ft<sup>2</sup>, los resultados se muestran en la tabla 42.

Tabla 83. Variación de costos de secadores de bandejas

Área superficial ( ft <sup>2</sup> )	Costo UDCOST ( USD)	COSTO ASPEN ( USD)
40	14398	10,300
60	16,797	12,000
100	20,395	14,600
140	23,177	16,600
180	25500	18,600

Al comparar los datos obtenidos se puede observar, que los costos del aspen son menores, lo que se puede sumar a la hipótesis de que aspen trabaja con modelos que incluyen costos actuales, y que se ajustan a los cambios tecnológicos, y hay que recordar que cuando se desarrollan mejores tecnologías, los costos de producción tienden a disminuir, mejorando la eficiencia económica de los procesos.

## 7. CONCLUSIONES

El estudio de los métodos de estimación de costos de equipos reveló que estos están basados principalmente en datos de construcción de equipos de diferentes plantas de proceso, que son compilados, depurados y luego relacionados mediante una correlación matemática, que involucra, uno o más factores de medida característicos con un precio de adquisición f.o.b, los cuales son actualizados mediante un índice de costo.

Así mismo, se llegó a la conclusión de que los índices que más se utilizan para la actualización de los costos, son los índices Chemical Engineering Process Cost Index (CEPCI) y los Marshall and Swift Equipment Cost Index (MS) debido a que estos cambian de acuerdo con la variación del Índice de Precio al Consumidor (IPC), el cual es una medida de la inflación en Estados Unidos. Además, dichos índices de costos son más precisos debido a que incluyen relaciones porcentuales, dependiendo del tipo de industria (por ejemplo, los índices MS) o de los principales factores que influyen en el costo total de la planta, tales como costos de equipos, mano de obra, costos de instalación, entre otros (por ejemplo, los índices CEPCI).

La validación de la herramienta indicó que la mayoría de las correlaciones utilizadas predicen valores cercanos a los reportados por otras herramientas del mismo tipo, como por ejemplo el evaluador de costos comercial de Aspen®. al realizar varios casos de estudios, se observó que el porcentaje de error en los equipos era mínimo, por ejemplo, en el caso de la columna de destilación, la variación fue de 5.44 % y en el caso de los evaporadores y otros equipos, el error se encontraba cercano al 7 %, este resultado positivo se debe en parte a que la mayoría de correlaciones se basan en los parámetros de diseño, que sumado a los factores de material y operación, dan un nivel de precisión más acertado, además de esto muestra que el uso de los índices de costo para actualizar los precios si son recomendables.

Durante la evaluación de los casos de estudio se presentaron unos resultados inesperados, dos en particular, el primero fue un intercambiador de calor, cuyo error fue de 38% respecto al Aspen® y el segundo fue un secador rotatorio de calor directo cuyo porcentaje de error comparado con el Aspen fue de 178%. No obstante para este último caso, al compararse con otra herramienta disponible para el mismo fin, tal como Matche, el error no superó el 31%. El error en ambos casos pudo radicar en posibles desactualizaciones que tienen los métodos utilizados, ya que han entrado al mercado nuevas tecnologías y procedimientos que han disminuido los costos de manufactura y construcción de estos equipos en particular.

Mayoría de los softwares comerciales han abordado la evaluación de costos de equipos convencionales de manera amplia, como consecuencia de que originalmente fueron concebidos para la industria petroquímica. El estudio reveló que realmente todavía son pocos los softwares comerciales que evalúan costos para equipos de la industria bioquímica y agroindustrial. Un caso especial es el costos de fermentadores los cuales, de los cuatro software analizados, sólo 1 incluía el cálculo de este equipo. Lo cual reitera la necesidad de dinamizar la estimación de costos de estos equipos ante el inminente crecimiento de la industria biotecnológica y agroindustrial.

## 8. RECOMENDACIONES

- Debido a que hay una gran diversidad de equipos, que poseen diferentes tipos de configuraciones, ampliar el contenido de los equipos presentes en el programa.
- Agregar un módulo para propósitos educativos, donde puedan arrojar los costos de adquisición, evaluado por dos o tres métodos de estimación diferentes.
- Incluir un módulo de diseño que permita el cálculo de especificaciones de los equipos a partir de las condiciones de operación, y balances de materia y energía.
- Comparar los resultados obtenidos con cotizaciones reales para validar con mayor seguridad los costos arrojados por la herramienta UDCOST.

## 9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1) Matche.com [en línea], Matche´sprocessEquipmentCostEstimates [ultima vez modificado 15 de octubre de 2003, Ultima vez accesado 19 de junio de 2012]. Disponible en línea en <http://matche.com/EquipCost/index.htm>Gutiérrez A, Diseño De Procesos En Ingeniería Química, primera edición, editorial reverté, pag 39-40.
- 2) Gutiérrez A, Diseño De Procesos En Ingeniería Química, primera edición, editorial reverté, pag 39-40.
- 3) Peters M, Timmerhaus, West R, “plant design and economics for chemical engineers”, fifth edition, mc graw hill pages 203,241-243, 2002
- 4) Colombia, ley 603 de 2000, de 27 de Julio del 2000, boletín oficial de la superintendencia de sociedades.
- 5) Colombia, articulo 271 de la ley 1032 de 2006, código penal, articulo oficial, corte constitucional de Colombia.
- 6) Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, Proexport Colombia, invierta en Colombia, sector petroquímico, septiembre 2009, pag.4
- 7) Dane, Muestra Mensual Manufacturera, disponible en línea en [http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/mmm/bol\\_mmm\\_feb11.pdf](http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/mmm/bol_mmm_feb11.pdf), febrero 2011, pag 1
- 8) Barrios M. Adrián, información Comercial, Cámara de comercio de Cartagena, 29 de abril del 2011.
- 9) Seider.W, Seader.J, Lewin D, “Product& process design principles” second edition, Jhon Wiley and sonspag. 522 – 524, 659, 2002
- 10) Broggi A, . Joel.R, Mertel. G, Morbello R, “A method for the techno-economics evaluation of chemical process—improvements to the “OPTIMO” code”, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 6, Issue 1, 1981, Pages 25-44.
- 11) Cremades L, Mulet A, Koehret, “A file oriented information system for the cost estimation of equipment and the economic evaluation of chemical processes”,



Computers & chemical Engineering, Volume 13, Issues 4-5, April-May 1989, Pages 451-458

12) Petley G.J and D. W. Edwards, "Further developments in chemical plant cost estimating using fuzzy matching", Computers & chemical Engineering, Volume 19, Supplement 1, 11 June-14 June 1995, Pages 675-680

13) Kumar Nagarajan, D. L. Santos, K. Srihari a, "computer aided cost estimation system for BGA/DCA technology", computers & Industrial Engineering, Volume 31, Issues 1-2, October 1996, Pages 119-122

14) AspenTech. [sede web]. AspenTech company; 2011 [acceso 26 de agosto 2011], Aspen in plant cost estimator, disponible en línea en <http://www.aspentech.com/products/aspen-icarus-project-manager.aspx>

15) Quintero J, Montoya M, Sanchez O.J, Giraldo O.H, Cardona C.A, "Fuel ethanol production from sugarcane and corn: Comparative analysis for a Colombian case", Energy, Volume 33, Issue 3, March 2008, Pages 385-399

16) Hossain K, Khan F, Hawboldt K, "IECP — an approach for integrated environmental and cost evaluation of process design alternatives and its application to evaluate different NOx prevention technologies in a 125 MW thermal power plant", Energy for Sustainable Development, Volume 15, Issue 1, March 2011, Pages 61-68

17) Larry R, CCC, Chair, AACE International technical board, "Sharpen Your Cost Estimating Skill", Cost engineering Journal, Volume 45/No 6 Junio 2003, page 22 – 30

18) Brennan .D, Golonka K, "New factors for capital cost estimation in evolving process designs", Institution of Chemical Engineering, Trans IChemE, vol 80, part A, septiembre 2002. Pages 579 - 584

19) Rodriguez N, Consalter.L, Duran O "Neural networks for cost estimation of shell and tube heat exchangers", Expert Systems with Applications, Volume 36, Issue 4, May 2009, Pages 7435-7440

20) Jui-Sheng Chou, Yian Tai, Lian-Ji Chang, "Predicting the development cost of TFT-LCD manufacturing equipment with artificial intelligence models",

International Journal of Production Economics, Volume 128, Issue 1, November 2010, Pages 339-350

21) Nagahanumaiah, Subburaj K, Ravi B, "computer aided rapid tooling process selection and manufacturability evaluation for injection mold development", computers in Industry, Volume 59, Issues 2-3, March 2008, Pages 262-276.

22) ILPES, instituto latinoamericano de planificación económica y social, "Guía para la presentación de proyectos", siglo xxi editores, pág. 137-138

23) Baca G, "evaluación de proyectos, quinta edición, pag 8-10. 60 -63.

24) Sullivan W, wickelin, "Ingeniería económica De Garmo", duodecima edición, Pearson Prentice hall, pag 24, 2007

25) Ramírez M, Modelo de Diseño Preliminar y Estimación de Costos para Edificios Prefabricados de Concreto, revista icotec, instituto tecnológico de Costa rica, 2006.



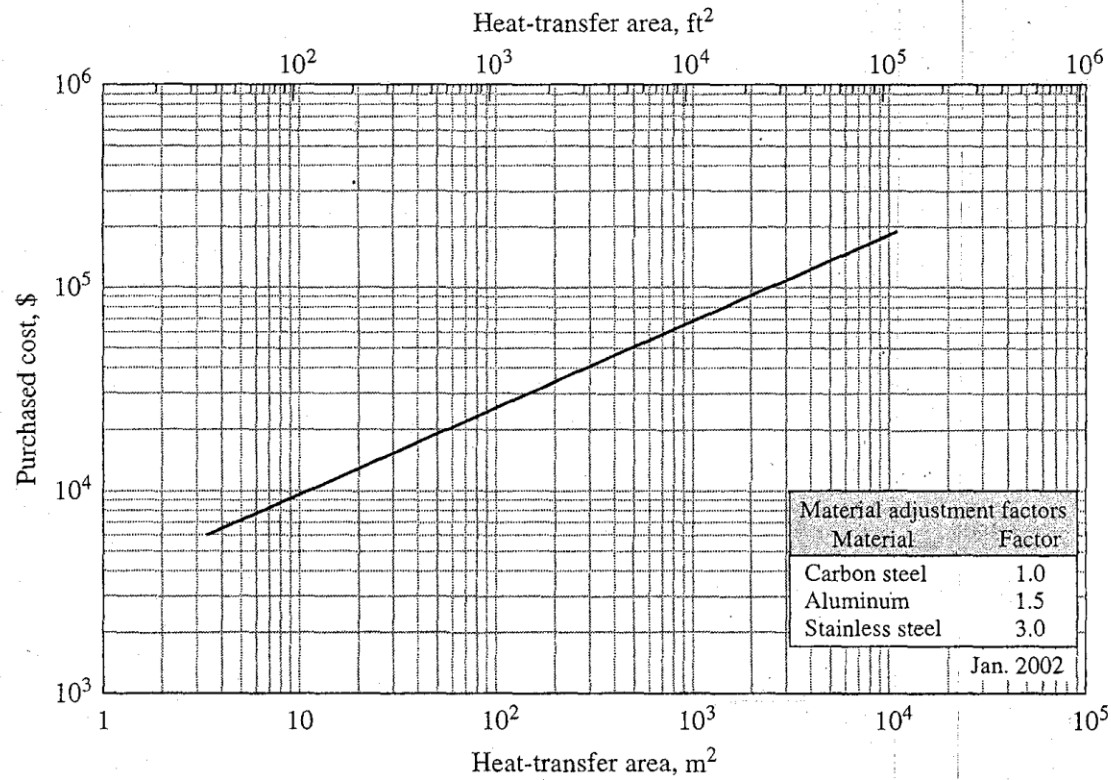
# ANEXO A

**Table 16.32 (Continued)**

Equipment Type	Size Factor (S)	Range of S	f.o.b. Purchase Cost Equation (\$)	Notes
<b>Fired heaters for specific purposes</b>				
Reformer	Heat absorbed, $Q$ , Btu/hr	10–500 million Btu/hr	$C_p = 0.677 Q^{0.81}$	Carbon steel, pressure to 10 atm
Pyrolysis	Heat absorbed, $Q$ , Btu/hr	10–500 million Btu/hr	$C_p = 0.512 Q^{0.81}$	Carbon steel, pressure to 10 atm
Hot water	Heat absorbed, $Q$ , Btu/hr	0.5–70 million Btu/hr	$C_p = \exp\{9.3548 - 0.3769[\ln(Q)] + 0.03434[\ln(Q)]^2\}$	
Molten salt, mineral and silicon oils	Heat absorbed, $Q$ , Btu/hr	0.5–70 million Btu/hr	$C_p = 9.71 Q^{0.84}$	
Dowtherm A	Heat absorbed, $Q$ , Btu/hr	0.5–70 million Btu/hr	$C_p = 9.83 Q^{0.65}$	
Steam boiler	Heat absorbed, $Q$ , Btu/hr	0.5–70 million Btu/hr	$C_p = 0.289 Q^{0.77}$	Carbon steel, pressure to 20 atm
<b>Heat exchangers, other</b>				
Air-cooled fin-fan	Bare-tube heat-transfer area, $A$ , ft <sup>2</sup>	40–150,000 ft <sup>2</sup>	$C_p = 1,970 A^{0.40}$	Carbon steel
<b>Compact units</b>				
Plate-and-frame	Heat-transfer area, $A$ , ft <sup>2</sup>	150–15,000 ft <sup>2</sup>	$C_p = 7,000 A^{0.42}$	Stainless steel
Spiral plate	Heat-transfer area, $A$ , ft <sup>2</sup>	20–2,000 ft <sup>2</sup>	$C_p = 4,900 A^{0.42}$	Stainless steel
Spiral tube	Heat-transfer area, $A$ , ft <sup>2</sup>	1–500 ft <sup>2</sup>	$C_p = \exp\{7.8375 + 0.4343[\ln(A)] + 0.03812[\ln(A)]^2\}$	Stainless steel
<b>Liquid–liquid extractors</b>				
Rotating disk contactors (RDC)	$S = (\text{Height}, H, \text{ft})(\text{Diameter}, D, \text{ft})^{1.5}$	3–2,000 ft <sup>2.5</sup>	$C_p = 250 S^{0.84}$	Carbon steel
<b>Membrane separations</b>				
Reverse osmosis, seawater	Purified water, $Q$ , gal/day	2–50 million gal/day	$C_{BM} = \exp\{0.8020[\ln(Q)] + 0.01775[\ln(Q)]^2\}$	Bare-module cost
Reverse osmosis, brackish water	Purified water, $Q$ , gal/day	0.2–14 million gal/day	$C_{BM} = 2.1 Q$	Bare-module cost
Gas permeation	Membrane surface area, $A$ , ft <sup>2</sup>	—	$C_p = 35 A$	Membrane module
Pervaporation	Membrane surface area, $A$ , ft <sup>2</sup>	—	$C_p = 30 A$	Membrane module
Ultrafiltration	Membrane surface area, $A$ , ft <sup>2</sup>	—	$C_p = 8 A$ to $20 A$	Membrane cartridge
<b>Mixers for powders, pastes, polymers and doughs</b>				
Kneaders, tilting double arm	Volume, $V$ , ft <sup>3</sup>	10–56 ft <sup>3</sup>	$C_p = 1,400 V^{0.58}$	Carbon steel
Kneaders, sigma double arm	Volume, $V$ , ft <sup>3</sup>	20–380 ft <sup>3</sup>	$C_p = 1,300 V^{0.60}$	Carbon steel
Muller	Volume, $V$ , ft <sup>3</sup>	10–380 ft <sup>3</sup>	$C_p = 11,000 V^{0.56}$	Carbon steel
Ribbon	Volume, $V$ , ft <sup>3</sup>	25–320 ft <sup>3</sup>	$C_p = 1,700 V^{0.60}$	Carbon steel
Tumblers, double cone	Volume, $V$ , ft <sup>3</sup>	50–270 ft <sup>3</sup>	$C_p = 2,700 V^{0.42}$	Carbon steel
Tumblers, twin shell	Volume, $V$ , ft <sup>3</sup>	35–330 ft <sup>3</sup>	$C_p = 1,200 V^{0.60}$	Carbon steel
<b>Power recovery turbines</b>				
Gas expanders (pressure discharge)	Power extracted, $P$ , Hp	20–5,000 Hp	$C_p = 420 P^{0.81}$	Carbon steel
Gas expanders (vacuum discharge)	Power extracted, $P$ , Hp	200–8,000 Hp	$C_p = 940 P^{0.81}$	Carbon steel
Liquid expanders	Power extracted, $P$ , Hp	150–2,000 Hp	$C_p = 1,100 P^{0.70}$	Carbon steel
<b>Screens</b>				
Vibrating grizzlies	Surface area, $A$ , ft <sup>2</sup>	6–40 ft <sup>2</sup>	$C_p = 4,600 A^{0.34}$	Carbon steel
Vibrating screens, 1 deck	Surface area, $A$ , ft <sup>2</sup>	32–60 ft <sup>2</sup>	$C_p = 1,100 A^{0.71}$	Carbon steel
Vibrating screens, 2 decks	Surface area, $A$ , ft <sup>2</sup>	32–192 ft <sup>2</sup>	$C_p = 970 A^{0.78}$	Carbon steel
Vibrating screens, 3 decks	Surface area, $A$ , ft <sup>2</sup>	48–192 ft <sup>2</sup>	$C_p = 700 A^{0.91}$	Carbon steel
<b>Size enlargement</b>				
Disk agglomerators	Feed rate, $F$ , lb/hr	800–80,000 lb/hr	$C_p = \exp\{10.4947 - 0.4915[\ln(F)] + 0.03648[\ln(F)]^2\}$	Carbon steel
Drum agglomerators	Feed rate, $F$ , lb/hr	800–240,000 lb/hr	$C_p = \exp\{11.1885 - 0.5981[\ln(F)] + 0.04451[\ln(F)]^2\}$	Carbon steel
Pellet mills	Feed rate, $F$ , lb/hr	800–80,000 lb/hr	$C_p = 5,500 F^{0.11}$	Carbon steel
Pug mill extruders	Feed rate, $F$ , lb/hr	80–40,000 lb/hr	$C_p = \exp\{9.2486 - 0.01453[\ln(F)] + 0.01019[\ln(F)]^2\}$	Carbon steel
Screw extruders	Feed rate, $F$ , lb/hr	8–800 lb/hr	$C_p = \exp\{10.5546 + 0.02099[\ln(F)]^2\}$	Carbon steel
Roll-type presses	Feed rate, $F$ , lb/hr	8,000–140,000 lb/hr	$C_p = 91 F^{0.59}$	Carbon steel
Tableting presses	Feed rate, $F$ , lb/hr	800–8,000 lb/hr	$C_p = \exp\{8.9188 + 0.1050[\ln(F)] + 0.01885[\ln(F)]^2\}$	Carbon steel

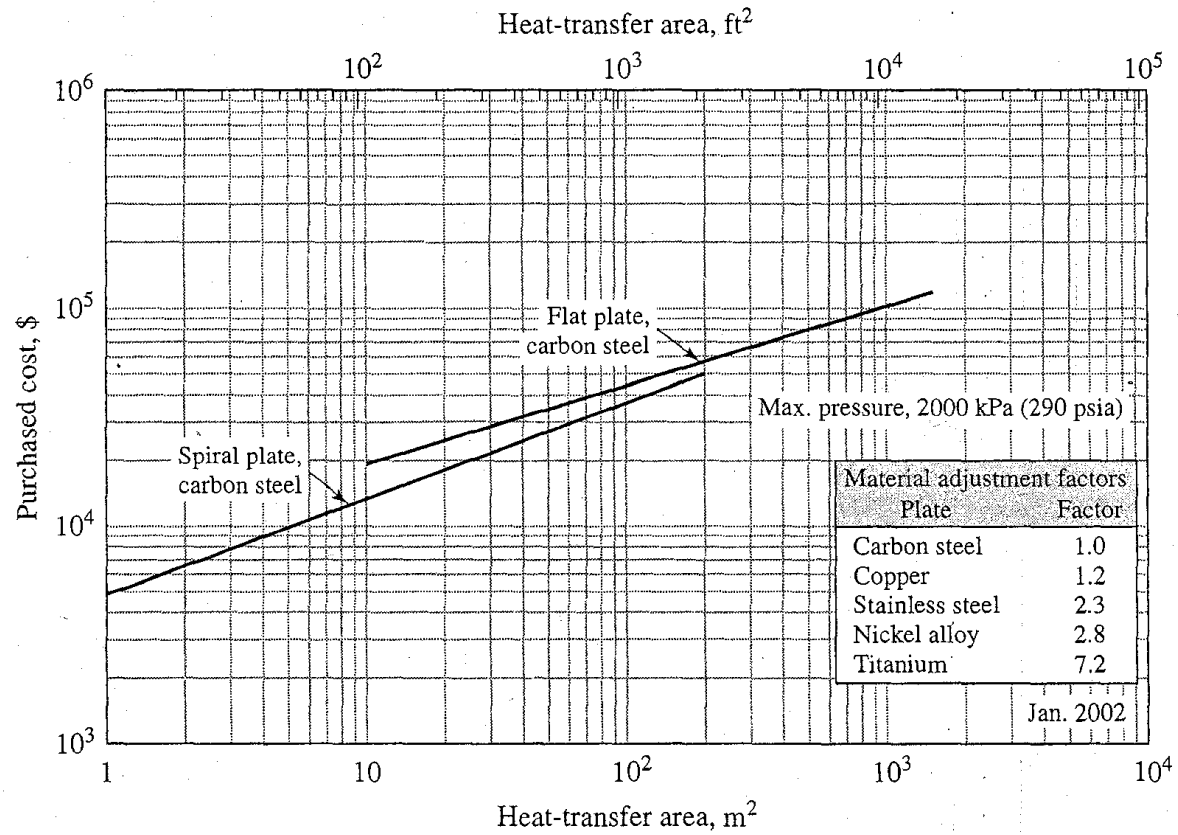
(Continued)

## ANEXO B



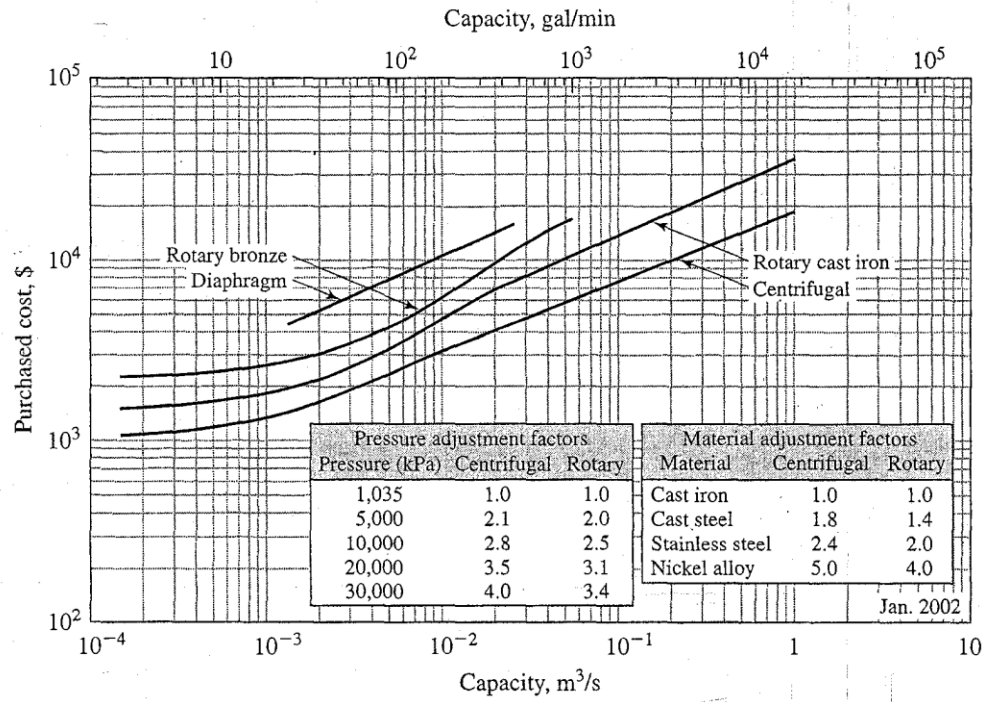
**Figure 14-28**  
 Purchased cost of air-cooled heat exchangers. Area is outside area of equivalent bare tubes, excluding fins.

Anexo C



**Figure 14-27**  
Purchased cost of spiral and flat-plate heat exchangers

# Anexo D



**Figure 12-23**  
Purchased cost of diaphragm, centrifugal, and rotary pumps

Economic Indicators

2009 2010 2011

DOWNLOAD THE CEPCI TWO WEEKS SOONER AT [WWW.CHE.COM/PCI](http://WWW.CHE.COM/PCI)

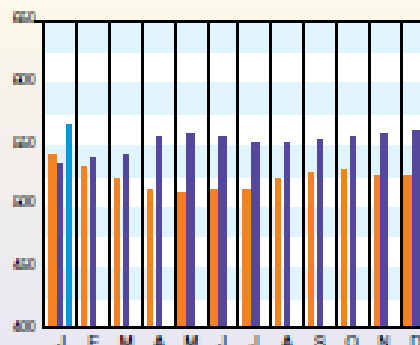
CHEMICAL ENGINEERING PLANT COST INDEX (CEPCI)

(1957-59 = 100)

	Jan. '11 Prelim.	Dec. '10 Final	Jan. '10 Final
<b>CE Index</b>	554.8	540.3	532.9
Equipment	681.7	674.6	631.8
Heat exchangers & tanks	635.8	627.1	571.9
Process machinery	642.5	627.6	601.9
Pipe, valves & fittings	659.2	654.3	796.5
Process instruments	631.0	626.2	619.8
Pumps & compressors	676.5	663.6	603.0
Electrical equipment	695.2	688.4	659.2
Structural supports & misc.	707.4	696.3	640.2
Construction labor	326.7	326.1	331.0
Buildings	606.6	603.3	694.8
Engineering & supervision	334.8	332.6	342.4

Annual Index:

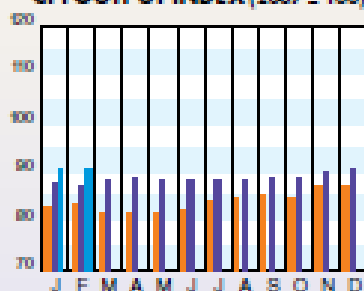
2003 = 482.8
2004 = 444.2
2005 = 468.2
2006 = 488.6
2007 = 525.4
2008 = 575.4
2009 = 521.9
2010 = 550.8



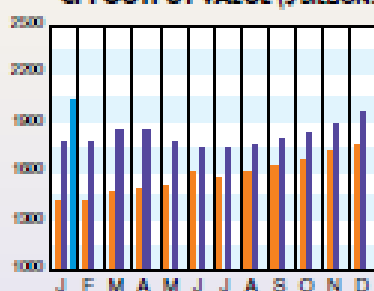
CURRENT BUSINESS INDICATORS

	LATEST	PREVIOUS	YEAR AGO
CPI output index (2007 = 100)	Feb. '11 = 91.0	Jan. '11 = 91.1	Dec. '10 = 90.6
CPI value of output, \$ billions	Jan. '11 = 2,053.1	Dec. '10 = 1,995.3	Nov. '10 = 1,893.4
CPI operating rate, %	Feb. '11 = 73.7	Jan. '11 = 73.8	Dec. '10 = 73.4
Producer price, industrial chemicals (1982 = 100)	Feb. '11 = 304.2	Jan. '11 = 291.4	Dec. '10 = 282.8
Industrial Production in Manufacturing (2007 = 100)	Feb. '11 = 93.5	Jan. '11 = 93.1	Dec. '10 = 92.3
Hourly earnings index, chemical & allied products (1992 = 100)	Feb. '11 = 154.8	Jan. '11 = 156.3	Dec. '10 = 154.9
Productivity index, chemical & allied products (1992 = 100)	Feb. '11 = 134.2	Jan. '11 = 134.1	Dec. '10 = 133.4
		Jan. '11 = 91.1	Feb. '10 = 87.4
		Dec. '10 = 1,995.3	Jan. '10 = 1,786.8
		Dec. '10 = 73.8	Feb. '10 = 70.3
		Dec. '10 = 282.8	Feb. '10 = 269.4
		Dec. '10 = 92.3	Feb. '10 = 87.5
		Dec. '10 = 156.3	Feb. '10 = 153.4
		Dec. '10 = 134.1	Feb. '10 = 121.0

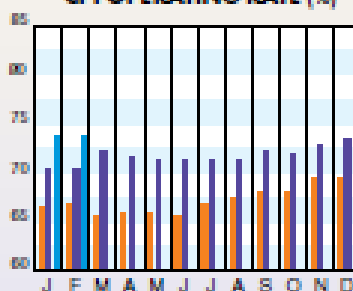
CPI OUTPUT INDEX (2007 = 100)



CPI OUTPUT VALUE (\$ BILLIONS)



CPI OPERATING RATE (%)



Current Business Indicators provided by Global Insight, Inc., Lexington, Mass.

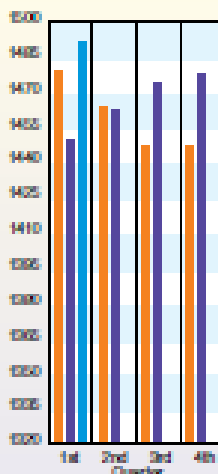
MARSHALL & SWIFT EQUIPMENT COST INDEX

(1926 = 100)

	1st Q 2011	4th Q 2010	3rd Q 2010	2nd Q 2010	1st Q 2010
<b>M &amp; S INDEX</b>	1,490.2	1,476.7	1,473.3	1,461.3	1,448.3
Process industries, average	1,549.8	1,537.0	1,534.4	1,522.1	1,510.3
Cement	1,546.6	1,532.5	1,530.0	1,519.2	1,508.1
Chemicals	1,519.8	1,507.3	1,505.2	1,493.5	1,481.8
Clay products	1,524.9	1,521.4	1,518.3	1,505.6	1,496.0
Glass	1,487.2	1,432.7	1,428.5	1,416.4	1,403.0
Paint	1,560.7	1,545.8	1,542.1	1,527.6	1,515.1
Paper	1,489.4	1,447.6	1,444.5	1,430.1	1,416.4
Petroleum products	1,452.5	1,440.4	1,437.0	1,425.9	1,415.6
Rubber	1,596.2	1,581.5	1,579.3	1,564.2	1,551.0
Related industries					
Electrical power	1,461.2	1,434.9	1,419.2	1,414.0	1,399.6
Mining, milling	1,599.7	1,579.4	1,576.7	1,569.1	1,552.1
Refrigeration	1,827.8	1,809.3	1,804.8	1,786.9	1,772.2
Steam power	1,523.0	1,506.4	1,502.3	1,488.0	1,475.0

Annual Index:

2003 = 1,123.6	2004 = 1,178.9	2005 = 1,244.9	2006 = 1,302.3
2007 = 1,378.3	2008 = 1,440.3	2009 = 1,468.6	2010 = 1,487.4



Source: Marshall & Swift's Marshall Valuation Service manual. Reprinted and published with permission of Marshall & Swift/Boeckh, LLC and its licensors, copyright 2010. May not be reprinted, copied, automated or used for valuation without permission.

CURRENT TRENDS

Capital equipment prices (as reflected in the CE Plant Cost Index; CEPCI) continued their increase from December 2010 to January 2011. With the December numbers now finalized, the Annual CEPCI for 2010 has been calculated at 550.8. The following lists the percent change in the Annual CEPCI over the past eight years, to help put the trends in perspective:

2003-2004	10.5%
2004-2005	5.4%
2005-2006	6.7%
2006-2007	5.2%
2007-2008	9.5%
2008-2009	-9.3%
2009-2010	5.5%

Visit [www.che.com/pci](http://www.che.com/pci) for historical data and more on capital cost trends and methodology. ■



