

# Proyecto Fin de Carrera

## Ingeniería de Tecnologías Industriales

### Automatización del Cálculo de Inversiones en Plantas Industriales “Greenfield”

Autor: Alejandro Pérez-Valseca Navas

Tutor: Aurelio Luis Azaña García

**Dpto. Ingeniería de la Construcción y Proyectos  
de Ingeniería**

**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**

Sevilla, 2021





Trabajo Fin de Grado  
Ingeniería de Tecnologías Industriales

# **Automatización del Cálculo de Inversiones en Plantas Industriales “Greenfield”**

Autor:

Alejandro Pérez-Valseca Navas

Tutor:

Aurelio Luis Azaña García

Profesor titular

Dpto. de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021



Proyecto Fin de Carrera: Automatización del Cálculo de Inversiones en Plantas Industriales  
“Greenfield”

Autor: Alejandro Pérez-Valseca Navas

Tutor: Aurelio Luis Azaña García

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2013

El Secretario del Tribunal



*A mi familia*

*A mi tutor*

*A mis referentes*





# Agradecimientos

---

Llegando al cierre de una etapa, debo compartir méritos:

Con mi padre, por ser mi guía en lo profesional al que admiro e imito con orgullo.

Con mi madre, por ser mi guía en lo personal que abarca todo lo que comprende la palabra bondad.

Con mi hermano, por haber amenizado toda mi vida y enseñarme lo que significa ser honesto.

Con mi abuela, por quererme incondicionalmente y demostrarme que se puede vivir una eterna juventud.

Gracias.

*Alejandro Pérez-Valseca Navas*

*Alumno de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería*

*Sevilla, 2021*



# Resumen

---

Todo proyecto de ingeniería, como cualquier otro proyecto que se lleve cabo, debe diseñarse en consonancia a una premisa de partida fundamental: la inversión de capital debe tener en contraprestación una rentabilidad de retorno esperada que sea factible dentro del marco económico exigido. Con esto en mente, el objetivo de este trabajo de fin de grado es múltiple. En primer lugar, estudiar qué variables son las que se presentan como factores clave en el estudio económico del desarrollo de una planta química. En segundo lugar, como pueden ser estas variables estimadas, bien sea con correlaciones, factores de estimación u otros métodos, y, de igual importancia, qué margen de error se puede esperar de dichos análisis primerizos. Por último, y poniendo en uso el marco teórico desarrollado en los puntos anteriores, diseñar una herramienta informática, en este caso una aplicación gráfica en Python, con el propósito de obtener una estimación inicial suficientemente válida como para valorar la viabilidad de un proyecto “*greenfield*” de una planta química industrial.



# Abstract

---

Every engineering project, just like any other project to be carried out, must be designed according to a fundamental starting premise: the capital investment must provide in return a profit that is feasible within the economic requirements. With this in mind, the purpose of this thesis is multiple. First, to study which variables are the key factors in the economic analysis of the development of a chemical plant. Secondly, how can these variables be estimated, either with correlations, estimation factors or other methods, and, of equal importance, what margin of error can be expected from such first analyses. Finally, using the theoretical framework developed in the previous points, to design a computer tool, in this case a graphical interface in Python, with the purpose of obtaining an initial estimate valid enough to assess the feasibility of a greenfield project of an industrial chemical plant.



<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xvii</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xix</b>
<b>Notación</b>	<b>xxi</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2 Estimación de Costes</b>	<b>3</b>
<i>Capital fijo y capital circulante</i>	5
2.1 <i>Estimaciones de Inmovilizado</i>	5
2.1.1 Estimaciones globales de inmovilizado	6
2.1.2 Estimaciones basadas en los costes de los equipos	7
2.1.3 Valor del dinero con el tiempo	10
<b>3 Aplicación de Cálculo de Inmovilizado</b>	<b>13</b>
3.1 <i>Python</i>	13
3.1.1 Creación del ejecutable con Pyinstaller	14
3.2 <i>Implementación del método de costeo de módulos</i>	14
3.2.1 Cálculo del coste de adquisición	14
3.2.2 Corrección por material y presión	15
3.2.3 Cálculo del coste del módulo	16
3.3 <i>Estimación del coste de la planta</i>	17
3.4 <i>Estimaciones aplicadas a los equipos</i>	18
3.4.1 Compresor	20
3.4.2 Intercambiador de calor	23
3.4.3 Tanque de almacenamiento	26
3.4.4 Turbina	28
3.4.5 Bomba	30
3.4.6 Depósito presurizado	31
3.4.7 Columna de destilación	33
3.4.8 Límites de las estimaciones	34
<b>4 Ejemplo de Estimación</b>	<b>37</b>
<b>5 Conclusiones</b>	<b>45</b>
<b>Anexo A Código Fuente</b>	<b>47</b>
<b>Referencias</b>	<b>75</b>





# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 2-1. Clasificación de estimaciones según AACE	4
Tabla 2-2. Componentes CEPCI	11
Tabla 3-1. Coeficientes para el calculo $Cp0$ del compresor	21
Tabla 3-2. Coeficientes para el cálculo de $FBM$ en compresor	21
Tabla 3-3. Coeficientes para el calculo $Cp0$ del intercambiador	24
Tabla 3-4. Coeficientes para el cálculo de $FM$ en intercambiador	25
Tabla 3-5. Coeficientes para el cálculo de $Fp$ en intercambiadores	25
Tabla 3-6. Coeficientes para cálculo de $CBM$ en intercambiador	26
Tabla 3-7. Coeficientes para el calculo $Cp0$ del tanque	27
Tabla 3-8. Coeficientes para el calculo $Cp0$ de la turbina	29
Tabla 3-9. Coeficientes para el cálculo de $FBM$ de la turbina	29
Tabla 3-10. Coeficientes para el calculo $Cp0$ de la bomba	30
Tabla 3-11. Coeficientes para el cálculo de $FBM$ de la bomba	31
Tabla 3-12. Coeficientes para el cálculo de $Fp$ en la bomba	31
Tabla 3-13. Coeficientes para el calculo $Cp0$ del depósito	32
Tabla 3-14. Coeficientes para el cálculo de $Fp$ en el depósito	32
Tabla 3-15. Límites de aplicación	34
Tabla 4-1. Datos de los Equipos del proceso	38



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 2-1. Evolución del CEPCI de 1991 a 2006	10
Figura 3-1. Línea de código para la creación del ejecutable	14
Figura 3-2. Diagrama de bloques para el cálculo del coste total	18
Figura 3-3. Ventana Principal	20
Figura 3-4. Interfaz del compresor	22
Figura 3-5. Intercambiador de carcasa y tubo con cabezal fijo	23
Figura 3-6. Interfaz del intercambiador	24
Figura 3-7. Diseño de un tanque según norma API-650	26
Figura 3-8. Interfaz del tanque	27
Figura 3-9. Turbina de vapor de Siemens	28
Figura 3-10. Interfaz de la turbina	29
Figura 3-11. Bomba centrífuga industrial	30
Figura 3-12. Esquema de funcionamiento de una columna	33
Figura 4-1. Diagrama del proceso de una planta química	37
Figura 4-2. Cálculo de la columna T-101	39
Figura 4-3. Cálculo del intercambiador E-101	40
Figura 4-4. Cálculo del intercambiador E-102	40
Figura 4-5. Cálculo del intercambiador E-103	41
Figura 4-6. Cálculo de las bombas P-101	41
Figura 4-7. Cálculo del tanque V-101	42
Figura 4-8. Cálculo final del proceso	43



# Notación

---

GUI	Interfaz gráfica de usuario
CEPCI	Chemical Engineering Plant Cost Index
f.o.b	Free on board
IPC	Índice de precios de consumo
$C_p^0$	Coste de adquisición en condiciones estándar
$C_{BM}$	Coste total del equipo (directos + indirectos)
$F_M$	Factor de corrección por material
$F_p$	Factor de corrección por presión
$F_{BM}$	Factor de corrección del módulo









# 1 INTRODUCCIÓN

---

Según la Real Academia Española un proyecto es un “conjunto de escritos, cálculos y dibujos que se hacen para dar idea de cómo ha de ser y lo que ha de costar una obra de arquitectura o de ingeniería” [1]. Se entiende, por tanto, que para la puesta en marcha de un proyecto ingenieril se requiere de un amplio equipo que combina su esfuerzo y trabajo para un fin común y previamente establecido. Se elaborarán memorias de definición del proyecto, su alcance, su propósito, su propuesta como solución. Se harán cálculos que casen el qué hacer y el cómo hacerlo. Se trazarán planos de los diseños que se propongan como posibles ideas viables. En definitiva, se determinarán propuestas fidedignas de cómo ha de realizarse el proyecto. Pero queda el cuánto ha de costar.

En la Arquitectura Industrial:

el Ingeniero Director del Proyecto no debe olvidar nunca que la fabricación es una actividad económica. [...] Un factor que no puede olvidarse nunca porque es importantísimo, es el económico y por tanto las consideraciones de este tipo han de estar siempre presentes, en forma tajante clara y precisa [2, p. 18].

Entendemos por tanto la construcción de una planta como una labor de consideraciones tanto ingenieriles como económicas, sin poder obviar ninguna de las partes. Se debe idear el proyecto de manera que se cumplan los requisitos marcados pero siempre buscando aquellos compatibles con el mínimo coste y con gastos de funcionamiento adecuados a la producción [2, p. 19]. Este planteamiento nos lleva inexorablemente a un punto único de ineludible cumplimiento, y es el estudio de la viabilidad de la planta industrial. Morales [3] define que una planta es viable cuando “produce el producto o productos adecuados, en las cantidades que el mercado demanda en cada momento, a un precio que el mercado está dispuesto a pagar”. Asimismo, para determinar si efectivamente se dan las condiciones aptas para llevar a cabo la idea de producción, éste establece que se deben realizar una serie de Estudios de mercado y de Viabilidad, mínimamente se considerarán:

- Estudio de mercado. Su objetivo es discernir si la demanda del mercado es capaz de absorber la oferta que será creada.
- Estudio de viabilidad técnica. Cuyo objeto es el de estudiar si existe en el momento de creación tecnología apta para llevarlo a cabo.
- Estudio de viabilidad económica. Para analizar esto necesitaremos una estimación de la inversión, principal foco y motivación de este trabajo.
- Estudio de viabilidad financiera. O lo que es lo mismo, conocer las fuentes de financiación del proyecto.

La estimación del coste de la inversión acaba presentándose como un pilar fundamental a la hora de analizar la viabilidad de una planta. El campo de la ingeniería de costes es el encargado de dilucidar el dificultoso entramado que puede presentarse a la hora de realizar una correcta estimación. No estamos hablando de datos conocidos, ni de contabilidades ya realizadas. La labor es la de intentar poner cifras a gastos de la empresa a futuro, indicar cuáles son los cauces por los que se irá el capital. Sobra decir que no suele ser una tarea fácil ni directa, pues las variables que pueden modificar el resultado final son numerosas.

A lo largo del tiempo se han ido desarrollando técnicas de estimación, a cuál más precisa, en un intento tanto de maximizar la fidelidad del resultado como de minimizar el tiempo invertido en realizarlo.

Unas se centran en costes de inmovilizado, mientras que otras ponen su atención en determinar el capital circulante necesario para el adecuado funcionamiento de la planta. Este trabajo se centrará en el primer grupo.

Diferentes autores han considerado diversos enfoques como punto de partida para una estimación fiable. Existen métodos que extrapolan costes de plantas similares a plantas de nueva creación, como la regla de Williams. Otros deciden recorrer el camino de atacar los costes de los equipos primero, entendiendo que son un reflejo principal de la producción de la planta en última instancia, para luego intentar relacionarlos con el coste total. Ejemplos de este segundo caso son el factor de Lang o el método de coste de módulos.

Lo que es inherente al proceso de estimación es la causalidad implícita de que, a mayor precisión deseada, mayor tiempo ha de invertirse. Esto hace que el ingeniero de costes, en su afán por determinar un presupuesto para su proyecto, deba incurrir en una serie de cálculos, en multitud de ocasiones reiterativos, para conseguir determinar su resultado. A raíz de esto surge la idea de desarrollar una herramienta informática que, como bien se le da a la computación, salga airosa de realizar estos cálculos en un periodo ínfimo de tiempo, a la par que dé un resultado de una validez admisible.

En consecuencia, en este trabajo se tratarán cuáles son algunas formas de estimación, y se desarrollará en profundidad una de ellas, el método de costes por módulos, para su implementación en un programa en Python.

## 2 ESTIMACIÓN DE COSTES

---

*“La estimación de costes consiste en la predicción de los costos probables de un proyecto, para un alcance dado y documentado, una localización específica, y un punto de tiempo en el futuro.”*

AACE International, 2010

**E**l desembolso inicial a la hora de poner en marcha el desarrollo de un nuevo proyecto industrial es un dato que todo proyectista desea conocer. Bien sea la construcción de una nueva planta, o simplemente una ampliación de una ya existente, un primer paso de eminente necesidad en aras de un análisis de inversión posterior debe ser la estimación de los costes de dicho proyecto.

Sin embargo, tales costes no son triviales de determinar. En multitud de ocasiones se desea conocer una cifra aproximada incluso antes de haber fijado los equipos requeridos, el diagrama de funcionamiento o incluso las dimensiones totales de la planta. Es por ello que la literatura distingue entre diferentes grados de estimación, atendiendo a su nivel de precisión, y, por ende; a la fase en la que se encuentra el proyecto.

Hay numerosas características que pueden usarse para categorizar los tipos de estimación de costes de proyectos. Algunas de estas características son: el nivel de definición del proyecto, el uso final de la estimación, la metodología de estimación, y el esfuerzo y tiempo necesario para preparar la estimación. AACE recomienda que la característica principal para definir la categoría de clasificación sea el nivel de definición del proyecto. Las otras características se consideran secundarias. [4, p. 33]

Tabla 2-1. Clasificación de estimaciones según AACE

ESTIMATE CLASS	Primary Characteristic	Secondary Characteristic			
	LEVEL OF PROJECT DEFINITION Expressed as % of complete definition	END USAGE Typical purpose of estimate	METHODOLOGY Typical estimating method	EXPECTED ACCURACY RANGE Typical variation in low and high ranges	PREPARATION EFFORT Typical degree of effort relative to least cost index of 1
Class 5	0% to 2%	Concept Screening	Capacity Factored, Parametric Models, Judgment, or Analogy	L: -20% to -50% H: +30% to +100%	1
Class 4	1% to 15%	Study or Feasibility	Equipment Factored or Parametric Models	L: -15% to -30% H: +20% to +50%	2 to 4
Class 3	10% to 40%	Budget, Authorization, or Control	Semi-Detailed Unit Costs with Assembly Level Line Items	L: -10% to -20% H: +10% to +30%	3 to 10
Class 2	30% to 70%	Control or Bid/Tender	Detailed Unit Cost with Forced Detailed Take-Off	L: -5% to -15% H: +5% to +20%	4 to 20
Class 1	50% to 100%	Check Estimate or Bid/Tender	Detailed Unit Cost with Detailed Take-Off	L: -3% to -10% H: +3% to +15%	5 to 100

Fuente: Cost Estimate Classification System – as applied in engineering, procurement, and construction for the process industries, p. 2.

De esta manera, un proyecto en su etapa más prematura acaba presentando grandes dificultades a los inversores sobre cuál será su coste final, dada la gran cantidad de variables que influyen en él. A medida que este va definiéndose, el rango de precisión se va acotando más y más. Sobra decir que es en las primeras etapas de un proyecto cuando más se quiere conocer su coste, dado que esto determinará consecuentemente su posible ejecución.

Las estimaciones clase 5 proporcionan un orden de magnitud sobre el que trabajar. Son estimaciones rápidas, no requieren de muchos datos de partida, y normalmente utilizan el coste de plantas previas similares para hacer una extrapolación al nuevo proyecto. Para este tipo de estimaciones se utilizan métodos de estimación estocásticos como curvas de coste/capacidad y factores, como el factor de Lang, el factor de Hand, la regla de Williams, y similares.

Ascendiendo en la escala de completitud del proyecto, las estimaciones clase 4 ofrecen una precisión esperada de entre -30% por debajo al 50% por encima del valor determinado [5].

“Normalmente, la ingeniería está entre un 1% y un 15% acabada, y comprenderá como mínimo lo siguiente: capacidad de la planta, esquemas de bloques, disposición indicada, diagramas de flujo del proceso para los sistemas de procesos principales” [5].

Este proyecto, dado que tiene por objeto dar una estimación de los costes con unos datos de partida mínimos, se centrará por tanto en estas dos clases mencionadas.

## Capital fijo y capital circulante

La inversión de capital puede ser dividida en dos componentes [6, p. 74]:

1. Coste de capital fijo. Un coste único por todas las instalaciones del proyecto, incluyendo suelo, diseño e ingeniería, equipos, *utilities*, transporte de equipo, gastos de arranque, etc.
2. Capital circulante. Es el capital requerido en adición al capital fijo para poner en marcha el proyecto.

El capital circulante “no es amortizable ya que es [7, p. 53]:

- a. Dinero efectivo (disponible).
- b. Productos fácilmente vendibles (realizable)”.

Según Humphreys [6, p. 58] el capital circulante suele ser entre un 10 y un 20% del capital fijo. Es por lo cual importante una estimación acertada de los costes del inmovilizado, ya que suponen una gran parte del total de la inversión inicial.

En ocasiones el capital circulante se estima en base a estos porcentajes del capital fijo. Otras veces se puede proceder a una estimación más minuciosa de las diferentes partidas que lo constituyen.

En cualquier caso, no entra dentro del alcance de este proyecto la estimación de dicho capital circulante, sino que se pretenderá obtener el capital inmovilizado, del cual se detallarán algunas de las diferentes maneras de estimarlo.

### 2.1 Estimaciones de Inmovilizado

Como se ha comentado, el inmovilizado abarca un gran porcentaje de la inversión realizada en un proyecto. Este se desglosa en partidas tales como:

1. Máquinas o aparatos
2. Gastos de instalar 1, fundaciones, soportes y estructuras
3. Tuberías
4. Instalaciones de medida y control
5. Aislamientos caloríficos y pintura
6. Instalaciones de fuerza eléctrica
7. Terrenos, obra civil y edificios
8. Instalaciones auxiliares (agua, iluminación, vapor, gas, aire comprimido)

9. Honorarios de proyecto y dirección de montaje
10. Contrato de obras
11. Gastos imprevistos
12. Gastos de gestión y constitución (no técnicos y son de poca monta)
13. Previos de investigación, desarrollo y estudio (conocidos por ya sufragados)
14. Puesta a punto: pruebas y puesta en marcha (englobables en 11)
15. “Intereses intercalarios”

Fuente: Organización, gestión, y ejecución de proyectos industriales, 2018, p. 52

El desglose de partidas puede ser aún más detallado, mas lo que se pretende es ejemplificar las diversas aplicaciones de fondos en las que mayoritariamente puede derivar la inversión inicial.

De esta manera, la aportación monetaria etiquetada como capital fijo se ve materializada en adquisición de equipos y su montaje, gastos relativos obra civil e instalaciones, puesta en marcha, así como un ligero porcentaje en gastos a priori no esperados.

### 2.1.1 Estimaciones globales de inmovilizado

Existen varias maneras de abordar el proceso de estimación del capital fijo de un proyecto industrial. La precisión de cada una variará en función del grado de detalle con el que se aborden los cálculos, requiriendo algunas de estas poca elaboración, pudiéndose realizar en pocas horas, mientras que otras, que resultarán más laboriosas, proveerán de resultados más acertados.

Las estimaciones globales son aquellas que “no requieren una estimación previa del inmovilizado en maquinaria y aparatos (partida 1)” [7, p. 53].

La más extendida es la conocida como *Método comparativo de Williams* o simplemente *regla de Williams*.

#### 2.1.1.1 Método de Williams

El método comparativo de Williams propugna que existe una relación entre la capacidad de la planta ( $q$ ) y su coste ( $I$ ). Dicha relación viene dada por la siguiente ecuación:

$$I = a * q^b \quad (2.1)$$

siendo  $a$  y  $b$  dos constantes.

Si se particulariza la ecuación 3.1 para dos plantas y se dividen se tendrá que:

$$\frac{I_2}{I_1} = \left(\frac{q_2}{q_1}\right)^b \quad (2.2)$$

El valor de  $b$  es variable, aunque suele rondar 0,6, de ahí que en la literatura anglosajona esta regla se conozca como la *six-tenths rule* o “regla de los seis décimos”.

Nótese el efecto de economía de escala, ya que un incremento en la capacidad de la planta no producirá el mismo incremento en el coste de esta debido a este exponente siendo menor que uno.

El método de Williams también puede emplearse para estimar los costes de los equipos, existiendo valores estadísticos del exponente de Williams ( $b$ ) para cada equipo. Estos valores unos quedan por encima de 0,6 y otros por debajo; de aquella manera resulta que dicho valor termina siendo suficientemente válido para la planta en su conjunto, puesto que estas varianzas se cancelan [8, p. 195].

#### 2.1.1.2 Método del coeficiente de giro

Este método consiste en obtener el capital inmovilizado multiplicando las ventas anuales por un factor denominado coeficiente de giro, pues hace referencia a la capacidad del capital fijo para generar valor en forma de ingresos de explotación. Las ventas suelen ser conocidas por medio de estudios de mercado, mientras que el coeficiente de giro, según Storch de Gracia et al. [7], tenía un valor de 0,97 en 1990. Sin embargo, apuntan que este coeficiente ha disminuido con los años dado que la mayor competencia presiona a la baja los precios y por tanto los ingresos por ventas, mientras que la utilización de técnicas más caras presiona el valor de la inversión al alza, contribuyendo ambos a la reducción de este coeficiente.

$$I = \frac{V}{g} \quad (2.3)$$

Donde:

$I$  es el valor de la inversión

$V$  es el valor de las ventas

$g$  es el coeficiente de giro

Del mismo modo que el método de Williams, el método del coeficiente de giro también puede usarse para estimar costes de equipos concretos, aunque existen métodos más eficaces para esta labor como veremos más adelante.

### 2.1.2 Estimaciones basadas en los costes de los equipos

Estos métodos ponen su foco en hallar los costes de los diferentes equipos que utiliza la planta, considerando que existe una correlación entre el coste de dichos equipos y el coste total de la planta, lo cual puede sonar verosímil dado que son estos los que generan la producción en última instancia.

Cabe resaltar que para este tipo de estimaciones se precisa, cómo no, del número y tipología de equipos de la planta. Esto casa con lo expuesto al inicio del capítulo sobre clasificaciones de estimación, ya que, a cambio de la necesidad de una mayor definición del proyecto final, se espera un mejor resultado de dichas estimaciones.

#### 2.1.2.1 Método de Lang

El método de Lang es un método factorial desarrollado por Hans Lang [9] en 1947 en la revista *Chemical Engineering*. En ella, introdujo una idea simple pero efectiva, estimar el coste total de la planta como un factor del coste de los equipos. Así:

$$C = F_{Lang} \sum_{i=1}^n C_{e,i} \quad (2.4)$$

donde:

C es el coste de la planta

$F_{Lang}$  es el factor de Lang

$C_{e,i}$  son los costes de cada uno de los equipos

Lang propuso 3 valores diferentes del factor al cual dio nombre, según si la planta era de procesos sólidos, para la que atribuyó un valor de 3,10, procesos sólidos-fluidos, donde el factor pasa a ser 3,63, o procesos fluidos, que tendrían un valor de 4,74.

Este método, aunque ofrece buenas estimaciones para el poco tiempo que requiere su aplicación, presenta algunos problemas, como por ejemplo que aplica el mismo factor a todos los equipos, además de que el valor del factor de Lang ha ido creciendo con los años dados los avances industriales, llegando a valores de en torno a un 5,12 para las plantas de fluidos [10].

### 2.1.2.2 Método de Hand

En 1964, W.E. Hand propuso una mejora del factor de Lang, donde cada equipo tendría su propio factor, en vez de utilizar uno según el tipo de proceso. Esto soluciona la ausencia de distinción entre equipos de Lang. De tal forma:

$$C = \sum_{i=1}^n f_i C_{e,i} \quad (2.5)$$

donde:

C es el coste de la planta

$f_i$  es el factor de cada equipo

$C_{e,i}$  son los costes de cada uno de los equipos

El problema que presenta este método hace acto de presencia en la situación en la que no se encuentre el factor correspondiente al equipo deseado, aunque diversos autores han ido ampliando la lista de factores que inicialmente fue propuesta por Hand.<sup>1</sup>

### 2.1.2.3 Module Costing Method

El *Module Costing Method*, o método del coste por módulos, es una metodología introducida por

<sup>1</sup> Véase Wroth, W.F. (1960). Factors in cost estimation. Chem. Eng., 67 y Guthrie KM. Chem Eng. 24 marzo 1969:114-142



Guthrie [11], que posteriormente desarrollan Turton et al. [8] en su libro *Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes*. Turton apunta que “está generalmente aceptada como la mejor para realizar estimaciones preliminares de costes” [8].

La motivación de esta metodología surge en un intento por solucionar algunos de los problemas que se presentan en los métodos anteriores. Esto es, ¿qué sucede si tenemos dos plantas iguales, pero una de ellas opera a una presión 20 veces mayor? ¿Y si se decidiera utilizar unos equipos hechos de acero inoxidable en una y de acero al carbono en otra?

En el primer supuesto, los equipos precisarán de un mayor grosor para soportar las altas presiones, se requerirán controles más precisos tanto de dichas presiones como de las fugas, etc.

En el segundo caso, es natural que el material con el que se construyan los equipos tendrá un impacto, más o menos significativo dependiendo de los materiales y el tamaño del equipo, en el coste final de este.

En cualquier caso, el *Module Costing Method* pretende atender a estas dos necesidades de manera que:

esta técnica de costeo reduce todos los costes a los de compra del equipo evaluado para unas condiciones estándar. Las desviaciones de estas condiciones se ajustan usando factores multiplicadores que dependen de lo siguiente:

1. El tipo específico de equipo
2. La presión específica del sistema
3. Los materiales específicos de construcción. [8]

Por tanto, el primer objetivo de esta técnica es estimar el *Bare Module Cost*, o, traduciendo literalmente, el coste del módulo “al desnudo”. Este coste es la suma de costes directos e indirectos del equipo. Los costes directos son el coste de dicho equipo *free on board* (f.o.b)<sup>2</sup>, materiales para su instalación —desde tuberías y aislamiento hasta pintura—, así como la mano de obra requerida para su instalación. Los indirectos abarcan gastos como el envío, la ingeniería, etc. En adelante, y por simplicidad dialéctica, nos referiremos a este como coste total del módulo.

$$C_{BM} = C_p^0 F_{BM} \quad (2.6)$$

donde:

$C_{BM}$  es el *Bare Module Cost*, el coste total del módulo

$C_p^0$  es el coste de compra en condiciones estándar: equipo hecho del material más común, normalmente acero al carbono operando a presión ambiente

$F_{BM}$  es el factor de corrección que ajusta tanto por todos los costes mencionados como materiales, mano de obra, etc., además de la influencia de los materiales de construcción y presión de trabajo.

Cabe anotar que esta ecuación, aunque es la más común, no es siempre la misma para todos los equipos que se estimen mediante este método, mas si lo es para los que se recogen en este trabajo. Si se desea profundizar más se puede acudir al anexo A de la obra de Turton, *Analysis, Synthesis and Design of Chemical Processes* [8].

La explicación detallada de cómo se obtienen los valores  $C_p^0$  y  $F_{BM}$  se reservará para más adelante, en

<sup>2</sup> Free on board: indica que el vendedor debe cargar las mercancías al barco designado por el comprador, haciéndose cargo de todos los costes y riegos hasta que estas se encuentran en el barco. [23]

el capítulo 4, donde se desarrollará en mayor profundidad este método y su implementación en una herramienta informática que permita la automatización de los cálculos.

### 2.1.3 Valor del dinero con el tiempo

En economía, se entiende por inflación “el aumento generalizado en los precios de los bienes y servicios durante un periodo de tiempo” [12]. En el caso de los equipos industriales, esto no iba a ser de otro modo. Cuando, por ejemplo, se utiliza el método de coste de módulos para estimar el precio de un equipo, los coeficientes y tablas en los que se apoya el ingeniero han sido calculados para un año determinado. De forma ineludible, los precios de todos los insumos que acaban conformando este equipo han ido aumentando con el paso de los años, o, si se quiere, el valor de la moneda en la que son pagaderos los equipos ha ido perdiendo valor.

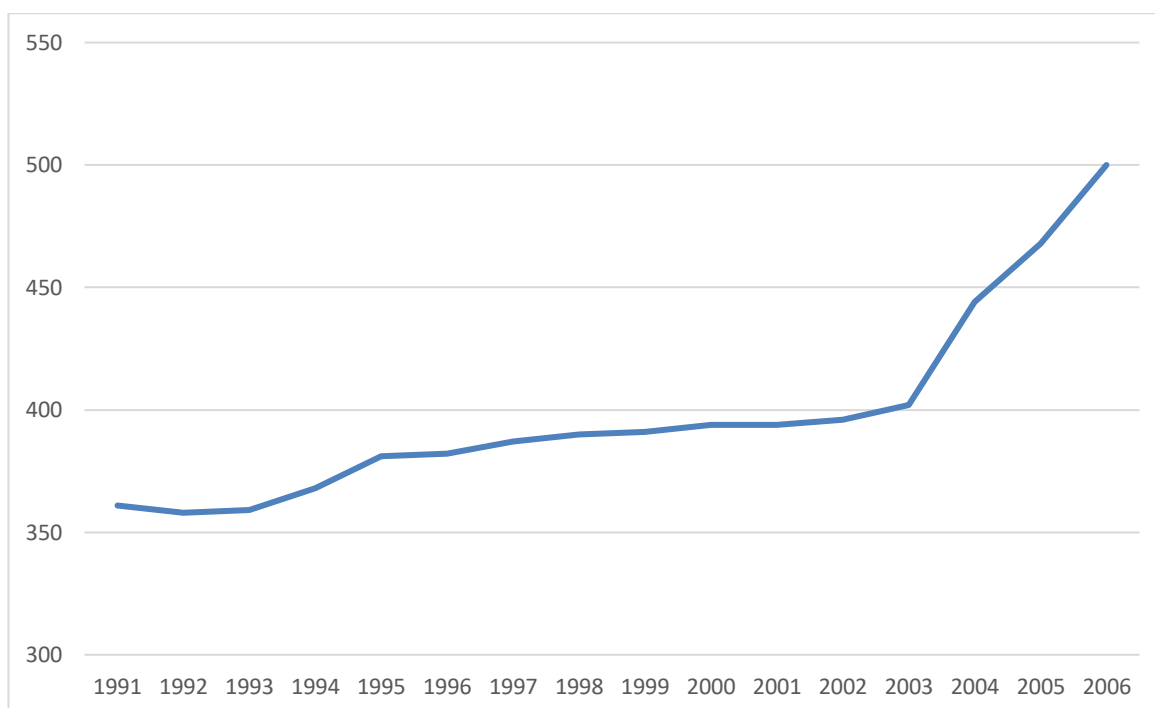
Esto plantea una nueva problemática, ya que todos los costes de años anteriores habrán de capitalizarse al año en curso para que el resultado del estudio sea de utilidad.

Para ello, existen diversos índices que ajustan por esas variaciones de precios año a año, el más conocido es el índice de precios de consumo (IPC), que mide la variación de los precios de una cesta de bienes y servicios comunes en el consumo de una familia estándar en un lugar y durante un periodo de tiempo determinados.

Pese a ello, este índice no refleja fielmente las variaciones en precios que se necesitan en la industria química, para la que existen otros índices más representativos.

Uno de los más utilizados es el Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPCI).

Figura 2-1. Evolución del CEPCI de 1991 a 2006



El CEPCI consiste en 4 componentes [6]:

Tabla 2-2. Componentes CEPCI

Equipos	50,675%
Mano de obra para construcción	29,000%
Edificios	4,575%
Ingeniería y supervisión	15,75%

Para obtener el coste actualizado al año actual se usa la siguiente ecuación:

$$C_2 = C_1 \frac{I_2}{I_1} \quad (2.7)$$

Donde

$C_i$  es el coste del equipo

$I$  es el índice de costos

1 es el año base de los costes

2 es el año al que se desean referir los costes



# 3 APLICACIÓN DE CÁLCULO DE INMOVILIZADO

---

Tras la distinción entre las diferentes clases de estimación realizada en la Tabla 2-1. Clasificación de estimaciones según AACE, el objetivo de este trabajo será el de diseñar una herramienta informática capaz de dar una estimación de clase 4; esto es, asumiendo en un principio conocidos los equipos que serán necesarios, conseguir una estimación con una precisión resultante de alrededor de un 50%, a priori suficientemente válida para una aprobación presupuestaria de carácter preliminar.

Tras la disertación sobre los diferentes métodos de estimación, y dadas las características limitantes que subyacen a este trabajo de fin de grado, a saber; el estudiante no dispone de una base de datos con presupuestos de equipos de plantas ya construidas, práctica común en estudios de viabilidad de empresas dedicadas a la estimación de costes, se concluye que el método de *Module Costing* introducido en el capítulo anterior es el que mejor satisface las condiciones iniciales que definen este proyecto.

Si bien son varios los lenguajes de programación que pudieren utilizarse para la realización de tal aplicación informática, se ha optado por el uso de Python por su sencillez tanto en la sintaxis como en su facilidad para implementar herramientas gráficas que posibiliten una interfaz gráfica de usuario (GUI). Se usará el paquete tkinter para la creación de la GUI del programa en cuestión.

## 3.1 Python

Python es un lenguaje de programación, es decir, un conjunto de instrucciones diseñadas para dar instrucciones precisas entendibles y ejecutadas por un ordenador. Es un lenguaje interpretado, interactivo y orientado a objetos. Incorpora módulos, excepciones, escritura dinámica, tipos de datos dinámicos de muy alto nivel y clases. Soporta múltiples paradigmas de programación más allá de la programación orientada a objetos, como la programación procedimental y funcional. También puede utilizarse como lenguaje de extensión para aplicaciones que necesitan una interfaz programable. Python es multiplataforma: funciona en muchas variantes de Unix, incluyendo Linux y macOS, y en Windows [13].

Python contiene numerosas librerías, las cuales facilitan el trabajo al programador, ya que no tiene que programarlas desde cero. En este trabajo se han utilizado dos:

- Librería `#math`: es una librería con funciones matemáticas definidas en el estándar de C.
- Librería `#tkinter`: es un paquete que ofrece la posibilidad de diseñar una interfaz gráfica en Python. Se considera un estándar para la GUI en Python y sencilla de utilizar, motivos por los cuales se ha seleccionado para la aplicación.

### 3.1.1 Creación del ejecutable con Pyinstaller

Con el fin de que el usuario no necesite abrir el código por su cuenta y ejecutarlo, necesitando un intérprete de Python, se ha querido agrupar el código fuente en un ejecutable único, de manera que facilite el uso de la aplicación.

Para ello se ha usado la librería pyinstaller, que se encargará de aunar el código fuente y las librerías utilizadas en un solo paquete ejecutable. Se abrirá la ventana de comandos de Windows en la ubicación donde se encuentra el archivo .py. Por defecto, la terminal de Windows se ejecuta cuando se abre nuestro programa. Con el fin de evitar eso se usará la instrucción `-windowed`. De la misma forma, para que todo quede en un único archivo, usaremos la instrucción `-onefile`. Esto aumenta el tamaño del archivo, pero dado que el programa no es excesivamente pesado lo asumiremos.

Figura 3-1. Línea de código para la creación del ejecutable

```
C:\Users\alepv\Desktop\ejecutable>pyinstaller --onefile --windowed TFG.py
```

## 3.2 Implementación del método de costeo de módulos

Como se introdujo en el capítulo anterior, será el método de costeo por módulos la piedra angular de los cálculos de este proyecto. Se ha seleccionado este método porque se ha considerado un buen punto intermedio en cuanto a fase de definición del proyecto se refiere.

Si se hubiera partido de un completo desconocimiento de todo lo que atañe al proyecto se habría obtenido una estimación rápida pero poco precisa. Para tan bajo grado de exactitud es difícil considerar necesaria la molestia de utilizar un programa informático, bastaría con un poco de experiencia del ingeniero y una calculadora.

Por otra parte, si se hubiera considerado una vasta definición de lo que conforma el proyecto final, estimaciones de este tipo carecen probablemente de cualquier utilidad marginal, puesto que se buscaría un presupuesto para un proyecto final y no bastaría con una precisión de un 50% de error, propia de estimaciones de clase 4.

En definitiva, este programa tendrá cabida cuando, por ejemplo, se disponga de un posible diagrama de flujo de los equipos a añadir en una planta y se quiera estimar el coste de todo el inmovilizado que esta ampliación (o construcción de cero) supondría.

### 3.2.1 Cálculo del coste de adquisición

El primer paso común a todos los equipos es el cálculo del coste de adquisición del equipo en las condiciones estándar que se establecieron, acero al carbono en cuanto a material y presión atmosférica.

Como dice Turton:

la mejor forma de estimar el coste de adquisición de un equipo es con información actualizada de un proveedor. La segunda es usar datos de coste de equipos comprados anteriormente. Otra técnica, suficientemente precisa para estimaciones de costes preliminares, es usar gráficos de síntesis disponibles para varios tipos de equipos comunes [8].

La primera posibilidad queda fuera del alcance de este proyecto, donde se pretende obtener una estimación sencilla y sin mucha complicación por parte del usuario. Sin embargo, queda abierta la puerta a posibles ampliaciones de este proyecto, donde se considere la posibilidad de que el usuario disponga de tales costes y pueda añadirlos creando su propio equipo. Se comentará esta ampliación en el capítulo de Conclusiones.

La segunda tampoco casa con la intención de este proyecto, ya que, como se dijo al principio del capítulo, la calidad de estudiante del autor del presente trabajo imposibilita el acceso a una base de datos de precios de equipos, normalmente meticulosamente cuidadas por parte de las empresas dada su importancia en sus propios cálculos.

Por tanto, para realizar las estimaciones se emplearán los coeficientes que fueron desarrollados a raíz de un estudio de empresas manufactureras en verano de 2001 y del software R-Books de Richardson Engineering Services [8]. De ahí se actualizarán los costes a fecha presente.

$$\log_{10} C_p^0 = K_1 + K_2 \log_{10}(A) + K_3 \log_{10}(A)^2 \quad (3.1)$$

Donde:

$C_p^0$  es el coste de adquisición del equipo en condiciones estándar.

$K_i$  son los coeficientes que variaran para cada equipo

$A$  es el parámetro característico del equipo

Tras esto, se procederá a realizar una corrección por diferencia de materiales de construcción y otra por diferencia en la presión de trabajo. Cabe resaltar que ni la turbina ni el compresor cuentan con corrección por presión. Esto es debido a que no se disponen de datos para esos equipos que permitiesen la creación de sus coeficientes.

### 3.2.2 Corrección por material y presión

El material base fue establecido como acero al carbono. La elección del material de construcción empleado en una planta dependerá de varios factores. Normalmente es el fluido de trabajo y el fin de evitar la corrosión los que dictaminan la selección, aunque otros factores como características mecánicas, térmicas, eléctricas, resistencia a la radiación, etc., pueden también jugar un papel de gran importancia según qué aplicación [14]. Se aportará un factor correctivo  $F_m$  para la diferencia de coste respecto al mismo equipo, pero construido íntegramente de acero al carbono. Turton [8] realiza una aclaración importante, y es que este factor por material no es la simplemente la variación relativa

respecto a usar acero al carbono. Esto se debe a que, al igual que el coste total del módulo, el coste de adquisición no es íntegramente el coste de los materiales, sino también coste de maquinaria, mano de obra, y demás.

La corrección por presión requerirá del uso de fórmulas, una para tanques, depósitos presurizados, columnas y similares —en definitiva, recipientes de almacenamiento de una importante cantidad de fluido— y otra genérica para el resto de equipos. Se detallarán cada una más adelante.

### 3.2.3 Cálculo del coste del módulo

Una vez se tiene tanto el coste de adquisición en condiciones estándar como los factores de material y presión pertinentes según el diseño del equipo deseado, se utilizará la ecuación (2.6) para calcular el coste total del módulo, esto es, tal y como se menciona anteriormente, los costes tanto directos como indirectos en base a ese equipo.

En última instancia, queda por determinar el valor de  $F_{BM}$ , factor que multiplica al coste de adquisición en condiciones estándar para dar el coste total del módulo. Dicho factor viene determinado por la siguiente fórmula:

$$F_{BM} = (B_1 + B_2 F_M F_P) \quad (3.2)$$

Donde:

$F_{BM}$  es el *Bare Module Factor*, el factor de coste de modulo en adelante

$B_i$  son constantes experimentales que varían según el equipo

$F_M$  es el factor corrector por material

$F_P$  es el factor corrector por presión

Si se introduce esta ecuación en la (2.6) queda:

$$C_{BM} = C_p^0 (B_1 + B_2 F_M F_P) \quad (3.3)$$

En esta ecuación se aprecia el efecto que tienen los factores de corrección de presión y material en el coste total del módulo. Si, por ejemplo, los coeficientes  $B_1$  y  $B_2$  valen cero, entonces el coste de adquisición se relaciona directamente con el coste total a razón de ambos factores correctivos. Como se puede entrever, esto no siempre es así, y cada equipo dotará por medio de los coeficientes  $B_1$  y  $B_2$  un peso a los factores de corrección.



### 3.3 Estimación del coste de la planta

El enfoque que sigue este método de estimación es el de intentar estimar el coste de la planta a partir del coste totales de los equipos. Existen dos posibilidades a la hora de construir una planta industrial [15]:

- Plantas *Greenfield*: Como su nombre anglosajón sugiere, son plantas que se construyen desde cero, en campo “verde”, por lo que se evitan labores de demolición, reformas, etc. Sin embargo, en ellas no se puede aprovechar el ahorro que supone tener disponibles edificaciones previas.
- Plantas *Brownfield*: A diferencia de la anterior, consisten en ampliaciones o reformas a plantas ya existentes, de manera que edificios y estructuras antiguas se ponen en uso, aunque a veces los costes se pueden disparar respecto a las *Greenfield* si las tareas de demolición son demasiado costosas.

Para estimar estas dos clases de construcción, es necesario añadir otros costes a los directos e indirectos de los equipos. Son esencialmente dos grupos [8]:

- Costes de tarifas y contingencias: Los costes de contingencia dependen del grado de detalle del diagrama de procesos aportado y la fiabilidad de los datos de costes. Por norma general, se toman un 3% y un 15% de los costes totales de módulos. Con esto se tendrían los costes para una ampliación a una planta existente (*Brownfield*).
- Costes de instalaciones auxiliares: son los asociados a edificios auxiliares, *utilities*, adecuación del lugar, etc. Estos costes varían entre 20% y 100% del coste de los módulos en condiciones estándar, ya que no son dependientes de las condiciones de presión y los materiales utilizados. Tomaremos un valor medio conservador de 50%. Sumados a los anteriores se tienen los costes para plantas *Greenfield*.

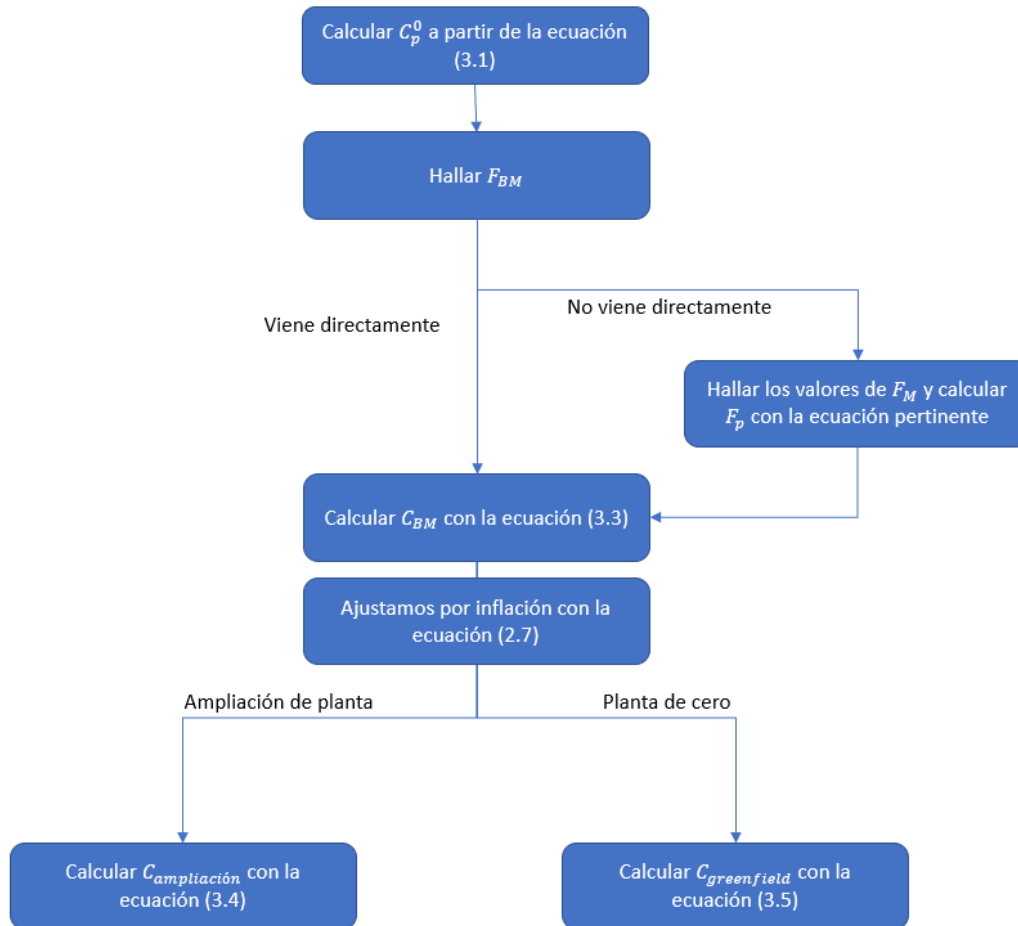
$$C_{ampliación} = 1.18 \sum_{i=1}^n C_{BM,i} \quad (3.4)$$

Donde n es el número de equipos.

$$C_{greenfield} = C_{ampliación} + 0.5 \sum_{i=1}^n C_{BM,i}^0 \quad (3.5)$$

Se ha diseñado un diagrama de bloques que ilustra gráficamente las etapas a seguir para la estimación de los equipos.

Figura 3-2. Diagrama de bloques para el cálculo del coste total



Con todo esto, ya podemos calcular el coste de una planta industrial de nueva creación. Podemos ahora proceder al desglose de cada equipo en particular.

### 3.4 Estimaciones aplicadas a los equipos

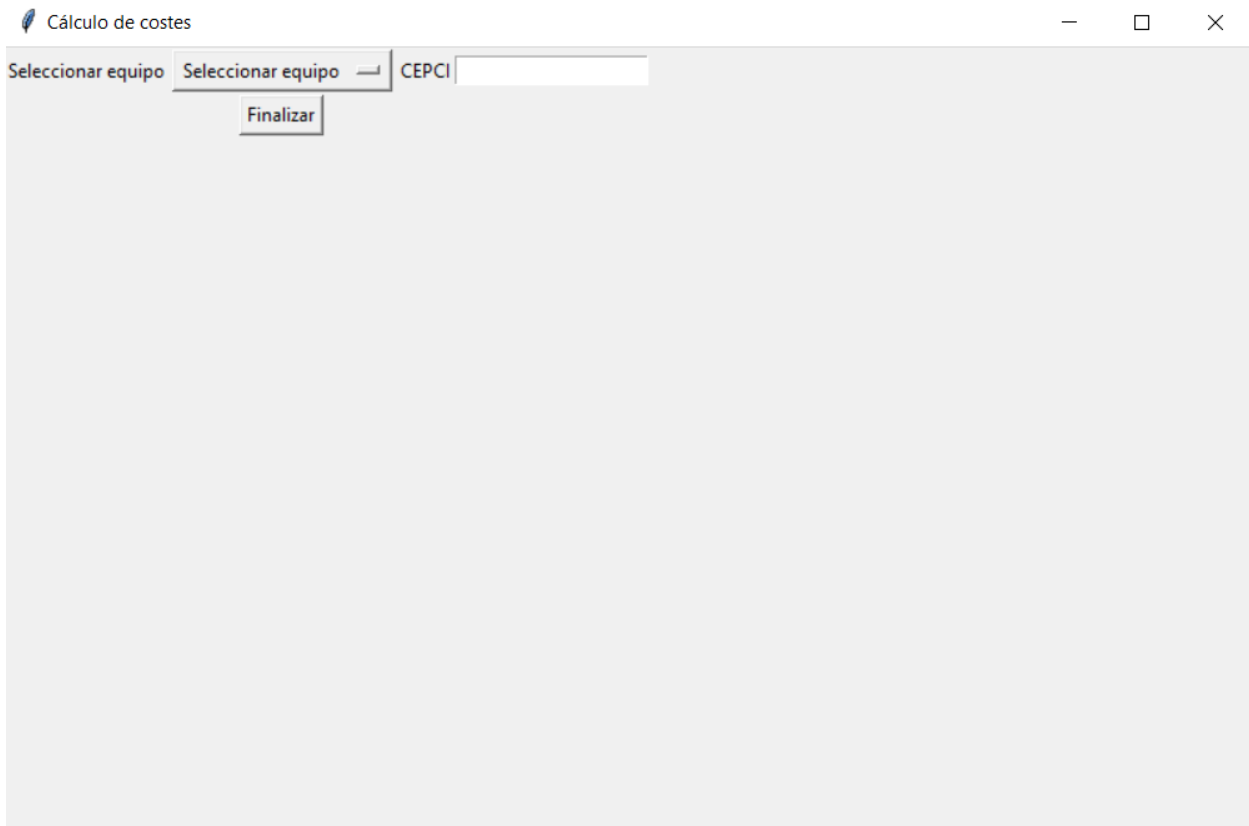
El programa consta de esencialmente 3 ventanas:

En su arranque, se mostrará la ventana principal (Figura 3-3. Ventana Principal), donde se podrá hacer la selección del primer equipo a importar. Se ha incluido una lista de hasta siete equipos:

- Compresores:
  - Centrífugo
  - Axial
  - De tornillo
  - Alternativo
- Intercambiadores de calor
  - Doble tubo
  - Multitubo
  - Cabezal fijo, o tubo en U
  - Cabezal Flotante
- Tanque
  - De techo flotante
  - De techo fijo
- Turbina
  - Axial
  - Radial
- Bomba
  - Centrífuga
  - Desplazamiento positivo
  - Alternativa
- Depósito presurizado
  - Horizontal
  - Vertical
- Columna de destilación

Asimismo, deberá introducirse el valor del CEPCI del año en curso. Para los ejemplos se usará el valor 596.2; que fue el valor final del CEPCI año 2020.

Figura 3-3. Ventana Principal



Una vez seleccionado el equipo deseado, aparecerán los parámetros pertinentes necesarios para la estimación de su coste.

### 3.4.1 Compresor

El compresor es una de las máquinas que pertenece a la categoría de máquinas térmicas. Las máquinas térmicas son dispositivos que intercambian energía con el fluido que circula en su interior alterando así su presión de remanso. Las máquinas térmicas se pueden a su vez subdividir en dos categorías:

- Máquinas motoras: se produce energía mecánica en el eje de la máquina a costa de la energía del fluido de trabajo. Este es el caso de las turbinas.
- Máquinas generadoras: el fluido aumenta su energía a su paso por la máquina, obteniéndose de la energía mecánica del eje de esta.

El compresor, por tanto, pertenece a este segundo caso, donde el eje del compresor gira a una determinada velocidad y es esta energía mecánica del eje la que se termina transfiriendo al fluido en forma de energía cinética y presión [16].

Para el coste el compresor, se precisan de los siguientes factores de corrección:

Tabla 3-1. Coeficientes para el calculo  $C_p^0$  del compresor

<b><u>Tipo de compresor</u></b>	<b>K<sub>1</sub></b>	<b>K<sub>2</sub></b>	<b>K<sub>3</sub></b>
<b>Centrífugo</b>	2.2891	1.3604	-0.1027
<b>Axial</b>	2.2891	1.3604	-0.1027
<b>Tornillo</b>	5.0355	-1.8002	0.8253
<b>Alternativo</b>	2.2891	1.3604	-0.1027

Utilizando estos coeficientes y el valor de la potencia del compresor en kilovatios, se calcula el coste de adquisición en condiciones estándar del compresor con la fórmula (3.1).

Tabla 3-2. Coeficientes para el cálculo de  $F_{BM}$  en compresor

<b><u>Tipo de compresor</u></b>	<b>F<sub>BMAC</sub></b>	<b>F<sub>BMAI</sub></b>	<b>F<sub>BMAle.Esp.</sub></b>
<b>Centrífugo</b>	2.74	5.75	11.45
<b>Axial</b>	3.83	8.04	15.92
<b>Tornillo</b>	2.41	5.04	9.85
<b>Alternativo</b>	3.37	7.00	13.88

Una vez seleccionados, se introducen en la fórmula (2.6) y se obtiene el coste total al año 2001, cuando se desarrollaron estos coeficientes. Por último, se ajusta la inflación con la ecuación (2.7) y se obtiene el coste en fecha actual.

Figura 3-4. Interfaz del compresor

The screenshot shows a software window titled "Cálculo de costes". The interface includes the following elements:

- Equipos:** A dropdown menu showing "Compresor" and a text input field containing "CEPCI".
- Tipo compresor:** A button labeled "Seleccionar" with a dropdown arrow.
- Material del compresor:** A button labeled "Seleccionar" with a dropdown arrow.
- Potencia (kW):** An empty text input field.
- Coste compresor:** A text input field containing "N/A".
- Buttons:** "Calcular", "Añadir", and "Finalizar" are located at the bottom of the form area.

Para la estimación del compresor, el programa requerirá:

- 1) El tipo de compresor, los cuales se han enumerado al inicio del capítulo.
- 2) El material del compresor. Se da a elegir entre acero al carbono, el cual se toma como base para los cálculos de los factores que corrigen por cambio de material, acero inoxidable, aleación del acero muy utilizada en equipos, aunque con un coste más elevado, y por último aleados especiales. En esta categoría incluimos aleaciones como Hastelloy, marca registrada, que es una aleación de cromo, níquel y molibdeno, generalmente considerada como versátil y resistente a la corrosión [17]; y otras aleaciones de níquel, normalmente caras.
- 3) Parámetro que define el equipo. Por último, se precisará de un parámetro característico que variará según el equipo, que es el que define el tamaño y coste de este. Para el ejemplo del compresor, este parámetro será la potencia con la que trabaja, en kilovatios. Por otra parte, para los intercambiadores se pedirá el área de transferencia, la cual es la que en última instancia determina su tamaño. Para los tanques, será el volumen de este, mientras que, para los depósitos presurizados, se exigirá introducir diámetro y altura, así como la presión a la que almacenan. Las bombas, por último, precisarán de tanto la potencia de trabajo, como la presión a la que descargan.

Una vez introducidos todos los datos necesarios para el cálculo, se tendrán varias opciones.

Si se pulsa el botón calcular, el programa devolverá el valor del *Bare module cost* del equipo en cuestión. Esto es, el programa nos dará los costes tanto directos como indirectos del equipo seleccionado a las condiciones que le hemos fijado.

Se recuerda de nuevo que dicho valor no es el coste de compra del equipo, el cual sería notablemente menor, ya que en este coste irán incluidos costes de instalación, mano de obra, costes de ingeniería, etc.

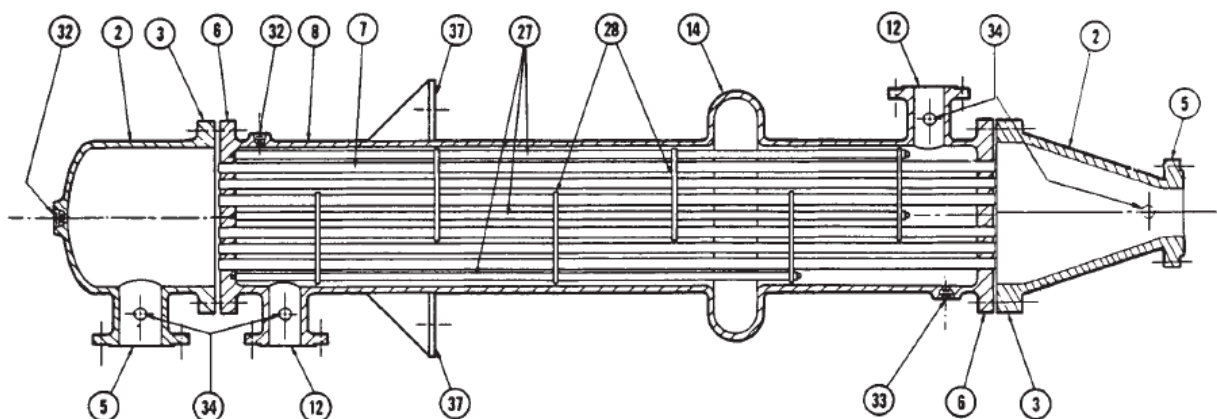
Por otro lado, si se presiona el botón añadir, el programa calculará el coste en cuestión de la misma manera que habiendo pulsado calcular, y también lo mostrará en pantalla, pero, además, este coste se almacenará en una “cesta”, de manera que el usuario puede seguir interactuando con otros equipos y añadiendo más a dicha cesta. Cuando termine, se pulsará el botón finalizar, entendiendo que se da por concluido el proceso de adición de equipos, y el programa muestra la tercera ventana disponible. En esta, se volverán a recuperar en pantalla los equipos que fueron seleccionados por el usuario, con sus costes base, es decir, sus costes en condiciones estándar (recordemos, material acero al carbono y presión atmosférica) y su coste total.

En adición a esto, se calculará también la suma de los costes en condiciones estándar, así como los costes totales de todos los equipos añadidos. También se muestran finalmente el coste que supondría la inclusión de dichos equipos a una ampliación de una planta existente, conjuntamente con el coste de una planta “greenfield”, es decir, de nueva construcción, cuyo listado de equipos fuera el definido.

### 3.4.2 Intercambiador de calor

Los intercambiadores son equipos muy utilizados tanto en la industria como para uso doméstico, ya que son los que habilitan la transferencia de energía térmica entre dos fluidos (o un fluido y un sólido), de manera que tienen multitud de aplicaciones, entre ellas sistemas de calefacción, refrigeración, sistemas de recuperación de energía, etc. Los intercambiadores existen de varios tipos y configuraciones. Cuando no se necesita una gran área de transferencia, se recurre a los de doble tubo, un tubo que contiene uno de menor diámetro en su interior. Otra clase común son los de placas, famosos por una gran área de transferencia en un espacio considerablemente compacto. Los más utilizados en la industria química sin embargo son los de carcasa y tubo. En ellos un fluido circula por el interior de los tubos, que se encuentran contenidos dentro de una carcasa, por la que fluye el segundo fluido [18].

Figura 3-5. Intercambiador de carcasa y tubo con cabezal fijo



Para el cálculo de sus costes, se precisará el tipo de intercambiador. Se han incluido los que se han considerado más frecuentes en la industria química. Intercambiador de doble tubo, multitubo, y dos tipos de carcasas y tubo (uno de cabezal flotante y otro fijo, válido también para tubos en U).

Para su estimación se comienza con el coste de adquisición resolviendo la ecuación (3.1) con el área de transferencia del intercambiador y los siguientes coeficientes.

Tabla 3-3. Coeficientes para el calculo  $C_p^0$  del intercambiador

<b>Tipo de intercambiador</b>	<b>K<sub>1</sub></b>	<b>K<sub>2</sub></b>	<b>K<sub>3</sub></b>
<b>Doble tubo</b>	3.3444	0.2745	-0.0472
<b>Multitubo</b>	2.7652	0.7282	0.0783
<b>Cabezal fijo, o tubo en U</b>	4.3247	-0.303	0.1634
<b>Cabezal Flotante</b>	4.8306	-0.8509	0.3187

Figura 3-6. Interfaz del intercambiador

The screenshot shows a software window titled 'Cálculo de costes'. The interface includes the following elements:

- Equipos:** A dropdown menu set to 'Intercambiador de calor' and a text input field containing 'CEPCI'.
- Tipo intercambiador:** A dropdown menu with a 'Seleccionar' button.
- Material Carcasa/Tubo:** A dropdown menu with a 'Seleccionar' button.
- Area (m2):** A text input field.
- Presion (barg):** A text input field.
- Coste intercambiador:** A text input field containing 'N/A'.
- Buttons:** 'Calcular', 'Añadir', and 'Finalizar'.



En cuanto a materiales, se tendrá la posibilidad de elegir entre:

- Carcasa y tubos de acero al carbono
- Carcasa de acero al carbono y tubos de acero inoxidable
- Carcasa y tubos de acero inoxidable
- Carcasa y tubos de cobre

Para el caso de doble tubo y multitubo, se podría tomar el interior del tubo y el exterior de diferentes materiales. En tal caso escójase la combinación de materiales que se desee de la lista, es independiente si el acero inoxidable va por fuera o por dentro en el caso de acero al carbono / acero inoxidable.

Tabla 3-4. Coeficientes para el cálculo de  $F_M$  en intercambiador

Tipo de intercambiador	AC - AC	AC - AI	AI - AI	Cu - Cu
<b>Doble Tubo</b>	1.00	1.81	2.73	1.69
<b>Multitubo</b>	1.00	1.81	2.73	1.69
<b>Cabezal Fijo, o tubos en U</b>	1.00	1.81	2.73	1.69
<b>Cabezal Flotante</b>	1.00	1.81	2.73	1.69

Para el cálculo del factor corrector de presión, se hará uso de la siguiente expresión:

$$\log_{10} F_p = C_1 + C_2 \log_{10}(p) + C_3 \log_{10}(p)^2 \quad (3.6)$$

Tabla 3-5. Coeficientes para el cálculo de  $F_p$  en intercambiadores

Tipo de intercambiador	presión (barg)	$C_1$	$C_2$	$C_3$
<b>Doble Tubo/ Multitubo</b>	100<p<300	13.1467	-12.6574	3.0705
	40<p<100	0.6072	-0.912	0.3327
	p<40	0	0	0
<b>Cabezal Fijo, o tubos en U, cabezal flotante</b>	5<p<140	0.03881	-0.11272	0.08183
	p<5	0	0	0

De tal manera, cuando se tengan presiones bajas, los coeficientes  $C_i$  valen cero, lo que significa que el factor  $F_p$  es 1, es decir, no hace falta corregir por presión. A medida que esta aumenta, el factor  $F_p$  comienza a mostrar más importancia.

Cabe resaltar, al igual que puntualizó Turton [8] acertadamente, que pese a que existe esta corrección por presión, las diferencias en el coste final no se ven dramáticamente afectadas como puede suceder con otros equipos como los depósitos presurizados. Esto se debe a que hasta el más fino de los tubos de los intercambiadores puede soportar presiones bastante superiores a la atmosférica, lo que resulta en que el factor  $F_p$  no tenga gran influencia en el coste final.

El coste del módulo tendrá la forma de la ecuación (3.3) con los siguientes valores:

Tabla 3-6. Coeficientes para cálculo de  $C_{BM}$  en intercambiador

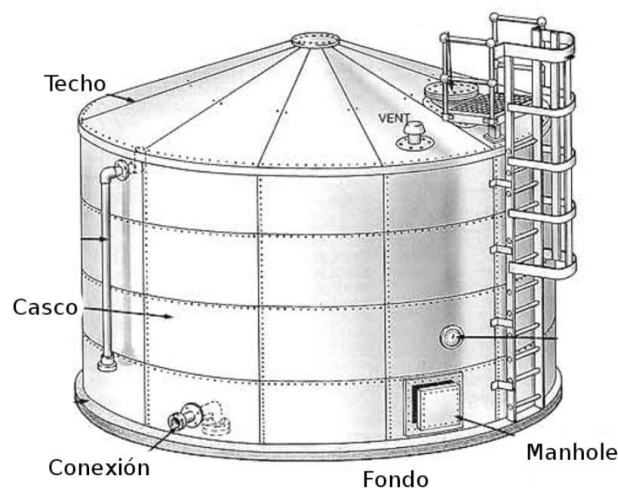
Tipo de intercambiador	$B_1$	$B_2$
<b>Doble Tubo/ Multitubo</b>	1.74	1.55
<b>Cabezal Fijo, o tubos en U, cabezal flotante</b>	1.63	1.66

Una vez obtenido el coste del módulo en 2001, se corrige por inflación con la ecuación (2.7).

### 3.4.3 Tanque de almacenamiento

Los tanques de almacenamiento son recipientes diseñados para almacenar los líquidos o gases que forman parte del proceso. Se suelen diseñar según la norma del Instituto Americano de Petróleo API 650. Tienen tamaños diversos y se suelen construir dentro de estructuras contenedoras en caso de falla o ruptura. Multitud de industrias lo usan: petroquímica, refinerías, química, etc. Puede ser de techo fijo, el más económico, donde se cierra la estructura metálica con un techo plano o cónico, o flotante, cuya parte superior queda como indica su nombre flotando sobre el líquido, reduciendo el volumen de gases así como sus fugas [19].

Figura 3-7. Diseño de un tanque según norma API-650



Para el tanque de almacenamiento se pide la construcción del techo, fija o flotante, así como el volumen del tanque en metros cúbicos.

Figura 3-8. Interfaz del tanque

Como de costumbre, se calculan los coeficientes del coste de adquisición.

Tabla 3-7. Coeficientes para el cálculo  $C_p^0$  del tanque

Tipo de Tanque	$K_1$	$K_2$	$K_3$
Techo Fijo	4.8509	-0.3973	0.1445
Techo Flotante	5.9567	-0.7585	0.1749

El parámetro característico del tanque es el volumen. Con este y los coeficientes obtenidos resolvemos la ecuación (3.1).

Para los tanques de almacenamiento no se dispondrá de corrección por presión ya que o son atmosféricos o tendrán una presión ligeramente por encima de la atmosférica. El coeficiente  $B_1$  será 1.1; lo que resulta en multiplicar el coste de adquisición por ese valor para obtener el coste del módulo.

$$C_{BM} = 1.1C_p^0 \quad (3.7)$$

Este valor debe ser corregido a fecha presente con la ecuación (2.7).

### 3.4.4 Turbina

Como se insinuó en el apartado del compresor, la turbina es una máquina motora, la cual genera potencia debido al cambio de densidad que tiene el fluido a su paso. Las hay de vapor, donde es vapor de agua el fluido de trabajo, y de gas, donde no se espera un posible cambio de fase. Según la dirección del flujo con respecto al eje de rotación de la máquina, podemos hablar de turbinas axiales, donde las partículas se mueven en superficies cilíndricas coaxiales con el eje de la máquina, o radiales, donde el fluido es en este caso radial al eje de rotación [16].

Figura 3-9. Turbina de vapor de Siemens

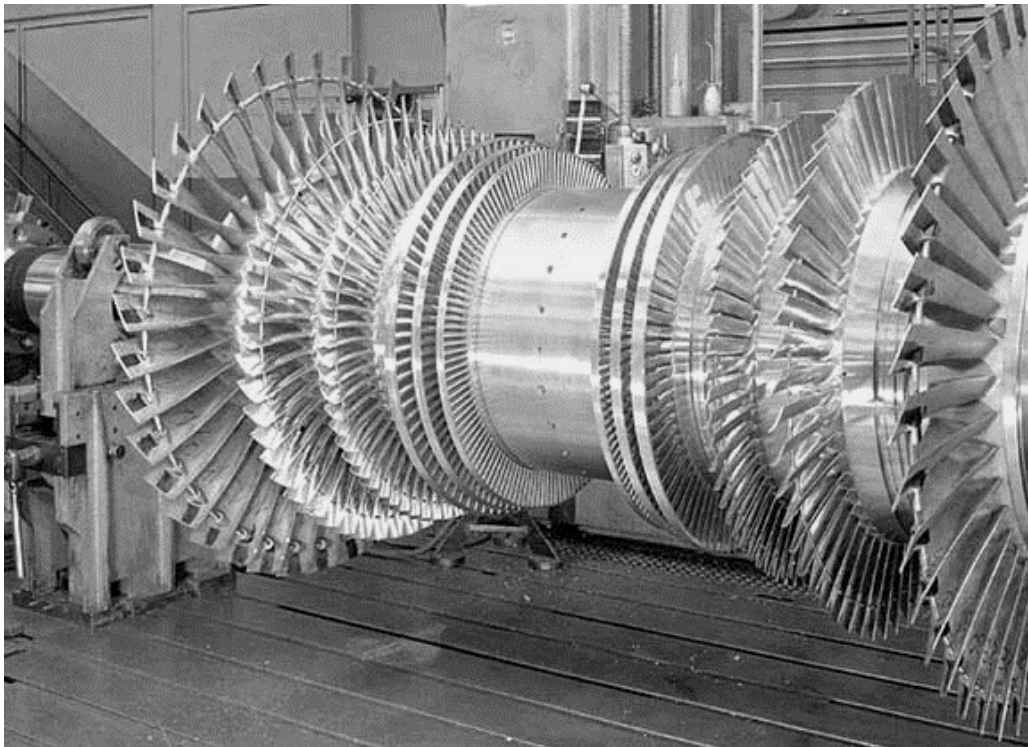


Figura 3-10. Interfaz de la turbina

El cálculo de la turbina es similar al del compresor. Se calculan los costes de adquisición de la turbina con la ecuación (3.1). El parámetro característico que se pide es la potencia de la turbina en kilovatios.

Tabla 3-8. Coeficientes para el calculo  $C_p^0$  de la turbina

Tipo de Turbina	$K_1$	$K_2$	$K_3$
<b>Axial</b>	2.7051	1.4398	-0.1776
<b>Radial</b>	2.2476	1.4965	-0.1618

Tabla 3-9. Coeficientes para el cálculo de  $F_{BM}$  de la turbina

Tipo de Turbina	$F_{BMAC}$	$F_{BMAI}$	$F_{BMAle.Esp.}$
<b>Axial</b>	3.5	6.13	11.66
<b>Radial</b>	3.5	6.13	11.66

Como en el caso del compresor, para la turbina no existe coeficiente de presión por falta de datos del estudio que desarrolló los coeficientes. Se procede por tanto al cálculo del coste del módulo total introduciendo  $F_{BM}$  y el coste de adquisición en la ecuación (2.6) y se actualiza con el CEPCI en la ecuación (2.7).

### 3.4.5 Bomba

La bomba es el equipo encargado de suministrar energía al fluido en un sistema hidráulico, moviéndolo de zona de baja presión a zona de alta presión [20].

Figura 3-11. Bomba centrífuga industrial



Para el coste de adquisición de la bomba se precisa de su potencia, al igual que en el caso del compresor y la turbina.

Tabla 3-10. Coeficientes para el cálculo  $C_p^0$  de la bomba

Tipo de Bomba	$K_1$	$K_2$	$K_3$
Centrífuga	3.3892	0.0536	0.1538
Desplazamiento positivo	3.4771	0.1350	0.14380
Alternativa	3.8696	0.3161	0.12200

Hallado el coste de adquisición en condiciones estándar con la ecuación (3.1), se elige el factor por material conforme al deseado y se calcula el factor de presión con la misma ecuación que para el intercambiador (3.6).

Tabla 3-11. Coeficientes para el cálculo de  $F_{BM}$  de la bomba

Tipo de Bomba	$F_{BMAC}$	$F_{BMAI}$	$F_{BMAle.Esp.}$
<b>Centrífuga</b>	1.55	2.28	4.36
<b>Desplazamiento positivo</b>	1.41	2.67	4.74
<b>Alternativa</b>	1.46	2.35	3.95

Tabla 3-12. Coeficientes para el cálculo de  $F_p$  en la bomba

Tipo de Bomba	$C_1$	$C_2$	$C_3$
<b>Centrífuga</b>	-0.3935	0.3957	-0.00226
<b>Desplazamiento positivo</b>	-0.24538	0.259016	-0.01363
<b>Alternativa</b>	-0.2454	0.2590	-0.0136

Teniendo el coste de adquisición, y los factores correctores, sabiendo que la ecuación que los relaciona con el coste del módulo es la (3.3), teniendo:

$$B_1=1.89 ; B_2=1.35$$

Se calcula el coste de módulo y se actualiza a la fecha presente con el CEPCI en la ecuación (2.7).

### 3.4.6 Depósito presurizado

Los recipientes presurizados mantienen su contenido en unas condiciones de presión y temperatura establecidas. Se usan tanto para almacenar como para operaciones de separación.

En la estimación del depósito presurizado, la estimación del coste de adquisición se realiza de manera análoga a los equipos anteriores. Se acudirá a la ecuación (3.1) con el volumen del depósito, que lo calculará el programa a partir de los datos que aporta el usuario de diámetro y longitud ambos en metros, y con los siguientes coeficientes:

Tabla 3-13. Coeficientes para el calculo  $C_p^0$  del depósito

Tipo de Depósito	$K_1$	$K_2$	$K_3$
Horizontal	3.5565	0.3776	0.0905
Vertical	3.4974	0.4485	0.1074

En el caso del depósito, la presión juega un papel importante en su estimación ya que el equipo está diseñado para soportar las tensiones que generen los gradientes de presiones del fluido en su interior. A mayor presión , más material será necesario para su construcción.

$$F_p = \frac{\frac{p \cdot D}{2(850 - 0.6p)} + 0.00315}{0.0063} \quad (3.8)$$

Donde:

$F_p$  es el factor corrector de presión

p es la presión del depósito en bares manométricos

D es el diámetro del depósito

Esta fórmula surge del código ASME para el diseño de depósitos a presión [21]. De esta manera, se tiene en cuenta una presión máxima para el acero al carbono de 944 bares, un grosor mínimo del depósito de 0.0063 metros, una eficiencia de las soldaduras de 0.9, y una corrosión admisible de 0.00315, siendo este el estimado que se perderá en el ciclo de vida del equipo.

Turton [8] establece que para valores obtenidos de  $F_p$  menores de 1,  $F_p = 1$ .

Para presiones menores de 0.5 bares manométricos,  $F_p=1.25$ .

Tabla 3-14. Coeficientes para el cálculo de  $F_p$  en el depósito

$F_{BMAC}$	1
$F_{BMAI}$	3.1
$F_{BMAle.Esp.}$	7.1
$F_{BMTi}$	9.4

Con los factores de corrección calculados, utilizamos la ecuación (3.3), teniendo:



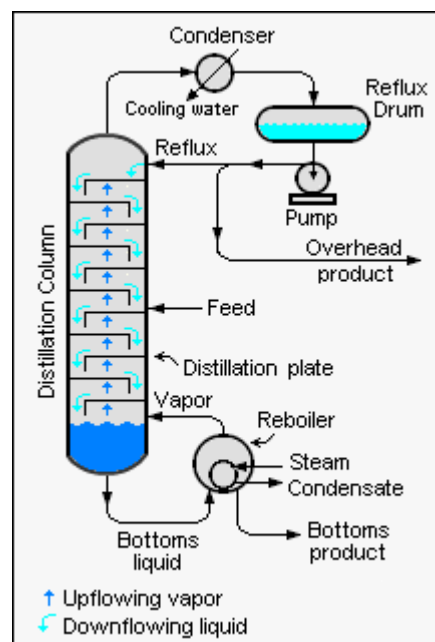
Tipo de Depósito	$B_1$	$B_2$
Horizontal	1.49	1.52
Vertical	2.25	1.82

Por último, se ajusta por inflación con la ecuación (2.7) y el CEPCI del año en curso.

### 3.4.7 Columna de destilación

La columna de destilación es esencialmente un depósito vertical donde se separan diferentes fases del fluido que se introduce. En su interior se instalan bandejas o elementos que aumentan el área de transferencia y mejoran la separación.

Figura 3-12. Esquema de funcionamiento de una columna



Por ello, el cálculo de las columnas constará de dos partes. Una primera que será *idem* de la estimación correspondiente a un depósito presurizado vertical. Posteriormente, se estiman los costes de los platos que se introducen. Para evitar caer en reiteración, se remite al lector a revisar el subepígrafe anterior para la parte del cuerpo de la columna, el depósito.

En cuanto a los platos, se disponen de dos tipos, de malla y de válvula. El programa pide el tipo de platos, el número de platos y su material: acero al carbono, acero inoxidable y aleación de níquel.

$$C_{BM} = C_p N F_{BM} F_q \quad (3.9)$$

Donde:

$C_{BM}$  es el coste total de los platos

$C_p$  es el coste de adquisición de los platos

$F_{BM}$  es el factor corrector de material

$F_q$  es un factor de cantidad de platos

Para calcular el coste de adquisición de los platos, utilizamos la fórmula (3.1) con parámetro característico el área de los platos, que se obtendrá a partir del diámetro de la columna.

$$A_{platos} = \frac{\pi D^2}{4} \quad (3.10)$$

Donde D es el diámetro de la columna introducido por el usuario.

El factor  $F_q$  valdrá 1 para un numero de platos mayor o igual a 20.

Si es menor:

$$\log_{10} F_q = 0.4771 + 0.08516 \log_{10}(N) - 0.3473 \log_{10}(N)^2 \quad (3.11)$$

Con el coste total calculado, el coste de la columna será:

$$C_{columna} = C_{columna} + C_{platos} \quad (3.12)$$

### 3.4.8 Límites de las estimaciones

Es de necesario apunte en este trabajo el denotar que estos factores se consideran de validez dentro de un rango de uso determinado. Turton [8] aporta estas cotas de funcionamiento:

Tabla 3-15. Límites de aplicación

<b><u>Tipo de equipo</u></b>	<b>Parámetro</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
<b>Comp. Centrífugo</b>	Potencia (kW)	450	3000
<b>Comp. Axial</b>	Potencia (kW)	450	3000

<b>Comp. Tornillo</b>	Potencia (kW)	18	950
<b>Comp. Alternativo</b>	Potencia (kW)	450	3000
<b>HEX Doble tubo</b>	Área ( $m^2$ )	1	10
<b>HEX Multitubo</b>	Área ( $m^2$ )	10	100
<b>HEX Cab. flotante</b>	Área ( $m^2$ )	10	1000
<b>HEX Cab. fijo</b>	Área ( $m^2$ )	10	1000
<b>Tanque techo fijo</b>	Volumen ( $m^3$ )	90	30000
<b>Tanque techo flotante</b>	Volumen ( $m^3$ )	1000	40000
<b>Turbina axial</b>	Potencia (kW)	100	4000
<b>Turbina radial</b>	Potencia (kW)	100	1500
<b>Bomba centrífuga</b>	Potencia (kW)	0.1	200
<b>Bomba desp. Pos.</b>	Potencia (kW)	1	100
<b>Bomba alternativa</b>	Potencia (kW)	1	300
<b>Dep. Horizontal</b>	Volumen ( $m^3$ )	0.1	628
<b>Dep. Vertical</b>	Volumen ( $m^3$ )	0.3	520
<b>Columnas</b>	Volumen ( $m^3$ )	0.3	520

Esto por supuesto no implica que no se puedan utilizar fuera de estos rangos, es por ello por lo que no se ha limitado tampoco en la herramienta informática. Pese a todo, el usuario deberá conocer estos límites y proceder con cautela si decide aún con todo estimar equipos fuera del rango establecido.



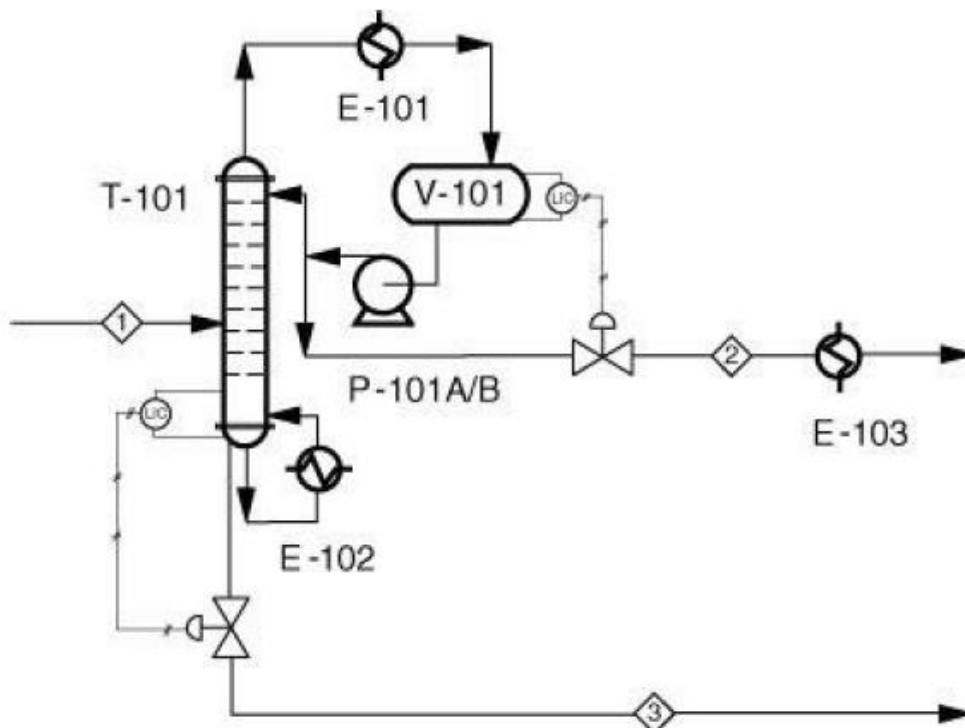
## 4 EJEMPLO DE ESTIMACIÓN

Tras el repaso de todo el entramado teórico sobre la estimación de costes y cómo se ha aplicado en el desarrollo de una herramienta informática en Python, conviene llevar a la práctica con un ejemplo para ver cómo funciona realmente la aplicación.

Al igual que ha servido de cimiento y guía en la realización de este trabajo académico, se acudirá al previamente utilizado libro *Analysis, Synthesis and Design of Chemical Processes* [8] para tomar el ejemplo 7.14, que nos brinda un diagrama del proceso de partida que facilitará la labor de ilustrar esta ejemplificación.

El diagrama en cuestión es este:

Figura 4-1. Diagrama del proceso de una planta química



Fuente: *Analysis, synthesis and design of chemical processes*, 2009

Como vemos, consiste en un proceso relativamente sencillo de separación, donde tendremos un fluido que se introduce en una columna de destilación (T-101). La fase gaseosa pasa por un condensador (E-101) y se almacena en un tanque horizontal (V-101). La fase líquida se vuelve a hervir en un rehervidor que recupera el condensado (E-102), el cual vuelve a introducirse en la columna. Se incluyen además dos bombas que llevan el líquido del tanque a la columna y un intercambiador de doble tubo (E-103) que enfría el producto final de la línea 2.

Tabla 4-1. Datos de los Equipos del proceso

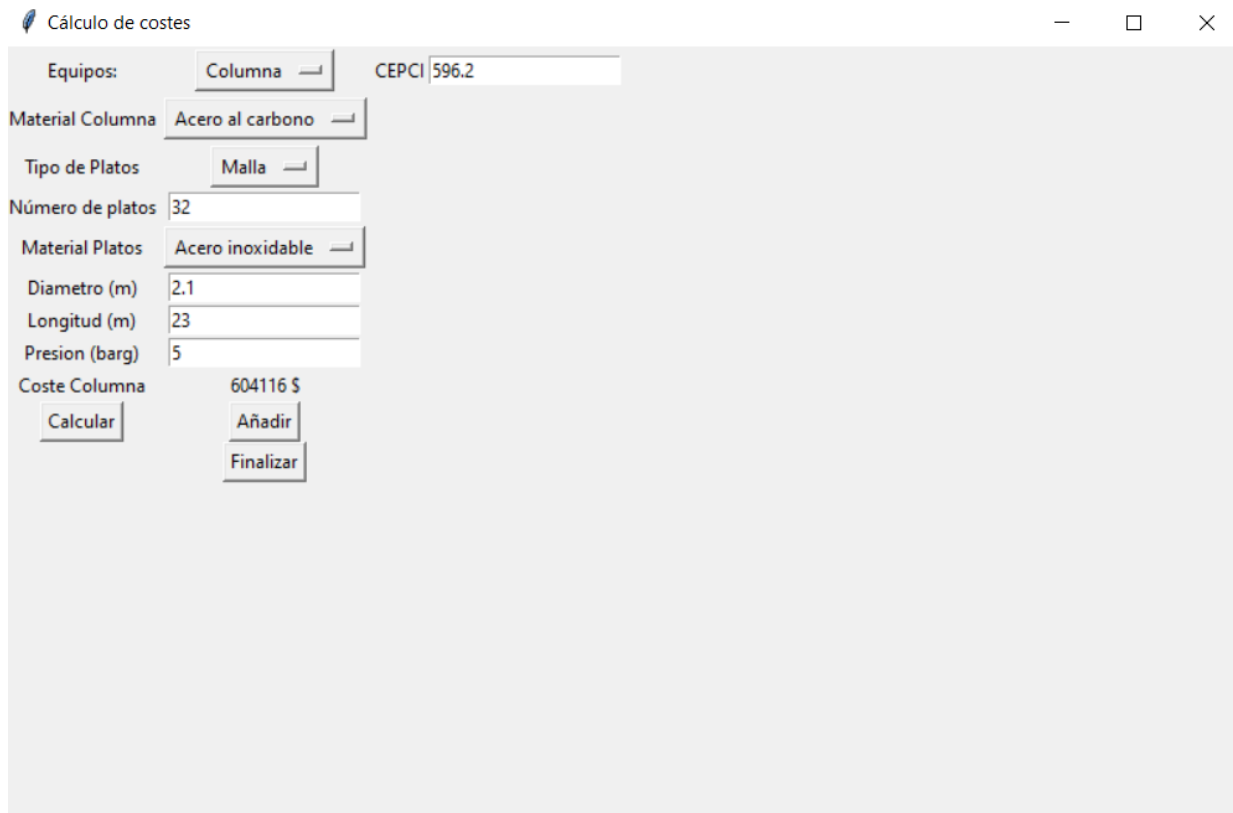
<b>Equipo</b>	<b>Número de identificación</b>	<b>Parámetros característicos</b>	<b>Material de Construcción</b>	<b>Presión de trabajo (bar manométrico)</b>
<b>Columna de Destilación</b>	T-101	Diámetro = 2.1 m Altura = 23 m 32 platos de malla	Acero al Carbono Platos de Acero Inoxidable	5 bares
<b>Condensador (intercambiador carcasa y tubo cabezal flotante)</b>	E-101	$A = 170 \text{ m}^2$	Acero al Carbono	5 bares
<b>Rehervidor (intercambiador carcasa y tubo cabezal flotante)</b>	E-102	$A = 205 \text{ m}^2$	Acero al carbono Tubos de Acero Inoxidable	18 bares
<b>Enfriador del producto (intercambiador de doble tubo)</b>	E-103	$A = 10 \text{ m}^2$	Acero al carbono interior y exterior	5 bares
<b>2 Bombas centrífugas</b>	P-101	5 kW	Acero al carbono	5 bares en descarga
<b>Acumulador (tanque horizontal)</b>	V-101	Diámetro = 1.8 m Longitud = 6 m	Acero al carbono	5 bares

Aquí se puede apreciar lo que se ha intentado plasmar a lo largo de esta obra. Lo único que necesitará el ingeniero conocer para su estimación es el diagrama del proceso en cuestión y el dimensionamiento de los equipos a instalar. Se procede ahora a introducir los datos en el programa.

Se utilizará un valor de CEPCI de 596,2 correspondiente al año 2020 para capitalizar a fecha presente. Se introducen los datos de la tabla Tabla 4-1. Datos de los Equipos del proceso y se pulsa añadir, de

manera que se almacene en la memoria del programa.

Figura 4-2. Cálculo de la columna T-101



The screenshot shows a software window titled "Cálculo de costes" with standard window controls (minimize, maximize, close) in the top right corner. The interface is organized into several sections:

- Equipos:** A dropdown menu set to "Columna" and a text input field for "CEPCI" containing the value "596.2".
- Material Columna:** A dropdown menu set to "Acero al carbono".
- Tipo de Platos:** A dropdown menu set to "Malla".
- Número de platos:** A text input field containing the value "32".
- Material Platos:** A dropdown menu set to "Acero inoxidable".
- Diametro (m):** A text input field containing the value "2.1".
- Longitud (m):** A text input field containing the value "23".
- Presion (barg):** A text input field containing the value "5".
- Coste Columna:** A text input field displaying the calculated cost "604116 \$".
- Buttons:** Three buttons are located at the bottom: "Calcular" (on the left), "Añadir" (in the center), and "Finalizar" (on the right).

Figura 4-3. Cálculo del intercambiador E-101

Calculo de costes

Equipos: Intercambiador de calor CEPCI 596.2

Tipo intercambiador: Cabezal flotante

Material Carcasa/Tubo: Acero al carbono / Acero al carbono

Area (m2): 170

Presion (barg): 5

Coste intercambiador: 162930 \$

Calcular Añadir Finalizar

Figura 4-4. Cálculo del intercambiador E-102

Calculo de costes

Equipos: Intercambiador de calor CEPCI 596.2

Tipo intercambiador: Cabezal flotante

Material Carcasa/Tubo: Acero al carbono / Acero inoxidable

Area (m2): 205

Presion (barg): 18

Coste intercambiador: 267014 \$

Calcular Añadir Finalizar



Figura 4-5. Cálculo del intercambiador E-103

Calculo de costes

Equipos: Intercambiador de calor CEPCI 596.2

Tipo intercambiador: Doble tubo

Material Carcasa/Tubo: Acero al carbono / Acero al carbono

Area (m2): 10

Presion (barg): 5

Coste intercambiador: 18427 \$

Calcular Añadir Finalizar

Figura 4-6. Cálculo de las bombas P-101

Calculo de costes

Equipos: Bomba CEPCI 596.2

Tipo Bomba: Centrifuga

Material Bomba: Acero al carbono

Potencia (kW): 5

Presion (barg): 5

Coste Bomba: 18988 \$

Calcular Añadir Finalizar

Figura 4-7. Cálculo del tanque V-101

Cálculo de costes

Equipos: Depósito Presurizado CEPCI 596.2

Tipo Depósito presurizado Horizontal

Material Depósito Acero al carbono

Diametro (m) 1.8

Longitud (m) 6

Presion (barg) 5

Coste depósito 71579 \$

Calcular Añadir Finalizar

Una vez finalizado el proceso de adición de equipos, pulsamos finalizar para obtener el coste total.

Figura 4-8. Cálculo final del proceso

Equipos	Coste base	Cost total
Columna	\$442268	\$604116
Intercambiador	\$162930	\$162930
Intercambiador	\$182187	\$267014
Intercambiador	\$18427	\$18427
Bomba	\$15448	\$18988
Bomba	\$15448	\$18988
Vessel	\$61003	\$71579
<b>Coste Total</b>	<b>\$897711</b>	<b>\$1162042</b>
-----		
Coste Ampliación	\$1371209	
<b>Coste Planta Greenfield</b>	<b>\$1820065</b>	

El programa nos ofrece los siguientes resultados

- Coste total de los módulos ----- \$1.162.042
- Coste si el proceso fuera una ampliación -----\$1.371.209
- Coste para planta de nueva construcción -----**\$1.820.065**

Al cambio a día 3/07/2021 el coste de la planta supondría **1.534.624,79 €** [22].



## 5 CONCLUSIONES

---

En este trabajo se hace un avance en lo que se refiere a automatización de cálculo de costes en plantas industriales, consiguiendo mecanizar algunas de las estimaciones que el ingeniero debiere realizar a mano. Se ha utilizado el método de costes de módulos, donde se estima el coste de adquisición de los equipos de la planta, y, por medio de factores desarrollados a partir de un estudio a empresas manufactureras, se relaciona con el coste total de los equipos, incluyendo montaje, mano de obra, etc. Se han expuesto además otros métodos de estimación existentes, analizando sus virtudes y defectos. También se ha realizado un ejemplo de muestra de un cálculo de una planta, que bien podría ser un caso real, ilustrando la eficacia de la aplicación una vez se dispone del diagrama de flujo de la planta.

El programa consigue cumplir los objetivos para los que se diseñó: dar una estimación con una precisión de al menos el orden de magnitud, de manera que se puede empezar a trabajar sobre una base en cuanto a la estimación de costes y análisis de viabilidad se refiere.

Como se han comentado, existen numerosos métodos para realizar las estimaciones. En este trabajo se ha elegido el que se consideraba el más adecuado a la clase de estimación que se perseguía. Queda abierta la posibilidad de realizar mejoras y ampliaciones a lo desarrollado hasta ahora. Desde aquí se proponen varias propuestas susceptibles de ser consideradas.

Pese a haber incluido varios de los equipos más frecuentemente encontrados en procesos de índole químico-industrial, es un hecho que las posibles combinaciones de tipología y características de los equipos son incontables. Teniendo esto en cuenta, y persiguiendo un uso real de la aplicación, sería un gran aporte el añadir la posibilidad de que el usuario creara su propio equipo, definiendo sus particularidades y configurándolo a su gusto. Esto sin duda abriría camino al uso extensivo en aplicaciones industriales.

Otra adición posible sería el guardar un histórico de las estimaciones realizadas, de manera que el usuario pueda tener acceso a análisis previos y modificarlos si fuese necesario.

También se pueden aplicar desgloses de partidas, de manera que el resultado final del coste de la planta se pudiera dividir en sus diferentes composiciones: equipos, instalación, tuberías...

Por último, puede ser interesante combinar el presente trabajo con uno que haga uso de este para una estimación de rentabilidades utilizando métodos usuales como el VAN o el TIR, extendiendo el alcance del programa.



# ANEXO A CÓDIGO FUENTE

---

```
# ## Librerías y ecuaciones principales

import tkinter
import math

def show_widget(widget, r, c):
    # Pone los widgets en pantalla
    widget.grid(row=r, column=c)

def hide_all(widgets):
    for widget in widgets:
        widget.grid_remove()

# Las tres ecuaciones de Bare Module Cost
def equ1(k1, k2, k3, A, cepci):
    p1 = k1
    p2 = k2*math.log10(A)
    p3 = k3*pow(math.log10(A),2)
    return pow(10, p1 + p2 + p3) * cepci/397

def equ2(c1, c2, c3, A):
    p1 = c1
    p2 = c2*math.log10(A)
    p3 = c3*pow(math.log10(A),2)
    return pow(10, p1 + p2 + p3)

def equ3(p,d):
    return ((p*d)/(2*(850-0.6*p))+0.00315)/0.0063

# ## Ventana Principal

calc = tkinter.Tk()
calc.geometry("800x500") # Tamaño de la pantalla
calc.title("Cálculo de costes")
scroll = tkinter.Scrollbar (calc)

widgets = []

equipos_label = tkinter.Label(calc,text='Equipos:')
equipos_label.grid(row=1,column=1)
```

```

equipos_lista = ["Compresor", "Intercambiador de
calor", "Tanque", "Turbina", "Bomba", "Depósito Presurizado",
"Columna"]
equipos_opciones = tkinter.StringVar()
equipos_opciones.set("Seleccionar equipo") # Valor por defecto
equipos_dd =tkinter.OptionMenu(calc, equipos_opciones,
*equipos_lista)
equipos_dd.grid(row=1,column=2)

##CEPCI
cepci_var    = tkinter.StringVar()
cepci_label = tkinter.Label(calc, text='CEPCI')
cepci       = tkinter.Entry(calc, textvariable = cepci_var)
cepci_var.set("")

cepci_label.grid(row=1,column=3)
cepci.grid(row=1,column=4)

carro = []

def finalizar_fun():
    #Quitar todos los widgets
    equipos_label.grid_remove()
    equipos_dd.grid_remove()
    cepci_label.grid_remove()
    cepci.grid_remove()
    boton_finalizar.grid_remove()
    hide_all(widgets)

    #Introduce el menú finalizar
    ##Títulos
    tkinter.Label(calc, text = "Equipos").grid(row =
1,column=1)
    tkinter.Label(calc, text = "Coste base").grid(row =
1,column=2)
    tkinter.Label(calc, text = "Cost total").grid(row =
1,column=3)

    row = 2
    suma_coste = 0
    suma_cop = 0
    for item in carro:

        tkinter.Label(calc, text = str(item[0])).grid(row =
row,column=1)
        #escribe Coste en condiciones estándar
        tkinter.Label(calc, text = "$" + str(item[1])).grid(row
= row,column=2)
        #escribe Coste Total

```



```

tkinter.Label(calc, text = "$" + str(item[2])).grid(row
= row, column=3)

suma_cop    = suma_cop  + item[1]
suma_coste  = suma_coste + item[2]
row         = row + 1

total_label    = tkinter.Label(calc, text="Coste
Total").grid(row=row, column=1)
total_sumabase = tkinter.Label(calc, text= "$" +
str(suma_cop)).grid(row=row, column=2)
total_suma     = tkinter.Label(calc, text= "$" +
str(suma_coste)).grid(row=row, column=3)

coste_ampliacion = int(1.18 * suma_coste)
coste_planta_v   = int(1.18 * suma_coste + 0.5 * suma_cop)
tkinter.Label(calc, text="-----
").grid(row=row+1, column=1)
tkinter.Label(calc, text="Coste Ampliación").grid(row=row+2,
column=1)
tkinter.Label(calc, text="$" +
str(coste_ampliacion)).grid(row=row+2, column=2)
tkinter.Label(calc, text="Coste Planta
Greenfield").grid(row=row+3, column=1)
tkinter.Label(calc, text="$" +
str(coste_planta_v)).grid(row=row+3, column=2)
##Finalizar
boton_finalizar = tkinter.Button(calc, text = "Finalizar",
command = finalizar_fun)
boton_finalizar.grid(row=11, column=2)

# ## UI Compresor

##Tipo compresor
compresor_tipo_label = tkinter.Label(calc, text='Tipo
compresor')
compresor_tipo_lista = ["Centrifugo", "Axial", "de
Tornillo", "Alternativo"]
compresor_tipo_opciones = tkinter.StringVar()
compresor_tipo_dd      = tkinter.OptionMenu(calc,
compresor_tipo_opciones, *compresor_tipo_lista)
compresor_tipo_opciones.set("Seleccionar") # Valor por defecto

##Compresor Material
compresor_material_label = tkinter.Label(calc, text='Material
del compresor')
compresor_material_lista = ["Acero al carbono", "Acero
inoxidable", "Aceros aleados especiales"]
compresor_material_opciones = tkinter.StringVar()

```

```

compresor_material_dd = tkinter.OptionMenu(calc,
compresor_material_opciones, *compresor_material_lista)
compresor_material_opciones.set("Seleccionar") # Valor por
defecto

##Potencia compresor
compresor_pwr_var = tkinter.StringVar()
compresor_pwr_label = tkinter.Label(calc,text='Potencia (kW)')
compresor_pwr = tkinter.Entry(calc,textvariable =
compresor_pwr_var)
compresor_pwr_var.set("")

##Coste compresor
compresor_coste_label = tkinter.Label(calc,text='Coste
compresor')
compresor_coste = tkinter.Label(calc,text="N/A")

##Funcion de cálculo de compresor

def calc_coste_compresor():
    potencia = -1
    try:
        if(compresor_pwr.get() == "" or cepci.get()==""):
            compresor_coste["text"] = "Entrada incompleta"
            return
        potencia = float(compresor_pwr.get())
        cepci_v = float(cepci.get())

    except:
        compresor_coste["text"] = "Entrada incorrecta"

    if(compresor_material_opciones.get()!="Seleccionar" and
compresor_tipo_opciones!="Seleccionar"):
        #ECUACION 1
        k1 = -1
        k2 = -1
        k3 = -1
        fm = -1
        if(compresor_tipo_opciones.get() == "Centrifugo"):
            k1 = 2.2891
            k2 = 1.3604
            k3 = -0.1027

            if(compresor_material_opciones.get() == "Acero al
carbono"):
                fm = 2.74
            if(compresor_material_opciones.get() == "Acero
inoxidable"):
                fm = 5.75
            if(compresor_material_opciones.get() == "Aceros
aleados especiales"):
                fm = 11.45

```

```

        if(compresor_tipo_opciones.get() == "Axial"):
            k1 = 2.2891
            k2 = 1.3604
            k3 = -0.1027
            if(compresor_material_opciones.get() == "Acero al
carbono"):
                fm = 3.83
            if(compresor_material_opciones.get() == "Acero
inoxidable"):
                fm = 8.04
            if(compresor_material_opciones.get() == "Aceros
aleados especiales"):
                fm = 15.92

        if(compresor_tipo_opciones.get() == "de Tornillo"):
            k1 = 5.0355
            k2 = -1.8002
            k3 = 0.8253
            if(compresor_material_opciones.get() == "Acero al
carbono"):
                fm = 2.4
            if(compresor_material_opciones.get() == "Acero
inoxidable"):
                fm = 5.0
            if(compresor_material_opciones.get() == "Aceros
aleados especiales"):
                fm = 9.8

        if(compresor_tipo_opciones.get() == "Alternativo"):
            k1 = 2.2891
            k2 = 1.3604
            k3 = -0.1027
            if(compresor_material_opciones.get() == "Acero al
carbono"):
                fm = 3.4
            if(compresor_material_opciones.get() == "Acero
inoxidable"):
                fm = 7.0
            if(compresor_material_opciones.get() == "Aceros
aleados especiales"):
                fm = 13.9

        cop = int(equ1(k1,k2,k3,potencia,cepci_v))
        coste = int( cop * fm )
        compresor_coste["text"] = coste, "$"
        return cop , coste
    else:
        compresor_coste["text"] = "Entrada incompleta"

def anadir_compresor():

```

```

        cop , coste = calc_coste_compresor ()
        carro.append(["Compresor", cop,  coste])

    boton_calc_compresor      = tkinter.Button(calc, text =
"Calcular", command = calc_coste_compresor)
    boton_anadir_compresor    = tkinter.Button(calc, text =
"Añadir", command = anadir_compresor)
    ##Anadir a lista de widgets
    widgets.append(compresor_tipo_label)
    widgets.append(compresor_tipo_dd)
    widgets.append(compresor_material_label)
    widgets.append(compresor_material_dd)
    widgets.append(compresor_coste_label)
    widgets.append(compresor_coste)
    widgets.append(compresor_pwr_label)
    widgets.append(compresor_pwr)
    widgets.append(boton_calc_compresor)
    widgets.append(boton_anadir_compresor)

# ## UI Tanque

##Tipo tanque
tank_tipo_label      = tkinter.Label(calc,text='Tipo tanque')
tank_tipo_lista      = ["Techo Flotante","Techo Fijo"]
tank_tipo_opciones   = tkinter.StringVar()
tank_tipo_dd         = tkinter.OptionMenu(calc,
tank_tipo_opciones, *tank_tipo_lista)
    tank_tipo_opciones.set("Seleccionar") # Valor por defecto

##Tamaño tanque
tank_size_var        = tkinter.StringVar()
tank_size_label      = tkinter.Label(calc,text='Tamaño tanque (m3)')
tank_size            = tkinter.Entry(calc,textvariable =
tank_size_var)
    tank_size_var.set("")

##Coste tanque
tank_coste_label     = tkinter.Label(calc,text='Coste Tanque')
tank_coste           = tkinter.Label(calc,text="N/A")

##Calculo coste tanque
def calc_coste_tank():
    size = -1
    if(tank_size.get() == "" or cepci.get()==""):
        tank_coste["text"] = "Entrada incompleta"
        return

    try:
        cepci_v = float(cepci.get())

```

```
        size      = float(tank_size.get())
    except:
        tank_coste["text"] = "Entrada incorrecta"
#ECUACION 1
k1 = -1
k2 = -1
k3 = -1

if(tank_tipo_opciones.get() == "Techo Flotante"):
    k1 = 5.9567
    k2 = -0.7585
    k3 = 0.1749

elif(tank_tipo_opciones.get() == "Techo Fijo"):
    k1 = 4.8509
    k2 = -0.3973
    k3 = 0.1445

else:
    tank_cost["text"] = "Entrada incompleta"
    return
cop = int(equ1(k1,k2,k3,size,cepci_v))
coste =int(cop * 1.1)
tank_coste["text"] = coste, "$"
return cop, coste

def anadir_tank():
    cop , coste = calc_coste_tank ()
    carro.append(["Tanque", cop, coste])

    boton_calc_tank      = tkinter.Button(calc, text = "Calcular",
command = calc_coste_tank)
    boton_anadir_tank    = tkinter.Button(calc, text = "Añadir",
command = anadir_tank)

#Añadir a lista de widgets
widgets.append(tank_size_label)
widgets.append(tank_size)
widgets.append(tank_coste_label)
widgets.append(tank_coste)
widgets.append(boton_calc_tank)
widgets.append(tank_tipo_label)
widgets.append(tank_tipo_dd)
widgets.append(boton_anadir_tank)

# ## UI Intercambiador de calor
```

```

##Tipo intercambiador
hex_tipo_label = tkinter.Label(calc,text='Tipo
intercambiador')
hex_tipo_lista = ["Doble tubo","Multitubo","Cabezal fijo, o
tubo en U","Cabezal flotante"]
hex_tipo_opciones = tkinter.StringVar()
hex_tipo_dd = tkinter.OptionMenu(calc, hex_tipo_opciones,
*hex_tipo_lista)
hex_tipo_opciones.set("Seleccionar") # valor por defecto

##Area intercambiador
hex_area_var = tkinter.StringVar()
hex_area_label = tkinter.Label(calc,text='Area (m2)')
hex_area = tkinter.Entry(calc,textvariable =
hex_area_var)
hex_area_var.set("")

##Presion intercambiador
hex_presion_var = tkinter.StringVar()
hex_presion_label = tkinter.Label(calc,text='Presion (barg)')
hex_presion = tkinter.Entry(calc,textvariable =
hex_presion_var)
hex_presion_var.set("")

##Material carcasa/tubo
hex_material_label = tkinter.Label(calc,text='Material
Carcasa/Tubo')
hex_material_lista = ["Acero al carbono / Acero al
carbono","Acero al carbono / Acero inoxidable","Acero inoxidable
/ Acero inoxidable", "Cobre / Cobre"]
hex_material_opciones = tkinter.StringVar()
hex_material_dd = tkinter.OptionMenu(calc,
hex_material_opciones, *hex_material_lista)
hex_material_opciones.set("Seleccionar") # valor por defecto

##Material Tubos
#tubos_material_label = tkinter.Label(calc,text='Material
Tubos')
#tubos_material_list = ["Acero al carbono","Acero
inoxidable","Titanio", "Cobre"]
#tubos_material_opciones = tkinter.StringVar()
#tubos_material_dd = tkinter.OptionMenu(calc,
tubos_material_opciones, *tubos_material_list)
#tubos_material_opciones.set("Seleccionar") #valor por defecto

##Coste intercambiador
hex_coste_label = tkinter.Label(calc,text='Coste
intercambiador')
hex_coste = tkinter.Label(calc,text="N/A")

##funcion calculo intercambiador
def calc_coste_hex():

```

```
presion = -1
area     = -1
cepci_v  = -1
fbm      = -1

if(hex_material_opciones.get() == "Acero al carbono / Acero
al carbono"):
    fbm = 1
elif(hex_material_opciones.get() == "Acero al carbono /
Acero inoxidable"):
    fbm = 1.81
elif(hex_material_opciones.get() == "Acero inoxidable /
Acero inoxidable"):
    fbm = 2.73
elif(hex_material_opciones.get() == "Cobre / Cobre"):
    fbm = 1.69

if(hex_tipo_opciones.get()=="Seleccionar" or
cepci.get()==""):
    hex_coste["text"] = "Entrada Incompleta"
    return

area     = hex_area.get()
presion  = hex_presion.get()
if(area == "" or presion == ""):
    hex_coste["text"] = "Entrada Incompleta"
    return
try:
    area     = float(area)
    presion  = float(presion)
    cepci_v  = float(cepci.get())

except:
    hex_coste["text"] = "Entrada Incorrecta"
    return

k1 = -1
k2 = -1
k3 = -1
c1 = -1
c2 = -1
c3 = -1
b1 = -1
b2 = -1
fp = -1

if(hex_material_opciones.get()!="Seleccionar" and
hex_tipo_opciones!="Seleccionar"):
```

```
if(hex_tipo_opciones.get() == "Doble tubo"):
    k1 = 3.3444
    k2 = 0.2745
    k3 = -0.0472
    b1 = 1.74
    b2 = 1.55
    if(presion <= 40):
        c1 = 0
        c2 = 0
        c3 = 0
    elif (presion > 40 and presion < 100):
        c1 = 0.6072
        c2 = -0.912
        c3 = 0.3327
    else:
        c1 = 13.1467
        c2 = -12.6574
        c3 = 3.0705

if(hex_tipo_opciones.get() == "Multitubo"):
    k1 = 2.7652
    k2 = 0.7282
    k3 = 0.0783
    b1 = 1.74
    b2 = 1.55

    if(presion <= 40):
        c1 = 0
        c2 = 0
        c3 = 0

    elif (presion > 40 and presion < 100):
        c1 = 0.6072
        c2 = -0.912
        c3 = 0.3327
    else:
        c1 = 13.1467
        c2 = -12.6574
        c3 = 3.0705

if(hex_tipo_opciones.get() == "Cabezal fijo, o tubo en
U") :
    k1 = 4.3247
    k2 = -0.303
    k3 = 0.1634
    b1 = 1.63
    b2 = 1.66

    if(presion <= 5):
        c1 = 0
        c2 = 0
```



```

        c3 = 0

        elif (presion > 5 and presion < 140):
            c1 = 0.3881
            c2 = -0.11272
            c3 = 0.08183

    if(hex_tipo_opciones.get() == "Cabezal flotante"):
        k1 = 4.8306
        k2 = -0.8509
        k3 = 0.3187
        b1 = 1.63
        b2 = 1.66

        if(presion <= 5):
            c1 = 0
            c2 = 0
            c3 = 0

        elif (presion > 5 and presion < 140):
            c1 = 0.03881
            c2 = -0.11272
            c3 = 0.08183

    else:
        hex_coste["text"] = "Exceso de presión"

    cop    = int(equ1(k1,k2,k3,area,cepci_v))
    fp     = equ2 (c1,c2,c3,presion)
    coste_base = int(cop*(b1+b2*1*1))
    coste = int(cop*(b1+b2*fp*fbm))
    hex_coste["text"] = coste, "$"

else:
    hex_coste["text"] = "Entrada incompleta"

return coste_base, coste

def anadir_hex():
    cop , coste = calc_coste_hex ()
    carro.append(["Intercambiador", cop, coste])

    boton_calc_hex    = tkinter.Button(calc, text = "Calcular",
command = calc_coste_hex)
    boton_anadir_hex  = tkinter.Button(calc, text = "Añadir",
command = anadir_hex)

#Añadir a lista widgets
widgets.append(hex_tipo_label)
widgets.append(hex_tipo_dd)

```

```

widgets.append(hex_area_label)
widgets.append(hex_area)
widgets.append(hex_material_label)
widgets.append(hex_material_dd)
widgets.append(hex_presion_label)
widgets.append(hex_presion)
widgets.append(hex_coste_label)
widgets.append(hex_coste)
widgets.append(boton_calc_hex)
widgets.append(boton_anadir_hex)

# ## UI Turbina

##Tipo Turbina
turbina_tipo_label = tkinter.Label(calc,text='Tipo Turbina')
turbina_tipo_lista = ["Axial","Radial"]
turbina_tipo_opciones = tkinter.StringVar()
turbina_tipo_dd = tkinter.OptionMenu(calc,
turbina_tipo_opciones, *turbina_tipo_lista)
turbina_tipo_opciones.set("Seleccionar") # Valor por defecto

##Material turbina
turbina_material_label = tkinter.Label(calc,text='Material
Turbina')
turbina_material_lista = ["Acero al carbono","Acero
inoxidable","Aceros aleados especiales"]
turbina_material_opciones = tkinter.StringVar()
turbina_material_dd = tkinter.OptionMenu(calc,
turbina_material_opciones, *turbina_material_lista)
turbina_material_opciones.set("Seleccionar") # valor por
defecto

##Potencia Turbina
turbina_pwr_var = tkinter.StringVar()
turbina_pwr_label = tkinter.Label(calc,text='Potencia (kW)')
turbina_pwr = tkinter.Entry(calc,textvariable =
turbina_pwr_var)
turbina_pwr_var.set("")

##Coste Turbina
turbina_coste_label = tkinter.Label(calc,text='Coste Turbina')
turbina_coste = tkinter.Label(calc,text="N/A")

##funcion calculo turbina
def calc_coste_turbina():
    potencia = -1
    try:
        if(turbina_pwr.get() == "" or cepci.get() == ""):
            turbina_coste["text"] = "Entrada incompleta"
            return
        cepci_v = float(cepci.get())

```

```

    potencia    = float(turbina_pwr.get())
except:
    turbina_cost["text"] = "Entrada incorrecta"

    if(turbina_material_opciones.get()!="Seleccionar" and
turbina_tipo_opciones!="Seleccionar"):
        #ECUACION 1
        k1  = -1
        k2  = -1
        k3  = -1
        fbm = -1
        if(turbina_tipo_opciones.get() == "Axial"):
            k1 = 2.7051
            k2 = 1.4398
            k3 = -0.1776

            if(turbina_material_opciones.get() == "Acero al
carbono"):
                fbm = 3.5
            if(turbina_material_opciones.get() == "Acero
inoxidable"):
                fbm = 6.1
            if(turbina_material_opciones.get() == "Aceros
aleados especiales"):
                fbm = 11.7
        if(turbina_tipo_opciones.get() == "Radial"):
            k1 = 2.2476
            k2 = 1.4965
            k3 = -0.1618

            if(turbina_material_opciones.get() == "Acero al
carbono"):
                fbm = 3.5
            if(turbina_material_opciones.get() == "Acero
inoxidable"):
                fbm = 6.1
            if(turbina_material_opciones.get() == "Aceros
aleados especiales"):
                fbm = 11.7

        cop  = int(equ1(k1,k2,k3,potencia,cepci_v))
        coste = int(cop * fbm)

        turbina_coste["text"] = coste, "$"
        return cop, coste
else:
    turbina_coste["text"] = "Datos Incompletos"

def anadir_turbina():
    cop , coste = calc_coste_turbina ()
    carro.append(["Turbina", cop, coste])

```

```

    boton_calc_turbina      = tkinter.Button(calc, text =
"Calcular", command = calc_coste_turbina)
    boton_anadir_turbina   = tkinter.Button(calc, text = "Añadir",
command = anadir_turbina)

#Añadir a lista de widgets
widgets.append(turbina_tipo_label)
widgets.append(turbina_tipo_dd)
widgets.append(turbina_material_label)
widgets.append(turbina_material_dd)
widgets.append(turbina_pwr_label)
widgets.append(turbina_pwr)
widgets.append(turbina_coste_label)
widgets.append(turbina_coste)
widgets.append(boton_calc_turbina)
widgets.append(boton_anadir_turbina)

# ## UI Bomba

##Tipo bomba
bomba_tipo_label  = tkinter.Label(calc,text='Tipo Bomba')
bomba_tipo_lista  = ["Centrifuga","Desplazamiento Positivo",
"Alternativa"]
bomba_tipo_opciones = tkinter.StringVar()
bomba_tipo_dd = tkinter.OptionMenu(calc, bomba_tipo_opciones,
*bomba_tipo_lista)
bomba_tipo_opciones.set("Seleccionar") # Valor por defecto

##Material bomba
bomba_material_label  = tkinter.Label(calc,text='Material
Bomba')
bomba_material_list   = ["Acero al carbono","Acero
inoxidable","Aceros aleados especiales"]
bomba_material_opciones = tkinter.StringVar()
bomba_material_dd = tkinter.OptionMenu(calc,
bomba_material_opciones, *bomba_material_list)
bomba_material_opciones.set("Seleccionar") # Valor por defecto

##Potencia bomba
bomba_pwr_var      = tkinter.StringVar()
bomba_pwr_label    = tkinter.Label(calc,text='Potencia (kW)')
bomba_pwr          = tkinter.Entry(calc,textvariable =
bomba_pwr_var)
bomba_pwr_var.set("")

##Presion bomba
bomba_presion_var  = tkinter.StringVar()
bomba_presion_label = tkinter.Label(calc,text='Presion (barg)')
bomba_presion      = tkinter.Entry(calc,textvariable =
bomba_presion_var)

```

```

bomba_presion_var.set("")

##Coste bomba
bomba_coste_label = tkinter.Label(calc,text='Coste Bomba')
bomba_coste       = tkinter.Label(calc,text="N/A")

##funcion calculo bomba
def calc_coste_bomba():
    presion      = -1
    potencia     = -1
    cepci_v      = -1
    if(bomba_pwr.get() == "" or bomba_presion.get()==" " or
    cepci.get() == ""):
        bomba_coste["text"] = "Entrada incompleta"
        return

    try:
        presion      = float(bomba_presion.get())
        potencia     = float(bomba_pwr.get())
        cepci_v      = float(cepci.get())
    except:
        bomba_coste["text"] = "Entrada incorrecta"
        return

    if(bomba_material_opciones.get()!="Seleccionar" and
    bomba_tipo_opciones!="Seleccionar"):
        #ECUACION 1
        k1 = -1
        k2 = -1
        k3 = -1

        c1 = -1
        c2 = -1
        c3 = -1

        fp = -1

        fbm = -1
        if(bomba_tipo_opciones.get() == "Centrifuga"):
            k1 = 3.3892
            k2 = 0.0536
            k3 = 0.1538

            if(presion <= 10):
                fp = 1
            else:
                c1 = -0.3935
                c2 = 0.3957
                c3 = -0.00226
        if(bomba_material_opciones.get() == "Acero al
carbono"):

```

```

        fbm = 1.55
        if(bomba_material_opciones.get() == "Acero
inoxidable"):
            fbm = 2.28
            if(bomba_material_opciones.get() == "Aceros aleados
especiales"):
                fbm = 4.36
            if(bomba_tipo_opciones.get() == "Desplazamiento
Positivo"):
                k1 = 3.4771
                k2 = 0.1350
                k3 = 0.14380
                if(presion <= 10):
                    fp = 1
                else:
                    c1 = -0.245382
                    c2 = 0.259016
                    c3 = -0.01363

            if(bomba_material_opciones.get() == "Acero al
carbono"):
                fbm = 1.41
            if(bomba_material_opciones.get() == "Acero
inoxidable"):
                fbm = 2.67
            if(bomba_material_opciones.get() == "Aceros aleados
especiales"):
                fbm = 4.74
            if(bomba_tipo_opciones.get() == "Alternativa"):
                k1 = 3.8696
                k2 = 0.3161
                k3 = 0.12200
                if(presion <= 10):
                    fp = 1
                else:
                    c1 = -0.2454
                    c2 = 0.2590
                    c3 = -0.0136

            if(bomba_material_opciones.get() == "Acero al
carbono"):
                fbm = 1.46
            if(bomba_material_opciones.get() == "Acero
inoxidable"):
                fbm = 2.35
            if(bomba_material_opciones.get() == "Aceros aleados
especiales"):
                fbm = 3.95

        if(presion > 10):
            fp=equ2(c1,c2,c3,presion)

```

```

    b1 = 1.89
    b2 = 1.35

    cop    = int(equ1(k1,k2,k3,potencia,cepci_v))
    coste_base = int(cop * (b1+b2*1*1))
    coste = int(cop * (b1+b2*fp*fbm))
    bomba_coste["text"] = coste, "$"

    return coste_base, coste
else:
    bomba_coste["text"] = "Datos incompletos"

def anadir_bomba():
    cop , coste = calc_coste_bomba ()
    carro.append(["Bomba", cop,  coste])

    boton_calc_bomba    = tkinter.Button(calc, text = "Calcular",
command = calc_coste_bomba)
    boton_anadir_bomba = tkinter.Button(calc, text = "Añadir",
command = anadir_bomba)

#Añadir a lista widgets
widgets.append(bomba_tipo_label)
widgets.append(bomba_tipo_dd)
widgets.append(bomba_material_label)
widgets.append(bomba_material_dd)
widgets.append(bomba_pwr_label)
widgets.append(bomba_pwr)
widgets.append(bomba_presion_label)
widgets.append(bomba_presion)
widgets.append(bomba_coste_label)
widgets.append(bomba_coste)
widgets.append(boton_calc_bomba)
widgets.append(boton_anadir_bomba)

# ## UI Depósito presurizado

##Tipo Vessel
vessel_tipo_label  = tkinter.Label(calc,text='Tipo Depósito
presurizado')
vessel_tipo_lista  = ["Horizontal","Vertical"]
vessel_tipo_opciones = tkinter.StringVar()
vessel_tipo_dd = tkinter.OptionMenu(calc, vessel_tipo_opciones,
*vessel_tipo_lista)
vessel_tipo_opciones.set("Seleccionar") # valor por defecto

```

```

##Material Vessel
vessel_material_label = tkinter.Label(calc,text='Material
Depósito')
vessel_material_lista = ["Acero al carbono","Acero
inoxidable","Aceros aleados especiales", "Titanio"]
vessel_material_opciones = tkinter.StringVar()
vessel_material_dd = tkinter.OptionMenu(calc,
vessel_material_opciones, *vessel_material_lista)
vessel_material_opciones.set("Seleccionar") # valor por defecto

##Platos
platos_label = tkinter.Label(calc,text='Platos de la
columna')
platos_lista = ["No Hay (depósito)", "Malla", "Válvula"]
platos_opciones = tkinter.StringVar()
platos_dd = tkinter.OptionMenu(calc, platos_opciones,
*platos_lista)
platos_opciones.set("Seleccionar") # valor por defecto

##Diametro Vessel
vessel_diam_var = tkinter.StringVar()
vessel_diam_label = tkinter.Label(calc,text='Diametro (m)')
vessel_diam = tkinter.Entry(calc,textvariable =
vessel_diam_var)
vessel_diam_var.set("")

##Longitud Vessel
vessel_lon_var = tkinter.StringVar()
vessel_lon_label = tkinter.Label(calc,text='Longitud (m)')
vessel_lon = tkinter.Entry(calc,textvariable =
vessel_lon_var )
vessel_lon_var.set("")

##Presion maxima Vessel
vessel_presion_var = tkinter.StringVar()
vessel_presion_label = tkinter.Label(calc,text='Presion
(barg)')
vessel_presion = tkinter.Entry(calc,textvariable =
vessel_presion_var)
vessel_presion_var.set("")

##Vessel Coste
vessel_coste_label = tkinter.Label(calc,text='Coste depósito')
vessel_coste = tkinter.Label(calc,text="N/A")

def calc_coste_vessel():
    diametro = -1
    longitud = -1
    cepci_v = -1
    presion = -1
    try:
        #Diametro

```



```

if(vessel_diam.get() == ""):
    vessel_coste["text"] = "Entrada incompleta"
    return
diametro = float(vessel_diam.get())
#Longitud
if(vessel_lon.get() == ""):
    vessel_coste["text"] = "Entrada incompleta"
    return
longitud = float(vessel_lon.get())
#Presion
if(vessel_presion.get() == ""):
    vessel_coste["text"] = "Entrada incompleta"
    return
presion = float(vessel_presion.get())
#Cepci
if(cepci.get() == ""):
    vessel_coste["text"] = "Entrada incompleta"
    return
cepci_v = float(cepci.get())
except:
    vessel_coste["text"] = "Entrada incorrecta"
    if(vessel_material_opciones.get()!="Seleccionar" and
vessel_tipo_opciones!="Seleccionar"):
        #ECUACION 1
        k1 = -1
        k2 = -1
        k3 = -1
        fbm = -1
        fp = -1
        b1 = -1
        b2 = -1
        #Material
        if(vessel_material_opciones.get() == "Acero al
carbono"):
            fbm = 1.0
            if(vessel_material_opciones.get() == "Acero
inoxidable"):
                fbm = 3.1
            if(vessel_material_opciones.get() == "Aceros aleados
especiales"):
                fbm = 7.1
            if(vessel_material_opciones.get() == "Titanio"):
                fbm = 9.4

        #Tipo
        if(vessel_tipo_opciones.get() == "Horizontal"):
            k1 = 3.5565
            k2 = 0.3776
            k3 = 0.0905
            b1 = 1.49
            b2 = 1.52

```

```

        if(vessel_tipo_opciones.get() == "Vertical"):
            k1 = 3.4974
            k2 = 0.4485
            k3 = 0.1074
            b1 = 2.25
            b2 = 1.82

            cop =
int(equ1(k1,k2,k3,3.14*pow(diametro/2,2)*longitud,cepci_v))

            if(presion < 0.5):
                fp = 1.25
            else:
                fp = equ3(presion,diametro)
                if(fp<1):
                    fp=1

            coste = int(cop * (b1 +b2*fp*fbm))
            coste_base = int(cop * (b1 +b2*1*1))

            vessel_coste["text"] = coste, "$"

            return coste_base, coste
        else:
            vessel_coste["text"] = "Datos incompletos"

def anadir_vessel():
    cop , coste = calc_coste_vessel ()
    carro.append(["Vessel", cop, coste])

    boton_calc_vessel      = tkinter.Button(calc, text = "Calcular",
command = calc_coste_vessel)
    boton_anadir_vessel    = tkinter.Button(calc, text = "Añadir",
command = anadir_vessel)

widgets.append(vessel_tipo_label)
widgets.append(vessel_tipo_dd)
widgets.append(vessel_material_label)
widgets.append(vessel_material_dd)
widgets.append(platos_label)
widgets.append(platos_dd)
widgets.append(vessel_diam_label)
widgets.append(vessel_diam)
widgets.append(vessel_lon_label)
widgets.append(vessel_lon)
widgets.append(vessel_presion_label)
widgets.append(vessel_presion)

```

```
widgets.append(vessel_coste_label)
widgets.append(vessel_coste)
widgets.append(boton_calc_vessel)
widgets.append(boton_anadir_vessel)

# ## UI columna

##Material columna
columna_material_label = tkinter.Label(calc,text='Material
Columna')
columna_material_lista = ["Acero al carbono","Acero
inoxidable","Aceros aleados especiales", "Titanio"]
columna_material_opciones = tkinter.StringVar()
columna_material_dd = tkinter.OptionMenu(calc,
columna_material_opciones, *columna_material_lista)
columna_material_opciones.set("Seleccionar") # valor por
defecto

##Platos
platos_label = tkinter.Label(calc,text='Tipo de Platos')
platos_lista = ["Malla", "Válvula"]
platos_opciones = tkinter.StringVar()
platos_dd = tkinter.OptionMenu(calc, platos_opciones,
*platos_lista)
platos_opciones.set("Seleccionar") # valor por defecto

##Numero de platos
num_platos_var = tkinter.StringVar()
num_platos_label = tkinter.Label(calc,text='Número de platos')
num_platos = tkinter.Entry(calc,textvariable =
num_platos_var)
num_platos_var.set("")

##Material platos
platos_material_label = tkinter.Label(calc,text='Material
Platos')
platos_material_lista = ["Acero al carbono","Acero
inoxidable","Aleación de Níquel"]
platos_material_opciones = tkinter.StringVar()
platos_material_dd = tkinter.OptionMenu(calc,
platos_material_opciones, *platos_material_lista)
platos_material_opciones.set("Seleccionar") # valor por defecto

##Diametro Columna
columna_diam_var = tkinter.StringVar()
columna_diam_label = tkinter.Label(calc,text='Diametro (m)')
columna_diam = tkinter.Entry(calc,textvariable =
columna_diam_var)
columna_diam_var.set("")

##Longitud columna
```

```

columna_lon_var = tkinter.StringVar()
columna_lon_label = tkinter.Label(calc, text='Longitud (m)')
columna_lon = tkinter.Entry(calc, textvariable =
columna_lon_var )
columna_lon_var.set("")

##Presion maxima columna
columna_presion_var = tkinter.StringVar()
columna_presion_label = tkinter.Label(calc, text='Presion
(barg)')
columna_presion = tkinter.Entry(calc, textvariable =
columna_presion_var)
columna_presion_var.set("")

##Columna Coste
columna_coste_label = tkinter.Label(calc, text='Coste Columna')
columna_coste = tkinter.Label(calc, text="N/A")

def calc_coste_columna():
    diametro = -1
    longitud = -1
    cepci_v = -1
    presion = -1
    platos = -1

    try:
        #Diametro
        if(columna_diam.get() == ""):
            columna_coste["text"] = "Entrada incompleta"
            return
        diametro = float(columna_diam.get())
        #Longitud
        if(columna_lon.get() == ""):
            columna_coste["text"] = "Entrada incompleta"
            return
        longitud = float(columna_lon.get())
        #Presion
        if(columna_presion.get() == ""):
            columna_coste["text"] = "Entrada incompleta"
            return
        presion = float(columna_presion.get())
        #Cepci
        if(cepci.get() == ""):
            columna_coste["text"] = "Entrada incompleta"
            return
        cepci_v = float(cepci.get())
        if(num_platos.get() == ""):
            columna_coste["text"] = "Entrada incompleta"
            return
        platos = int(num_platos.get())

```

```

except:
    columna_coste["text"] = "Entrada incorrecta"
    if(columna_material_opciones.get()!="Seleccionar" and
platos_opciones!="Seleccionar" and
platos_material_opciones!="Seleccionar"):
        #ECUACION 1
        k1_c = -1
        k2_c = -1
        k3_c = -1
        k1_p = -1
        k2_p = -1
        k3_p = -1
        fbm_columna = -1
        fbm_platos = -1
        fp = -1
        b1 = -1
        b2 = -1
        #Material columna
        if(columna_material_opciones.get() == "Acero al
carbono"):
            fbm_columna = 1.0
            if(columna_material_opciones.get() == "Acero
inoxidable"):
                fbm_columna = 3.1
                if(columna_material_opciones.get() == "Aceros aleados
especiales"):
                    fbm_columna = 7.1
                    if(columna_material_opciones.get() == "Titanio"):
                        fbm_columna = 9.4

            if(platos_material_opciones.get() == "Acero al
carbono"):
                fbm_platos = 1.0
                if(platos_material_opciones.get() == "Acero
inoxidable"):
                    fbm_platos = 1.83
                    if(platos_material_opciones.get() == "Aleación de
Níquel"):
                        fbm_platos = 5.58

        k1_c = 3.4974
        k2_c = 0.4485
        k3_c = 0.1074
        b1 = 2.25
        b2 = 1.82

        cop_columna =
int(equ1(k1_c,k2_c,k3_c,3.14*pow(diametro/2,2)*longitud,cepci_v)
)
        print(cop_columna, k1_c, k2_c, k3_c)

```

```

    if(presion < 0.5):
        fp = 1.25
    else:
        fp = equ3(presion,diametro)
        if(fp<1):
            fp=1

    coste_columna = int(cop_columna * (b1
+b2*fp*fbm_columna))
    coste_base_columna = int(cop_columna * (b1 +b2*1*1))

    if (platos_opciones.get() == "Malla"):
        k1_p = 2.9949
        k2_p = 0.4465
        k3_p = 0.3961

    if (platos_opciones.get() == "Válvula"):
        k1_p = 3.3322
        k2_p = 0.4838
        k3_p = 0.3434

    if (platos < 20 ):
        fq = equ1(0.4771, 0.08516, -0.3473, platos,397)
    else:
        fq = 1

    cop_plato =
int(equ1(k1_p,k2_p,k3_p,3.14*pow(diametro,2)/4,cepci_v))
    coste_base_plato = int(cop_plato * platos * 1 * fq)
    coste_plato = int(cop_plato * platos * fbm_platos
* fq)

    coste = coste_plato + coste_columna
    coste_base = coste_base_columna + coste_base_plato
    columna_coste["text"] = coste, "$"

    return coste_base, coste
else:
    columna_coste["text"] = "Datos incompletos"

def anadir_columna():
    cop , coste = calc_coste_columna ()
    carro.append(["Columna", cop, coste])

```

```
boton_calc_columna      = tkinter.Button(calc, text =
"Calcular", command = calc_coste_columna)
boton_anadir_columna   = tkinter.Button(calc, text = "Añadir",
command = anadir_columna)

widgets.append(platos_label)

widgets.append(platos_dd)
widgets.append(columna_material_label)
widgets.append(columna_material_dd)
widgets.append(platos_material_label)
widgets.append(platos_material_dd)
widgets.append(num_platos_label)
widgets.append(num_platos)
widgets.append(platos_label)
widgets.append(columna_diam_label)
widgets.append(columna_diam)
widgets.append(columna_lon_label)
widgets.append(columna_lon)
widgets.append(columna_presion_label)
widgets.append(columna_presion)
widgets.append(columna_coste_label)
widgets.append(columna_coste)
widgets.append(boton_calc_columna)
widgets.append(boton_anadir_columna)

# # RENDER DE LA UI PRINCIPAL

def show(*args):
    if(equipos_opciones.get() == "Compresor"):
        hide_all(widgets)
        #Mostrar menu compresor
        show_widget(compresor_tipo_label, 2, 1)
        show_widget(compresor_tipo_dd, 2, 2)

        show_widget(compresor_material_label, 3, 1)
        show_widget(compresor_material_dd, 3, 2)

        show_widget(compresor_pwr_label, 4, 1)
        show_widget(compresor_pwr, 4, 2)

        show_widget(compresor_coste_label, 5, 1)
        show_widget(compresor_coste, 5, 2)

        show_widget(boton_calc_compresor, 6, 1)
        show_widget(boton_anadir_compresor, 6, 2)

    elif(equipos_opciones.get() == "Intercambiador de calor"):
        hide_all(widgets)
        #Mostrar menu intercambiador
```

```
show_widget(hex_tipo_label, 2,1)
show_widget(hex_tipo_dd    , 2,2)

show_widget(hex_material_label, 3,1)
show_widget(hex_material_dd    , 3,2)

show_widget(hex_area_label, 4,1)
show_widget(hex_area          , 4,2)

show_widget(hex_presion_label, 5,1)
show_widget(hex_presion      , 5,2)

show_widget(hex_coste_label, 6,1)
show_widget(hex_coste        , 6,2)

show_widget(boton_calc_hex,7,1)
show_widget(boton_anadir_hex,7,2)

elif(equipos_opciones.get() == "Tanque"):
    hide_all(widgets)

    #Mostrar menu tank
    show_widget(tank_tipo_label, 2,1)
    show_widget(tank_tipo_dd    , 2,2)

    show_widget(tank_size_label, 3,1)
    show_widget(tank_size      , 3,2)

    show_widget(tank_coste_label, 4,1)
    show_widget(tank_coste      , 4,2)

    show_widget(boton_calc_tank, 5,1)
    show_widget(boton_anadir_tank,5,2)

elif(equipos_opciones.get() == "Turbina"):
    hide_all(widgets)
    #Mostrar menu turbina
    show_widget(turbina_tipo_label, 2,1)
    show_widget(turbina_tipo_dd    , 2,2)

    show_widget(turbina_material_label, 3,1)
    show_widget(turbina_material_dd    , 3,2)

    show_widget(turbina_pwr_label, 4,1)
    show_widget(turbina_pwr        , 4,2)

    show_widget(turbina_coste_label, 5,1)
    show_widget(turbina_coste      , 5,2)

    show_widget(boton_calc_turbina, 6,1)
```



```
show_widget(boton_anadir_turbina,6,2)

elif(equipos_opciones.get() == "Bomba"):
    hide_all(widgets)

    #Mostrar menu Bomba
    show_widget(bomba_tipo_label, 2,1)
    show_widget(bomba_tipo_dd    , 2,2)

    show_widget(bomba_material_label, 3,1)
    show_widget(bomba_material_dd    , 3,2)

    show_widget(bomba_pwr_label, 4,1)
    show_widget(bomba_pwr          , 4,2)

    show_widget(bomba_presion_label, 5,1)
    show_widget(bomba_presion      , 5,2)

    show_widget(bomba_coste_label, 6,1)
    show_widget(bomba_coste       , 6,2)

    show_widget(boton_calc_bomba, 7,1)
    show_widget(boton_anadir_bomba,7,2)

elif(equipos_opciones.get() == "Depósito Presurizado"):
    hide_all(widgets)

    #Mostrar menu vessel

    show_widget(vessel_tipo_label,2,1)
    show_widget(vessel_tipo_dd    ,2,2)

    show_widget(vessel_material_label, 3,1)
    show_widget(vessel_material_dd    , 3,2)
    show_widget(vessel_diam_label, 4,1)
    show_widget(vessel_diam          , 4,2)

    show_widget(vessel_lon_label, 5,1)
    show_widget(vessel_lon          , 5,2 )

    show_widget(vessel_presion_label, 6,1)
    show_widget(vessel_presion      , 6,2)

    show_widget(vessel_coste_label, 7,1)
    show_widget(vessel_coste       , 7,2)

    show_widget(boton_calc_vessel, 8,1)
    show_widget(boton_anadir_vessel,8,2)

elif(equipos_opciones.get() == "Columna"):
    hide_all(widgets)
```

```
#Mostrar menu Columna

show_widget(columna_material_label,2,1)
show_widget(columna_material_dd ,2,2)

show_widget(platos_label, 3,1)
show_widget(platos_dd, 3,2)
show_widget(num_platos_label, 4,1)
show_widget(num_platos, 4,2)

show_widget(platos_material_label, 5,1)
show_widget(platos_material_dd, 5,2)

show_widget(columna_diam_label, 6,1)
show_widget(columna_diam , 6,2)

show_widget(columna_lon_label, 7,1)
show_widget(columna_lon , 7,2 )

show_widget(columna_presion_label, 8,1)
show_widget(columna_presion , 8,2)

show_widget(columna_coste_label, 9,1)
show_widget(columna_coste , 9,2)

show_widget(boton_calc_columna, 10,1)
show_widget(boton_anadir_columna,10,2)

#se enseñan las opciones cuando se detecta elección de equipo
equipos_opciones.trace('w',show)
calc.mainloop()
```

# REFERENCIAS

---

- [1] Real Academia Española, «proyecto, proyecta | Definición | Diccionario de la lengua española». <https://dle.rae.es/proyecto> (accedido jul. 03, 2021).
- [2] R. de Heredia, *Arquitectura y Urbanismo Industrial*, 2.<sup>a</sup> ed. Madrid: Sección de Publicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid, 1981.
- [3] S. C. Morales Palomino, *Diseño de Plantas Industriales*, 1.<sup>a</sup> ed. Madrid: UNED, 2011.
- [4] AACE International, «Cost Engineering Terminology», 2021.
- [5] AACE International, «Cost Estimate Classification System – as Applied in Engineering, Procurement, and Construction for the Process Industries», *AACE Int. Recomm. Pract. No. 18R-97*, 2005.
- [6] K. K. Humphreys, *Project and Cost Engineers' Handbook*, 4a ed. Granite Falls, North Carolina, U.S.A: MARCEL DEKKER, 2005.
- [7] J. M. Storch de Gracia y B. Herrero Sánchez, *Organización, gestión y ejecución de proyectos industriales*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, 2018.
- [8] R. Turton, R. C. Bailie, W. B. Whiting, y J. A. Shaeiwitz, «Estimation of Capital Costs», en *Analysis, synthesis and design of chemical processes*, 3a ed., New Jersey: Prentice Hall, 2009, pp. 182-221.
- [9] H. Lang, «Cost Relationships in Preliminary Cost Estimation», *Chemical Engineering*, 1947.
- [10] T. Wolf, «Lang Factor Cost Estimating», 2013. [prjmgrcap.com/langfactorestimating.html](http://prjmgrcap.com/langfactorestimating.html) (accedido jun. 23, 2021).
- [11] K. M. Guthrie, «Capital Cost Estimating», *Chemical Engineering*, 1969.
- [12] A. Sevilla Arias, «Inflación», 2015. <https://economipedia.com/definiciones/inflacion.html> (accedido jun. 09, 2021).
- [13] Python Software Foundation, «General Python FAQ — Python 3.9.6 documentation», jul. 06, 2021. <https://docs.python.org/3/faq/general.html#what-is-python> (accedido jul. 07, 2021).
- [14] C. Riba Romeva, *Selección de materiales en el diseño de máquinas*, 1.<sup>a</sup> ed. Barcelona: UPC, 2008.
- [15] T. Segal, «Greenfield vs. Brownfield Investments», jul. 09, 2019. <https://www.investopedia.com/ask/answers/043015/what-difference-between-green-field-and-brown-field-investment.asp> (accedido jul. 07, 2021).
- [16] T. Sánchez Lencero, A. Muñoz Blanco, y F. J. Jiménez-Espadafor Aguilar, *Turbomáquinas térmicas*. Madrid: Síntesis, 2010.
- [17] Acequisa, «Hastelloy C276». <http://acequisa.com/spanish/niquel/alloy-c276.html> (accedido jun. 30, 2021).
- [18] S. Perry, R. H. Perry, D. W. Green, y J. O. Maloney, *Perry's chemical engineers' handbook*, vol. 38, n.º 02. 2000.
- [19] Werner Sölken, «Introduction to Storage Tanks», 2008.

- [http://www.wermac.org/equipment/storage\\_tanks\\_vessels\\_general.html](http://www.wermac.org/equipment/storage_tanks_vessels_general.html) (accedido jul. 06, 2021).
- [20] H. Silla, *Chemical Process Engineering: Design and Economics*. Nueva York: MARCEL DEKKER, 2003.
- [21] ASME, «Boiler and Pressure Vessel Code, An International Code», *ASME Boil. Press. Vessel Code*, p. 25, 2017.
- [22] Fusion Media Ltd., «Cambio Euro Dólar hoy | Investing.com». <https://es.investing.com/currencies/eur-usd> (accedido jul. 03, 2021).
- [23] JCV shipping & solutions, «Incoterms 2020 Rules», *JCV Shipp. Solut.*, n.º Icc, p. 7447, 2020, [En línea]. Disponible en: <https://www.diariodelexportador.com/2017/03/incoterms-cif-definicion-y.html>.