



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Alcoy

Estudio técnico y económico de extracción de aceite
esencial de romero (*Salvia Rosmarinus*) mediante
destilación de arrastre con vapor

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Química

AUTOR/A: Prats Payá, Jesús

Tutor/a: Fombuena Borrás, Vicent

Cotutor/a: Domínguez Candela, Iván

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

RESUMEN

“Estudio técnico y económico de la extracción de aceite esencial de romero (*Salvia Rosmarinus*) mediante destilación de arrastre con vapor de agua”

El presente proyecto tiene como objetivo ser capaces de implementar la ingeniería básica de una planta de extracción de aceite esencial de romero (*Salvia Rosmarinus*) con una producción diaria de 11,76 kg de aceite esencial por día.

A medida que se avanza en la memoria del proyecto, se describen en primer lugar las características principales de los aceites, así como las técnicas más habituales de extracción junto con sus ventajas e inconvenientes. Se realiza una proyección de mercado para concluir si este mercado, el de los aceites esenciales tiene una proyección de futuro favorable. En función de estos datos, se toma la decisión de elegir el aceite esencial de romero, además también se ha elegido esta planta como materia prima debido a que en la zona en la que se plantea el proyecto (Alcoy y alrededores) son zonas muy abundantes en cuanto a esta materia vegetal debido al clima que presenta la localidad.

En lo que se refiere a la planta de extracción, se han dimensionado los equipos necesarios para poder producir la cantidad de aceite esencial de romero comentara anteriormente, además se han los tiempos necesarios para producir los procesos, y se ha propuesto un acoplamiento de las etapas mediante “Microsoft Project” para que la planta pueda funcionar las 24 horas del día mediante la realización de tres turnos de trabajo.

Por último, se ha realizado un estudio económico a través del VAN y del TIR para ver si el proyecto propuesto es rentable o no durante los 15 años de inversión propuestos. A demás se calculará el precio mínimo de venta del aceite esencial para el cual tras los 15 años de inversión las ganancias y las pérdidas son nulas (VAN=0).

Palabras clave: aceite esencial de romero, extracción con arrastre de vapor, rentabilidad económica.

SUMMARY

“Technical and economic study of the extraction of rosemary (*Salvia Rosmarinus*) essential oil by steam distillation.”

The present project aims to be able to implement the basic engineering of a rosemary (*Salvia Rosmarinus*) essential oil extraction plant with a daily production of 11.76 kg of essential oil.

As the project report progresses, the main characteristics of the oils are first described, as well as the most common extraction techniques together with their advantages and disadvantages. A market projection is made to conclude whether this market, that of essential oils, has a favorable future projection. Based on these data, the decision is made to choose rosemary essential oil, in addition this plant has also been chosen as raw material because in the area where the project is planned (Alcoy and surroundings) are very abundant areas in terms of this plant material due to the climate of the locality.

As far as the extraction plant is concerned, the necessary equipment has been dimensioned to be able to produce the quantity of rosemary essential oil mentioned above, in addition to the times necessary to produce the processes, and a coupling of the stages has been proposed by means of "Microsoft Project" so that the plant can operate 24 hours a day by means of three work shifts.

Finally, an economic study has been carried out through NPV and IRR to see if the proposed project is profitable or not during the proposed 15 years of investment. In addition, the minimum selling price of the essential oil will be calculated for which, after 15 years of investment, profits and losses are zero (NPV=0).

Key words: rosemary essential oil, steam entrainment extraction, economic profitability.

RESUM

“Estudi tècnic i econòmic de l'extracció d'oli essencial de romer (*Sàlvia *Rosmarinus*) mitjançant destil·lació d'arrossegament amb vapor d'aigua”

El present projecte té com a objectiu ser capaç d'implementar l'enginyeria bàsica d'una planta d'extracció d'oli essencial de romer (*Sàlvia *Rosmarinus*) amb una producció diària de 11,76 kg d'oli essencial per dia.

A mesura que s'avança en la memòria del projecte, es descriuen en primer lloc les característiques principals dels olis, així com les tècniques més habituals d'extracció juntament amb els seus avantatges i inconvenients. Es realitza una projecció de mercat per a concloure si aquest mercat, el dels olis essencials té una projecció de futur favorable. En funció d'aquestes dades, es pren la decisió de triar l'oli essencial de romer, a més també s'ha triat aquesta planta com a matèria primera pel fet que en la zona en la qual es planteja el projecte (Alcoi i voltants) són zones molt abundants quant a aquesta matèria vegetal a causa del clima que presenta la localitat.

Pel que fa a la planta d'extracció, s'han dimensionat els equips necessaris per a poder produir la quantitat d'oli essencial de romer comentada anteriorment, a més s'han els temps necessaris per a produir els processos, i s'ha proposat un acoblament de les etapes mitjançant “Microsoft *Project” perquè la planta pugui funcionar les 24 hores del dia mitjançant la realització de tres torns de treball.

Finalment, s'ha realitzat un estudi econòmic a través del VAN i del TIR per a veure si el projecte proposat és rendible o no durant els 15 anys d'inversió proposats. A més es calcularà el preu mínim de venda de l'oli essencial per al qual després dels 15 anys d'inversió els guanys i les pèrdues són nul·les (VAN=0).

Paraules clau: oli essencial de romer, extracció amb arrossegament de vapor, rendibilitat econòmica.

Tabla de Contenidos

RESUMEN.....	1
SUMMARY.....	2
RESUM.....	3
LISTADO DE FIGURAS.....	8
LISTADO DE TABLAS.....	10
I. INTRODUCCIÓN.....	12
I.1. ACEITES ESENCIALES.....	13
I.1.1. CLASIFICACIÓN DE LOS ACEITES ESENCIALES.....	14
I.1.2. PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE LOS ACEITES ESENCIALES	16
I.1.3. BENEFICIOS DE LOS ACEITES ESENCIALES.....	17
I.2. SITUACIÓN DE MERCADO.....	18
I.2.1. ANÁLISIS DE MERCADO INTERNACIONAL.....	18
I.2.2. ANÁLISIS DE MERCADO NACIONAL.....	20
I.2.3. PREVISIONES SOBRE LA EVOLUCIÓN DE MERCADO.....	22
I.2.4. PREVISIONES LOS ACEITES DOMINANTES EN EL MERCADO...23	
I.3. MÉTODOS DE EXTRACCIÓN.....	25
I.3.1. DESTILACIÓN.....	25
I.3.1.1 DESTILACIÓN CON AGUA (HIDRODESTILACIÓN).....	25
I.3.1.2. DESTILACIÓN POR ARRASTRE CON VAPOR DE AGUA.....	27
I.3.1.3. DESTILACIÓN CON AGUA - VAPOR.....	28
I.3.2. EXTRACCIÓN.....	29
I.3.2.1. CON SOLVENTES ORGÁNICOS.....	29
I.3.2.1. CON SUSTANCIAS GRASAS.....	30
I.3.3. TÉCNICA DEL PENSADO.....	31

I.4. ACEITE ESENCIAL “SALVIA ROSMARINUS”	33
II. OBJETIVO	38
II.1. OBJETIVO GENERAL.....	39
II.2. OBJETIVOS PARTICULARES.....	39
II.3. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)	39
III. DESARROLLO DEL PROYECTO	41
III.1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....	42
III.2. EQUIPOS	43
III.2.1. ZONA DE PRETRATAMIENTO.....	43
III.2.1.1. OPERACIÓN DE LAVADO.....	45
III.2.1.2. OPERACIÓN DE SECADO.....	47
III.2.1.2. OPERACIÓN DE TRITURACIÓN	51
III.2.2. ZONA DE EXTRACCIÓN	52
III.2.2.1. OPERACIÓN DE EXTRACCIÓN.....	54
III.2.2.2. OPERACIÓN DE CONDENSACIÓN	57
III.3. ESTUDIO FLUJOS DEL PROCESO	59
III.3.1. BALANCE DE MATERIA PARA LA ETAPA DE LAVADO.....	59
III.3.2. BALANCE DE MATERIA PARA LA ETAPA DE SECADO.....	62
III.3.3. BALANCE DE MATERIA PARA LA ETAPA DE TRITURADO..	70
III.3.4. BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA PARA LA ETAPA DE EXTRACCIÓN	71
III.3.5. BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA PARA LA ETAPA DE CONDENSACIÓN	77
III.3.6. BALANCE DE MATERIA ETAPA DE SEPARACIÓN	81
IV. ESTUDIO ECONÓMICO	82
IV.1. DISEÑO DE LA INSTALACIÓN.....	83
IV.1.1. DIMENSIONAMIENTO DEL LAVADERO.....	83
IV.1.2. DIMENSIONAMIENTO DEL SECADERO.....	84

IV.1.3. DIMENSIONAMIENTO DEL EXTRACTOR	85
IV.1.4. DIMENSIONAMIENTO DEL CONDENSADOR.....	86
IV.1.5. DIMENSIONAMIENTO LA RESISTENCIA GENERADORA DE VAPOR.....	88
IV.1.6. DIMENSIONAMIENTO LOS TANQUES DE ALMACENAMIENTO.....	90
IV.1.7. DIMENSIONAMIENTO LAS BOMBAS Y VÁLVULAS	93
IV.2. CRONOGRAMA DEL PROCESO (DIAGRAMA DE GANTT).....	95
IV.3. ESTUDIO DE RENTABILIDAD ECONÓMICA.....	97
IV.3.1. ESTIMACIÓN DE LA INVERSIÓN INICIAL.....	97
IV.3.1.1. CAPITAL INMOVILIZADO.....	98
IV.3.1.1.1. COSTES DE LOS EQUIPOS	99
IV.3.1.1.2. COSTE TOTAL DEL CAPITAL INMOVILIZADO	100
IV.3.1.2. CAPITAL CIRCULANTE.....	101
IV.3.1.3. COSTES PREVIOS Y COSTES DE PUESTA EN MARCHA (CP Y CM).....	101
IV.3.1.4. INVERSIÓN TOTAL INICIAL	102
IV.3.2. ESTIMACIÓN DE LOS COSTES DE PRODUCCIÓN	102
IV.3.2.1. COSTES DE FABRICACIÓN (M)	102
IV.3.2.1.1. MATERIAS PRIMAS (M ₁)	103
IV.3.2.1.2. MANO DE OBRA(M ₂).....	103
IV.3.2.1.3. SERVICIOS GENERALES(M ₅).....	104
IV.3.2.2. COSTES DE ADMINISTRACIÓN Y VENTAS (G).....	108
IV.3.3. ESTIMACIÓN DE LAS VENTAS.....	108
IV.3.4. RENTABILIDAD ECONÓMICA	109
IV.3.4.1. FLUJOD E CAJA NETO (CF _t).....	109
IV.3.4.2. VAN.....	111
IV.3.4.3. TIR.....	111

IV.3.5. VIABILIDAD ECONÓMICA.....	112
V. CONCLUSIONES	115
V.1. CONCLUSIONES.....	116
VI. APÉNDICES	118
VI.1. REFERENCIAS.....	119
VI.2. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA PLANTA	125
VI.3. DIAGRAMA PSICOMÉTRICO A PRESIÓN ATMOSFÉRICA	126
VI.4. TABLA DE PROPIEDADES DEL VAPOR DE AGUA A PRESIÓN ATMOSFÉRICA	127
VI.5. TABLA DE PROPIEDADES DEL AGUA LÍQUIDA A PRESIÓN ATMOSFÉRICA	128
VI.6. TABLA DE PROPIEDADES DEL AIRE SECO A PRESIÓN ATMOSFÉRICA	129
VI.7. DIAGRAMA C-NTU- ϵ DEL INTERCAMBIADOR DE CARCASA Y TUBOS.....	130

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de los aceites esenciales según su consistencia (oleorresinas, esencia fluida y bálsamos).	14
Figura 2. Ejemplo de Mono- y Sesquiterpenos naturales.	15
Figura 3. Exportaciones e importaciones a nivel internacional de los aceites esenciales por continente (2019) Datos OEC [6].	19
Figura 4. Exportaciones Españolas de aceites esenciales por continente (2019) Datos OEC [6].	20
Figura 5. Importaciones Españolas de aceites esenciales por continente (2019) Datos OEC [6].	21
Figura 6. Evolución de la producción mundial hasta 2025 según los datos obtenidos por "Gran View Research" [8].	22
Figura 7. Evolución de la demanda de distintos aceites esenciales en EE. UU [9].	23
Figura 8. Volumen de compras de aceites esenciales a nivel internacional por sector comercial [9].	24
Figura 9. Esquema del proceso de destilación con agua [10].	25
Figura 10. Esquema del proceso de destilación de arrastre con vapor de agua [11].	27
Figura 11. Esquema del proceso de destilación con agua y vapor [11].	28
Figura 12. Diagrama general del proceso de obtención de oleorresinas.	29
Figura 13. Planta de romero.	33
Figura 14. Estructura química general de los Flavonoides [15].	34
Figura 15. Previsión de aumento de los aceites esenciales de romero para cada continente [19].	37
Figura 16. Diagrama de bloques de la planta de extracción.	42
Figura 17. Zona de pretratamientos en el diagrama de flujo	43
Figura 18. Lavadero de materiales vegetales. Modelo TSXQ-80.	45
Figura 19. Esquema de un secador de platos perforados [22].	49
Figura 20. Ejemplo de resistencia eléctrica tubular lisa y blindada [23].	50
Figura 21. Molino de martillo W-8-LH [24].	51
Figura 22. Etapa de extracción y condensación del diagrama de flujo.	52
Figura 23. Distribuidor de vapor con forma circular [25].	54

Figura 24. Esquema del destilador y sus partes [26].....	55
Figura 25. Área de un parche de aceite y su incremento [27].....	56
Figura 26. Corrientes propuestas para el intercambiador de carcasa y tubo [28].	57
Figura 27. Zonificación del condensador [27].	58
Figura 28. Etapa de lavado.....	59
Figura 29. Etapa de secado.....	62
Figura 30. Diagrama psicrométrico aire-agua a presión atmosférica.....	63
Figura 31. Etapa de trituración	70
Figura 32. Proceso de extracción	71
Figura 33. Etapa de condensación.....	77
Figura 34. Etapa de separación.....	81
Figura 35. Lavadero TSXQ-80 [37]	83
Figura 36. Secadero CT-C-IV [38].....	84
Figura 37. Extractor HG-2000 [39].....	85
Figura 38. Intercambiador de calor SC4508-6 [40]	86
Figura 39. Esquema del intercambiador de calor SC4508-6 [40].....	86
Figura 40. Resistencia eléctrica GCB-V para la generación de vapor [41].....	88
Figura 41. Tanque de almacenamiento de agua ZG3T	90
Figura 42. Tanque de almacenamiento aceite esencial y agua de romero.....	91
Figura 43. Bombas centrifugas YLIZ50-32-125 [42].....	93
Figura 44. Válvulas de bola con brida Q41F-16P	94
Figura 45. Secuenciación de las etapas del proceso (Diagrama de Gantt)	95

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Parte de la planta empleada en la obtención del aceite esencial [2].	13
Tabla 2. Ventajas y desventajas de la técnica del prensado [13].	32
Tabla 3. Principales compuestos activos del aceite esencial de romero junto con el porcentaje de abundancia y su estructura química [16].	35
Tabla 4. Propiedades fisicoquímicas del aceite esencial de romero [18].	36
Tabla 5. Relación de los códigos de los equipos con las etapas del proceso y sus corrientes.	43
Tabla 6. Kilogramo de hierba verde necesarios para obtener luego del secado [20].	48
Tabla 7. Relación de los códigos de los equipos con las etapas del proceso y sus corrientes	53
Tabla 8. Resultados del balance de materia del agua para la etapa de lavado.	61
Tabla 9. Parámetros requeridos del secadero.	65
Tabla 10. Resultado del balance de materia y energía para el proceso de secado.	65
Tabla 11. Resultados del tiempo de la operación de secado	69
Tabla 12. Resultado del balance de materia para la etapa de triturado	70
Tabla 13. Resultados del balance de materia para la etapa de extracción	76
Tabla 14. Resultados balance de energía para las etapas de calentamiento y extracción.	76
Tabla 15. Resultados de balance de energía para la etapa de condensación del intercambiador	79
Tabla 16. Resultados del balance de materia para la etapa de enfriamiento	80
Tabla 17. Resultados del balance de materia para la etapa de condensación para un tiempo total de extracción de 12,08 min.	80
Tabla 18. Resultados del balance de materia para el proceso de separación.	81
Tabla 19. Hoja de especificaciones del lavador TSXQ-80.	83
Tabla 20. Hoja de especificaciones del secadero CT-C-IV.	84
Tabla 21. Hoja de especificaciones del extractor HG-2000.	85
Tabla 22. Hoja de especificaciones del intercambiador SC4508-6.	87
Tabla 23. Hoja de especificaciones resistencia GCB-V para la generación de vapor.	89

Tabla 24. Hoja de especificaciones del tanque de almacenamiento de agua ZG3T	91
Tabla 25. Hoja de especificaciones del tanque de 15 Litros	92
Tabla 26. Hoja de especificaciones del tanque de 40 Litros	92
Tabla 27. Hoja de especificaciones de la Bomba centrífuga YLIZ50-32-125	93
Tabla 28. Coste de los equipos individuales	99
Tabla 29. Estimación de los costes que contribuyen al capital inmovilizado ...	100
Tabla 30. Estimación de los costes de materia prima	103
Tabla 31. Estimación de los costes de mano de obra directa [37].	104
Tabla 32. Potencia unitaria de los quipos del proceso.....	105
Tabla 33. Estimación del coste de agua anual.....	106
Tabla 34. Estimación de los costes provenientes del proceso de fabricación ...	106
Tabla 35. Estimación de los ingresos gracias a las ventas.	108
Tabla 36. Resultados del precio mínimo de venta.	112
Tabla 37. Flujo neto de caja para cada año.	114

I. INTRODUCCIÓN

I. Introducción

I.1. ACEITES ESENCIALES

Los aceites esenciales son mezclas de sustancias extraídas de las plantas, que se caracterizan principalmente por su compleja composición química y su fuerte carácter aromático [1].

De todas las plantas que existen en nuestro planeta, se conocen aproximadamente 4.000 aceites esenciales diferentes. Cabe recalcar que no todas las plantas contienen estas sustancias, y las que las contienen, algunas las contienen en concentraciones tan mínimas que su obtención no es posible ni económicamente viable [1].

Las plantas aromáticas se conocen como plantas con una alta concentración de esencia, por lo que estas plantas se utilizarán como materia prima para la obtención de la esencia, se puede utilizar la planta entera, solo las hojas, flores, frutos o raíces dependiendo de la planta en específico. En **Tabla 1** se incluyen algunos ejemplos de plantas y partes de dicha planta empleada en la obtención del aceite esencial.

Tabla 1. Parte de la planta empleada en la obtención del aceite esencial [2].

Aceite esencial	Parte de la planta utilizada
Ciprés, jara	Ramas
Lavanda, lavandín	Sumidades floridas
Menta, hierba limón, eneldo	Planta entera
Geranio, petitgrain	Hojas
Neroli, rosa	Flor
Limón, naranja, mandarina	Flavedo (Capa externa del fruto)
Romero, tomillo, ajedrea	Planta entera con flor
Melisa	Planta fresca
Manzanilla	Flor seca
Canela	Corteza
Cedro	Madera
Lima	Fruto entero
Mostaza	Semillas

I. Introducción

En general, los aceites esenciales están presentes en concentraciones muy bajas en las plantas, por lo que a menudo son difíciles de obtener y requieren grandes cantidades de material vegetal para cosechar y recolectar. Además, si se tiene en cuenta la volatilidad y las propiedades que cambian fácilmente de los aceites esenciales, vemos por qué son tan caros.

Los aceites esenciales se pueden encontrar en forma líquida, la mayoría son incoloros y volátiles, algunos son muy viscosos o semisólidos llamados bálsamos, y también podemos encontrar otros tipos como las oleorresinas [2].

I.1.1. CLASIFICACIÓN DE LOS ACEITES ESENCIALES

Los aceites esenciales se pueden clasificar según varios criterios: consistencia, origen y propiedades químicas de los componentes más concentrados [3].

- Según su **consistencia**, los aceites esenciales se clasifican en esencias fluidas, balsámicos y oleorresinas. Las esencias fluidas son líquidos volátiles a temperatura ambiente. Los bálsamos tienen una consistencia más viscosa, son menos volátiles y propensos a la polimerización. Las oleorresinas tienen aromas vegetales en forma concentrada, y suelen ser sustancias líquidas o semisólidas muy viscosas.



Figura 1. Clasificación de los aceites esenciales según su consistencia (oleorresinas, esencia fluida y bálsamos).

I. Introducción

- Según su **origen**, los aceites esenciales se dividen en naturales, artificiales y sintéticos. Los aceites esenciales naturales son aquellos que se obtienen directamente de las plantas y no sufren cambios físicos ni químicos posteriores, son sustancias muy caras por su bajo rendimiento. Los aceites esenciales artificiales son aceites obtenidos al someter la misma esencia a un proceso de enriquecimiento con uno o más componentes. Los aceites artificiales sintéticos son aquellos producidos por una combinación de sus ingredientes, generalmente por un proceso de síntesis química. Estos últimos son más baratos y, por lo tanto, más utilizados como aromatizantes y fragancias.
- Desde un punto de vista químico, aunque los aceites esenciales son complejos y contienen diferentes tipos de sustancias, se pueden clasificar según el tipo de las principales sustancias que predominan en ellos. En consecuencia, los aceites ricos en monoterpenos se denominan aceites esenciales monoterpenos, los ricos en sesquiterpenos se denominan aceites esenciales sesquiterpenos y los ricos en fenilpropanos se denominan aceites esenciales de fenilpropano. Además de los terpenoides, también podemos encontrar en los aceites esenciales compuestos alifáticos, siendo los más comunes los alcanos, alcoholes, aldehídos, cetonas, ésteres y ácidos.

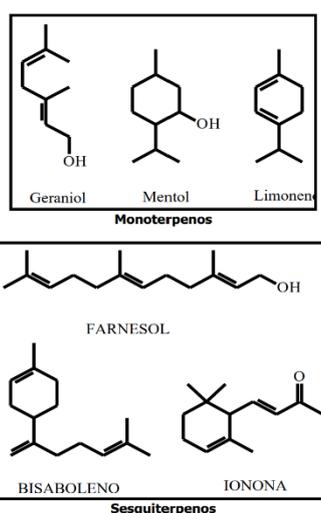


Figura 2. Ejemplo de Mono- y Sesquiterpenos naturales.

I. Introducción

I.1.2. PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE LOS ACEITES ESENCIALES

En los aceites podemos encontrar distintas propiedades físicas. Las propiedades físicas son aquellas propiedades que son medibles y que nos sirven para poder definir el estado físico del aceite esencial. Dentro de las propiedades fisicoquímicas de los aceites esenciales y sus componentes podemos citar las siguientes:

- **Volatilidad:** suelen ser volátiles a temperatura ambiente
- **Inestabilidad:** son muy reactivos
- Solubles en solventes orgánicos
- Liposolubles
- Muy poco solubles en agua, aunque son arrastrables por el vapor de agua
- **Poder rotatorio.** El poder rotatorio específico, de un aceite esencial, es el ángulo sobre el cual rotaría el plano de polarización de la luz si éste atravesara un espesor de 1 dm de una solución convencional de aceite esencial que contuviera 1 g de sustancia activa por mililitro [4].
- **Índice de refracción elevado.** A 20°C el índice de refracción de los aceites esenciales suele oscilar entre 1,3 y 1,7.
- Densidad menor que la del agua (salvo excepciones)
- Generalmente son líquidos a temperatura ambiente
- Translucidos y de coloración amarillenta

I.1.3. BENEFICIOS DE LOS ACEITES ESENCIALES

En cuanto a los beneficios que los aceites esenciales tienen respecto a la sociedad son muy variados, pudiendo distinguir [5]:

- **Actividad farmacológica.** Los aceites esenciales no son utilizados con una forma farmacéutica definida y con una dosis precisa, pero por sus aplicaciones podría ser considerado como un alcaloide o un antibiótico. Son muchas las propiedades farmacéuticas que se les atribuye a los aceites esenciales como bactericida o antimicótica. Hay que tener en cuenta que algunas esencias presentan grados de toxicidad y por lo tanto es necesarias manejarlas y aplicarlas con total seguridad y conocimiento.
- **Acción antiséptica y bactericida.** La potencia antiséptica depende mucho de los compuestos activos presentes, los más activos son los aceites esenciales ricos en fenoles. Estas esencias son muy utilizadas para problemas en las vías respiratorias y como antiséptico bucal o pasta dental.
- **Acción antihelmíntica y parasitaria.** Se está desaconsejando el uso de aceites esenciales que tienen esta propiedad a no ser que sea bajo la responsabilidad de un profesional de la salud, ya que estos aceites esenciales tienen su dosis efectiva muy cerca de la dosis tóxica.
- **Efectos sobre el sistema nervioso central.** Existen esencias con efectos sedantes o euforizantes cuando son inhaladas. Se ha demostrado el efecto de la lavanda en caso de insomnio seniles. Es tradicional el uso de la valeriana como tranquilizante, aunque no se conozca con seguridad si esta acción se debe a la esencia de la planta, a los valepotriatos o es una sinergia de efectos.
- **Efectos sobre el aparato respiratorio.** Además de las esencias usadas como antisépticas en infecciones de las vías respiratorias superiores, hay otras esencias que se usan como expectorante.

I. Introducción

I.2. SITUACIÓN DE MERCADO

En esta sección se estudiará en primer lugar un análisis de mercado a nivel internacional, analizando tanto la situación en la que se encuentran actualmente como la evolución de años anteriores. Por otra parte, se tendrá también en cuenta para el análisis las previsiones que tienen distintos organismos para este mercado. Además, se comentará cuáles podrían ser los aceites esenciales más interesantes a nivel comercial.

I.2.1. ANÁLISIS DE MERCADO INTERNACIONAL

Según los datos recogidos por *"The Observatory of Economic Complexity"*, para el año 2019, la economía de los aceites esenciales y, por tanto, el mercado de estos estuvo dominado tanto en importaciones como en exportaciones por los países de Asia como conjuntos, entre los cuales podemos destacar India, China, Indonesia, Emiratos Árabes. Los Países Europeos (Francia, Alemania, Italia, España, Reino Unido, ...) también tienen una gran participación en este mercado y por eso se encuentran detrás de Asia como principales importadores y exportadores. A estos dos continentes, les sigue América del Norte, América del Sur, África, Oceanía y Antártida con una participación en el mercado bastante inferior respectivamente a la ofrecida por Asia y Europa.

Un dato curioso es que los países con mayores importaciones y exportaciones no se encuentran en Europa, si no que pertenecen a Asia y América del Norte.

Para el caso de las importaciones, es EE. UU el que lidera el mercado con un 18% de las importaciones a nivel mundial de aceites esenciales [6]. En las exportaciones el escenario es completamente distinto, el país que lidera las exportaciones a nivel nacional de aceites esenciales es India con un 18,5% [6].

I. Introducción

En la **Figura 3** se muestran los principales continentes exportadores e importadores a nivel internacional para el año 2019.

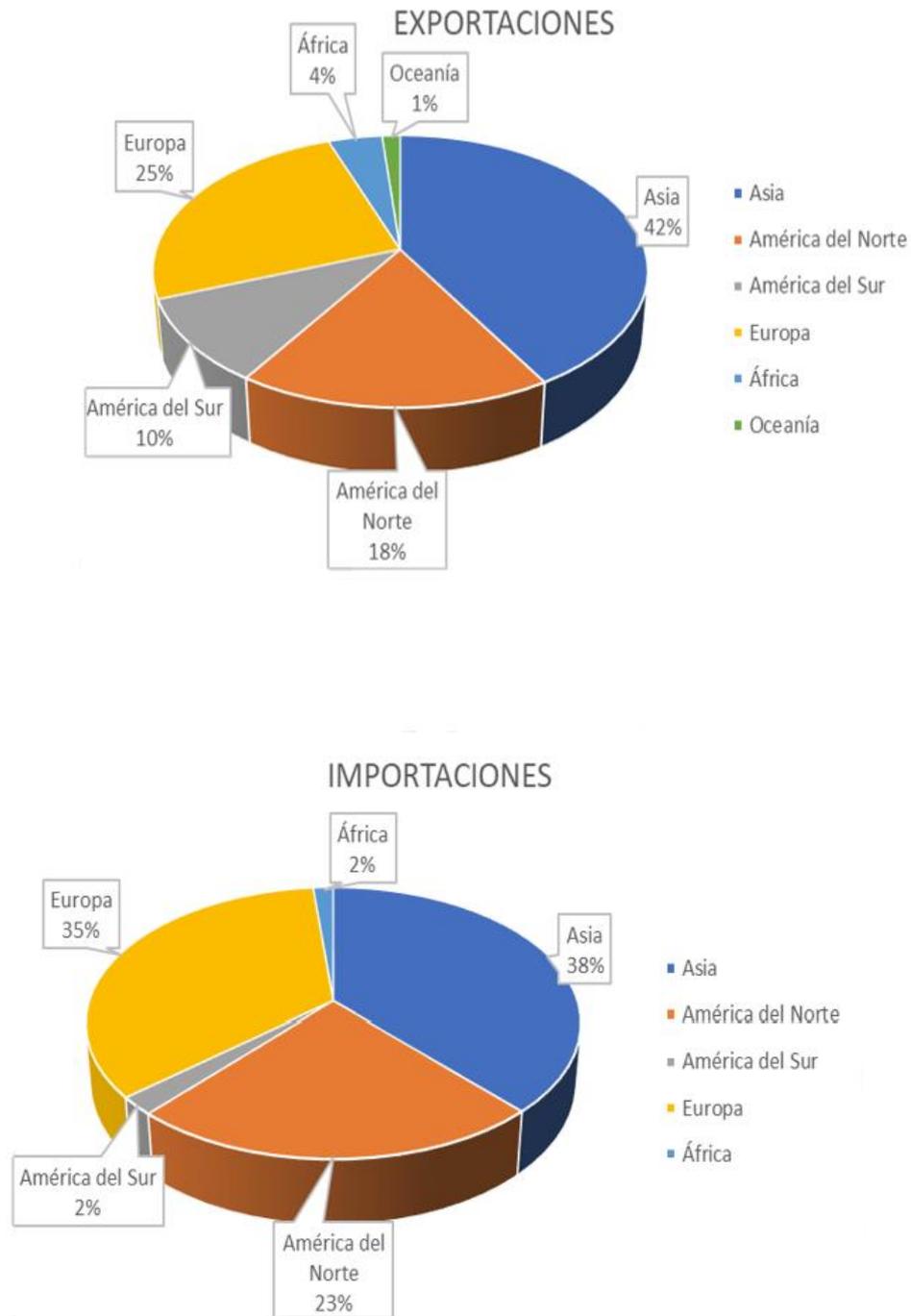


Figura 3.Exportaciones e importaciones a nivel internacional de los aceites esenciales por continente (2019) Datos OEC [6].

I. Introducción

I.2.2. ANÁLISIS DE MERCADO NACIONAL

En este apartado vamos a realizar un análisis de mercado centrándonos en el nivel nacional, en concreto a lo que a España le concierne. Vamos a tratar de analizar las exportaciones nacionales e internacionales que España realizó durante el año 2019.

- **En cuanto a las exportaciones:** según los datos obtenidos por “*The Observatory of Economic Complexity*”, en 2019 España exportó alrededor de 179 millones de dólares en aceites esenciales [6], convirtiéndose en el país exportador número 12 de aceites esenciales. Estos aceites esenciales corresponden con el producto número 317 más exportando en España en el año 2019. El destino de estos aceites esenciales son mayoritariamente países europeos, siguiendo de esta forma la tendencia de mercado internacional. En la **Figura 4** se muestra los principales destinos de las exportaciones españolas.

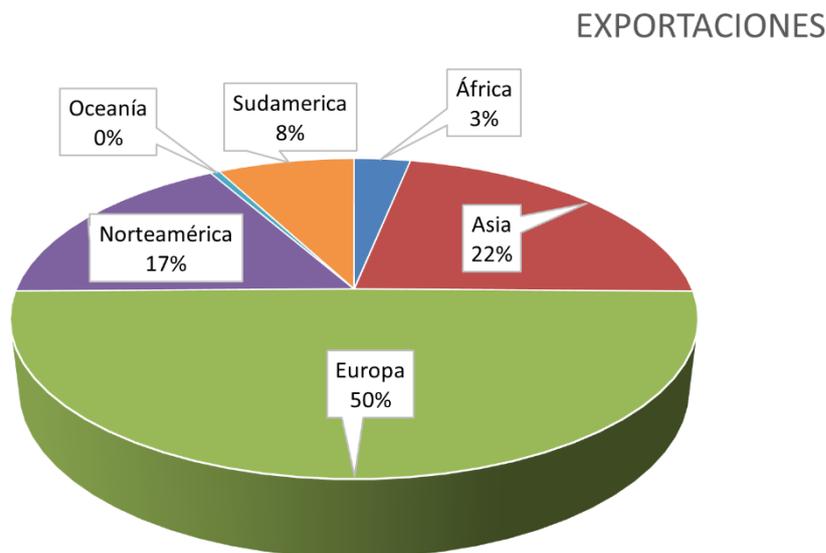


Figura 4. Exportaciones Españolas de aceites esenciales por continente (2019)
Datos OEC [6].

I. Introducción

- En cuanto a las importaciones: para el caso de las importaciones, los datos ofrecidos por “*The Observatory of Economic Complexity*” revelan que España importó alrededor de 138 millones de dólares en aceites esenciales en 2019 [6]. Convirtiéndose así en el país importador número 15. Estos aceites esenciales fueron el producto número 395 más importado en España durante el año 2019. Los países de los cuales España importó aceites esenciales durante el transcurso del año 2019 fueron mayoritariamente países de asiáticos, seguidos de muy de cerca de países europeos. En la **Figura 5** se muestran los principales orígenes de las importaciones españolas.

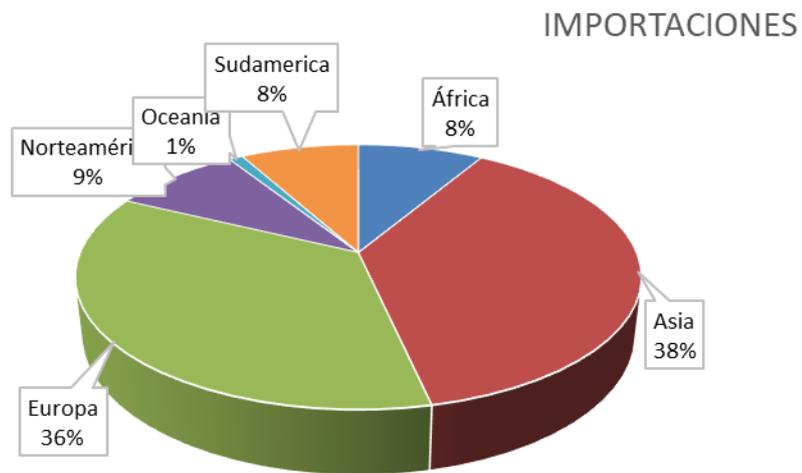


Figura 5. Importaciones Españolas de aceites esenciales por continente (2019)
Datos OEC [6].

I. Introducción

I.2.3. PREVISIONES SOBRE LA EVOLUCIÓN DE MERCADO

Según los datos que hemos podido obtener de “*Persistant Market Research*”, el consumo mundial de aceites esenciales para el año 2022 es de aproximadamente 497.959 toneladas [7]. Para el 2032 se prevé que el mercado mundial de los aceites esenciales aumente con una CAGR (tasa anual de crecimiento compuesta) del 7,7% para alcanzar una valoración de 39.140 millones de USD [7], es decir, se prevé que en cuestión de 10 años la valorización que toman los aceites esenciales aumente en un 52%.

En la **Figura 6** se puede observar la evolución de la producción mundial en base a la previsión proporcionada por “*Gran View Research*” para los años 2018 – 2025



Figura 6. Evolución de la producción mundial hasta 2025 según los datos obtenidos por "Gran View Research" [8].

I. Introducción

I.2.4. PREVISIONES LOS ACEITES DOMINANTES EN EL MERCADO

Una vez tenemos una clara idea de cuál es la proyección de este mercado de cara al futuro, conviene conocer también cuales son las expectativas sobre la previsión de los productos más demandados a nivel mundial. Para ello disponemos de la **Figura 7** publicada por “Grand View Research” la cual nos muestra la previsión del aumento de la demanda de distintos tipos de aceite esenciales en EE. UU, ya que como hemos comentado anteriormente EE. UU es el principal país importador a nivel mundial de aceites esenciales. Este hecho confirma que la previsión de la evolución de la demanda sea un buen indicador de cómo evoluciona el mercado internacional.

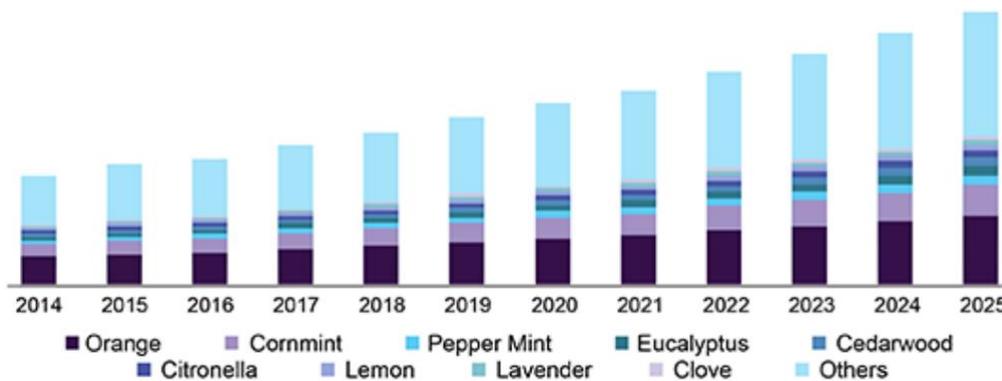


Figura 7. Evolución de la demanda de distintos aceites esenciales en EE. UU [9].

Como podemos apreciar en la **Figura 7** el aceite esencial de naranja va a ser el tipo de aceite esencial sobre el cual se tiene una expectativa muy alta en cuanto al aumento de su demanda en el futuro acompañados de los aceites esenciales de menta y los aceites esenciales de eucalipto. Otros aceites esenciales como el aceite esencial de limón, el aceite esencial de lavanda o el aceite esencial de limón no se observa un gran aumento en cuanto a la previsión de la demanda, pero tampoco un descenso de esta. Esto es buena señal ya que nos indica que nos encontramos ante un mercado en continuo crecimiento, y por los datos comentados, bastante estable.

Introducidos en este contexto “Grand View Research” analiza cuales son las causas por las que este mercado está en continua proyección alcista y dentro de que sectores comerciales hay una mayor demanda de estos aceites esenciales.

I. Introducción

Según esta revista, las razones de la proyección alcista de este mercado son:

- Aumento del sentido de los consumidores con respecto a los productos de cuidado personal.
- Aumento del sentido de los consumidores con respecto al consumo de productos naturales en vez de productos sintéticos.
- R&D. Desarrollo de nuevos procesos de producción más sofisticados, más económicos y respetuosos con el medio ambiente.
- Aumento de las aplicaciones en la industria alimentaria.

En cuanto a los sectores comerciales que mayor demanda de aceites esenciales tienen en 2020, se puede comprobar en la **Figura 8** que el sector que más influencia tuvo sobre la demanda de aceites esenciales es el sector dedicado al Spa y a la relajación seguido de muy de cerca del sector de la alimentación, como comentábamos anteriormente.

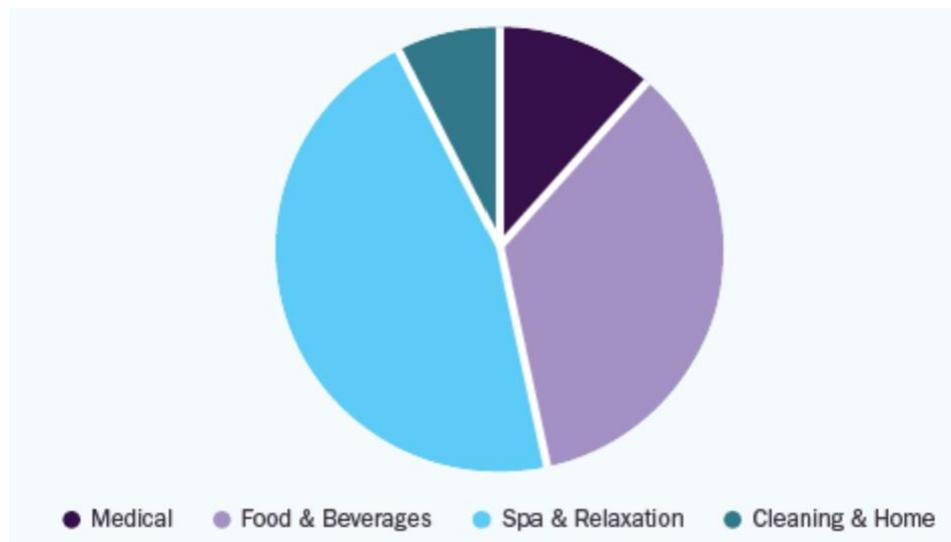


Figura 8. Volumen de compras de aceites esenciales a nivel internacional por sector comercial [9].

I. Introducción

I.3. MÉTODOS DE EXTRACCIÓN

Una vez ya conocemos los aceites esenciales, es importante estudiar cómo vamos a extraer estas esencias de la planta. Hoy en día se conocen multitud de técnica para poder extraer estos aceites esenciales, pero no todos ellos son efectivos. Los métodos de obtención de los aceites esenciales dependerán, en gran medida, del tipo de material a procesar. Los principales métodos utilizados para obtener aceites esenciales a partir de plantas son los siguientes:

- Destilación
- Extracción
- Técnica del prensado

I.3.1. DESTILACIÓN

I.3.1.1 DESTILACIÓN CON AGUA (HIDRODESTILACIÓN)

El principio de la destilación con agua es llevar al estado de ebullición una suspensión acuosa de un material vegetal aromático, de tal manera que los vapores generados puedan ser condensados y colectados. El aceite que es inmisible en agua es posteriormente separado.



Figura 9. Esquema del proceso de destilación con agua [10].

En la destilación con agua el material vegetal debe encontrarse siempre en contacto con el agua. Un factor de especial importancia a considerar es que, si el

I. Introducción

calentamiento del extractor es llevado a cabo con fuego directo, tiene que haber suficiente agua y permanente para llevar a cabo la destilación completa a fin de evitar el sobrecalentamiento y la carbonización del material vegetal. De esta forma, se evita olores desagradables en el producto final. Es aconsejable mantener en continua agitación la materia vegetal dentro del extractor con el fin de evitar aglomeraciones o sedimentaciones en el fondo del recipiente.

Los aceites esenciales obtenidos presentan normalmente notas aromáticas más fuertes, un color más oscuro y en general de menor calidad que los obtenidos por otros métodos.

En cuanto a las ventajas de este método de obtención podemos destacar [10]:

- Útil en zonas rurales donde no se dispone de instalaciones para la generación de vapor.
- Útil cuando el material vegetal tiende a aglomerarse.
- Bajo coste del equipo.
- No requiere energía eléctrica.

En cuanto a las desventajas, podemos citar las siguientes:

- Algunos componentes aromáticos se degradan o polimerizan.
- Es imposible remover completamente los compuestos oxigenados.
- Tiempos demasiado largos afectando a la calidad del aceite obtenido.
- Menor eficiencia energética con respecto a otros métodos de destilación.

I. Introducción

I.3.1.2. DESTILACIÓN POR ARRASTRE CON VAPOR DE AGUA

Se considera el más simple, seguro y antiguo, y se basa en que la mayoría de las sustancias aromáticas de la materia vegetal pueden ser arrastradas por el vapor de agua. Se trata de la evaporación a temperaturas por debajo del punto de ebullición de cada componente volátil debido al paso de vapor de agua.

El arrastre de los aceites esenciales con el vapor de agua dependerá de la compactación del material y de su permeabilidad. Por lo general, se usa baja presión para que los componentes del aceite esencial no se deterioren por la influencia de la alta temperatura.

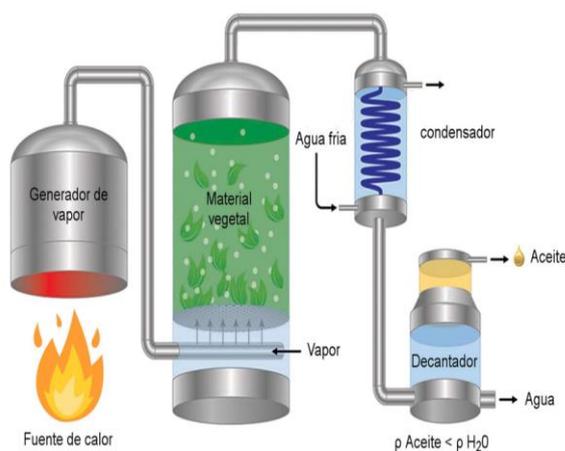


Figura 10. Esquema del proceso de destilación de arrastre con vapor de agua [11].

Las ventajas que presenta esta técnica de obtención son las siguientes [10]:

- Buen rendimiento y alta pureza.
- Permite procesar una gran cantidad de material a la vez.
- El vapor de agua es muy económico en comparación al coste de otros métodos.
- El proceso se lleva a cabo a temperaturas inferiores a la de ebullición de los componentes por lo que el aceite esencial no se recalienta.
- No requiere el uso de equipos sofisticados.

I. Introducción

En cuanto a las desventajas que presenta este método de obtención podemos citar las siguientes:

- Suelen producirse emulsiones directas e inversas que son muy estables y difíciles de separar.
- Si esto se produce es necesario someter a la emulsión a un proceso de separación para recuperar la esencia y descontaminar el agua.

I.3.1.3. DESTILACIÓN CON AGUA - VAPOR

En este caso, el vapor se genera dentro del propio extractor, pero separado del material vegetal suspendido sobre una rejilla (falso fondo) que evita que el material vegetal entre en contacto con el medio líquido en ebullición. En comparación con la hidrodestilación, este sistema reduce la capacidad de carga neta de la materia prima en el extractor, pero mejora la calidad del aceite resultante.



Figura 11. Esquema del proceso de destilación con agua y vapor [11].

I. Introducción

I.3.2. EXTRACCIÓN

I.3.2.1. CON SOLVENTES ORGÁNICOS

Mediante este proceso se obtienen lo que se conocen como oleorresinas que contiene, además de los aceites esenciales, grasas, ceras y pigmento, variando su composición final en función del solvente utilizado.

El proceso consiste básicamente en fragmentar el material y ponerlo en contacto con el solvente para que penetre dentro de los tejidos y estructuras, y así extraer los componentes solubles. Luego se filtra el líquido y por último se recupera el disolvente, el cual es reutilizado. Entre los solventes comúnmente utilizados acetona, alcohol, éter y benceno.

Existen muchas alternativas a este proceso, pero la siguiente imagen extraída de Bandoni, 2003 [12] muestra un esquema general del proceso.

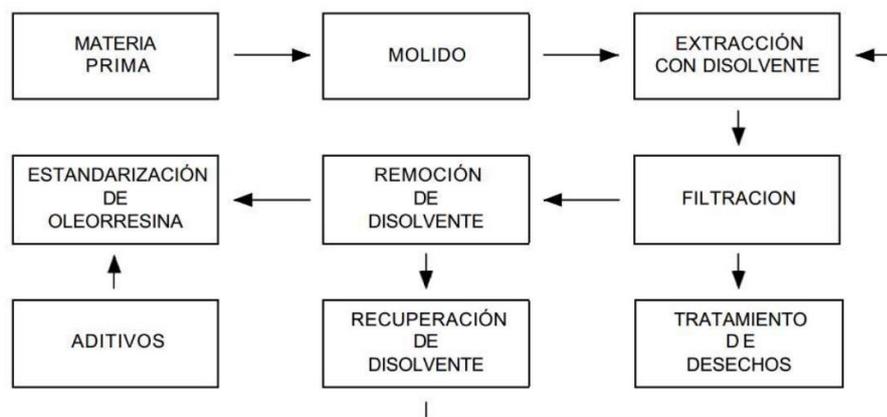


Figura 12. Diagrama general del proceso de obtención de oleorresinas.

I. Introducción

I.3.2.1. CON SUSTANCIAS GRASAS

Este método de obtención se puede realizar a través de dos vías:

- **En frío:** Denominado también “enflorado”, este proceso aprovecha la solubilidad de los aceites en grasas y alcohol. Sobre un vidrio se coloca una fina película inodora y sobre ella los pétalos de flores extendidas. La esencia pasa a la grasa hasta su saturación. Posteriormente, con alcohol de 70°C, se extrae el aceite esencial. Se emplea para flores con bajo contenido en esencias, pero muy preciadas.
- **En caliente:** Los pétalos de las flores se sumergen en grasa caliente. La temperatura elevada permite una mayor extracción de compuestos ya que la solubilidad aumenta con la temperatura, por lo que se produce un mejor rendimiento que el enflorado. Las esencias son posteriormente extraídas con alcohol.

Hay que comentar que el uso de estos solventes hace el proceso en cierta medida menos viable medioambiental y económicamente si lo comparamos con la técnica de arrastre con vapor de agua (método elegido para la realización de este proyecto).

I.3.3. TÉCNICA DEL PRENSADO

Estos tipos de procesos son generalmente aplicados a los cítricos. La extracción del aceite se realiza sobre la fruta entera o sobre la cáscara, que es donde habitualmente se encuentra la esencia. La expresión puede hacerse de forma manual o mecánica, aunque lo más habitual realizarla de forma mecánica para poder obtener un mayor grado de rendimiento.

El proceso se basa en romper las glándulas secretoras de aceite y en recolectar la esencia. La extracción del aceite se produce en varias etapas que enumeramos a continuación:

- Corte de la epidermis y celdas que contienen la esencia.
- Creación de zonas de mayor presión para favorecer que la esencia fluya hasta el exterior.
- Abrasión de la cáscara

Dentro de la expresión mecánica podemos encontrar tres principales métodos:

- De la escudilla. Consiste en hacer rodar el fruto por rodillos a los cuales se les han insertado púas de distinta longitud diseñadas para lograr penetrar en la epidermis del fruto y así poder romper las glándulas secretoras de aceites (oleíferas). Los glóbulos de aceite caen sobre una bandeja y posteriormente se recogen.
- De la esponja. La fruta se parte, se separa de su cáscara, posteriormente se sumerge varias horas para finalmente presionarlo sobre una esponja que retiene las pectinas. La esponja seguidamente se prensa separando dos fracciones: la esencia y el agua.
- Prensado. Este proceso involucra la abrasión de la piel. A medida que se extrae el aceite se agrega agua con el fin de lavarlo de la piel, formando así un líquido viscoso. Este líquido es llevado a un prensado final que separa el aceite de los restos de la cáscara. La solución restante de aceite es centrifugada (8000 - 10000 rpm) para separar la fracción rica de aceite una solución acuosa que podemos reutilizar en el proceso y un material semisólido. La fracción rica en aceite se vuelve a centrifugar (16000 - 18000 rpm) obteniéndose otras nuevas dos fases, una aún más rica en aceite y otra solución acuosa. Luego se deja decantar y se filtra.

I. Introducción

Hay que tener en cuenta que la técnica del prensado presenta algunas ventajas, pero también tiene inconvenientes que se tienen que considerar:

Tabla 2. Ventajas y desventajas de la técnica del prensado [13].

Ventajas	Desventajas
Moderados costes de inversión	Proceso discontinuo
Máquinas de funcionamiento sencillo	Menor velocidad del proceso
Potencia eléctrica y consumo reducidos	Elevado espacio necesario
No precisa añadir agua	Necesidad de mano de obra

I. Introducción

I.4. ACEITE ESENCIAL “SALVIA ROSMARINUS”

Para realizar este proyecto, elegimos el aceite esencial "*Salvia Rosmarinus*" conocido tradicionalmente como Romero. Se eligió esta planta porque el proyecto estará basado en España y nuestra flora es muy rica debido a su clima. Según un informe sobre el romero publicado en la web de la Región de Murcia, en España las zonas con mayor población de romero se encuentran en la costa mediterránea y en algunas zonas montañosas del interior peninsular. Destacan la costa catalana, los Pirineos, el sur y este de Castilla-La Mancha, la Región de Murcia, la Comunidad Valenciana, Andalucía y Baleares. Si nos explayamos un poco más y hablamos de la localidad de Alcoy, situada en la provincia de Alicante, encontraremos que el romero es común, ya que estamos cerca de la costa mediterránea y el clima es favorable para su población [14].

Este dato da fuerza al proyecto ya que abarataría los costes de obtención de materia prima, así como los costes de transporte de ésta. Esto significaría un aumento de la productividad en la extracción.



Figura 13. Planta de romero.

I. Introducción

En el romero se encuentran dos principales constituyentes activos:

- Los flavonoides. La estructura química básica de los flavonoides consiste en un esqueleto carbonado C₆-C₃-C₆, donde los componentes C₆ son anillos aromáticos unidos por tres átomos de carbono que pueden formar o no un tercer anillo pirano.
- Los di y triterpenoides. Son moléculas con 20 y 30 átomos de carbono respectivamente

Sus moléculas fenólicas pueden atrapar radicales libres e incrementar de forma indirecta la producción de antioxidantes celulares endógenos. La actividad antimicrobiana de los extractos y aceite esencial del romero es atribuida principalmente al α -pineno, el acetato de borneol, el alcanfor y el 1,8-cineol.

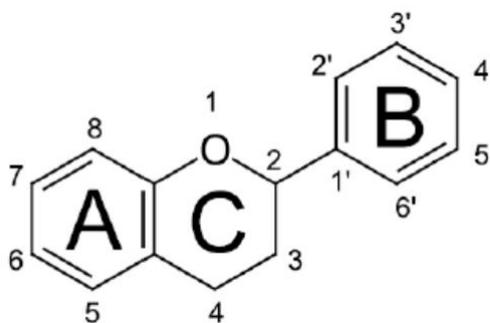


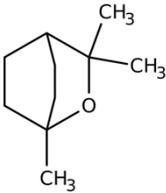
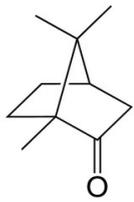
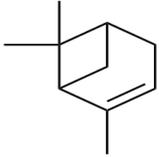
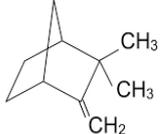
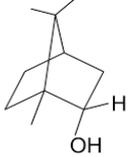
Figura 14. Estructura química general de los Flavonoides [15].

El romero posee alrededor de un 0,5 - 2,5 % de aceite esencial, el cual está conformado en su mayor parte por una serie de extractos activos que se detallan en la **Tabla 3** junto con el porcentaje de abundancia en el aceite esencial, así como la estructura química de cada uno de ellos [16].

El aceite esencial de mayor calidad es obtenido de sus hojas, donde se encuentra la mayoría de los tricomas glandulares que lo secretan.

I. Introducción

Tabla 3. Principales compuestos activos del aceite esencial de romero junto con el porcentaje de abundancia y su estructura química [16].

Extractos activos	Rango de concentración	Estructura química
1,8-cineol	15 - 50 %	
Alcanfor	15 - 25 %	
α -pineno	10 - 25 %	
Canfeno	5,2 - 8,6 %	
Borneol	3,2 - 7,7 %	

Sus aceites esenciales y extractos son antibacterianos y tienen propiedades antioxidantes, antinefrotóxicas, antiinflamatorias, antitumorales, antihepatotóxicas, antiartríticas, neuroprotectoras y anticancerígenas. Los principales usos del romero son como agente saborizante en la industria cosmética y alimentaria, como estimulador del crecimiento del cabello, como fragancia en la elaboración de perfumes y esencias, como aditivo en champús, cremas y jabones, como colorante natural en lociones y en enjuagues bucales [17].

I. Introducción

En la medicina tradicional se ha utilizado para tratar el asma bronquial, la epilepsia, los dolores de cabeza, los trastornos gastrointestinales, los cólicos biliares y renales, para controlar el placer, la pérdida de apetito, los trastornos circulatorios, para complementar el dolor y la inflamación muscular, y como antiespasmódico, diurético, antirreumático, antidepresivo, ansiolítico, mejora de la memoria, enfermedades respiratorias y muchas otras aplicaciones. [17].

Según la ficha técnica de una empresa dedicada a la venta de aceite esencial de romero, "*Ventos Leaders in essence*", hemos podido conocer cuáles son sus propiedades fisicoquímicas en cuanto a valores numéricos se refiere.

Tabla 4. Propiedades fisicoquímicas del aceite esencial de romero [18].

ESPECIFICACIONES	
Aspecto a 20°C	Líquido fluido transparente
Color	Amarillo pálido
Olor	Fresco, amaderado, herbáceo
Sabor	Especiado
Densidad a 20°C (g/ml)	0,893 - 0,916
Índice de refracción	1,4670 - 1,4740
Rotación óptica	-5,00 / 5,00
Punto de inflamación (°C)	43,00
Solubilidad	Insoluble en agua. Soluble en etanol

De esta misma empresa, "*Ventos Leaders in essence*", hemos podido obtener un precio orientativo el cual ronda los 90 €/Kg [18].

Si analizamos la posición de mercado del aceite esencial de romero, podemos observar según los datos recogidos por "*Data Bridge Market Research*", que el mercado de los aceites esenciales de romero está en pleno crecimiento, obteniendo una proyección del CAGR del 5,90% para el periodo pronosticado, el cual comprende entre 2021 y 2028 [19]. Se espera de esta misma forma, que el mercado alcance los 0,3 billones de dólares para el 2028 [19].

I. Introducción

En la **Figura 15** se puede observar gráficamente el aumento del mercado mundial de los aceites de romero para los distintos continentes del mundo.

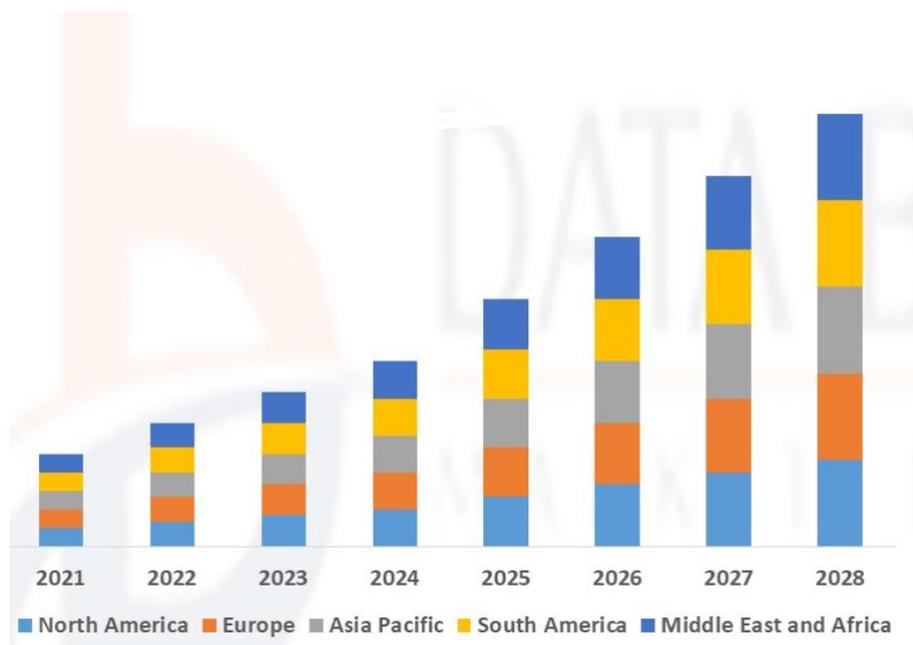


Figura 15. Previsión de aumento de los aceites esenciales de romero para cada continente [19].

II. OBJETIVO

II. Objetivos

II.1. OBJETIVO GENERAL

El objetivo general del presente proyecto es la producción diaria de 11,76 kg de aceite esencial mediante extracción con arrastre de vapor de agua. La planta trabajará por lotes durante tres turnos al día de 8 horas.

II.2. OBJETIVOS PARTICULARES

Para poder cumplir el objetivo general que motiva el proyecto, se deberán cumplir los siguientes objetivos particulares:

- Estudiar una serie de balances de materia y de energía sobre una planta de extracción del aceite esencial escogido particularmente.
- Abordar el diseño y dimensionamiento de todos los equipos necesarios para que la planta de extracción funcione correctamente.
- Obtener los costes de inversión de la planta y la rentabilidad de esta para estudiar si el proyecto tiene una viabilidad económica aceptable.
- Proponer una serie de posibilidades de mejora para la planta de extracción que ayuden a elevar el rendimiento de extracción con relación al tiempo invertido en cada etapa del proceso.

II.3. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)

En cuanto a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), el actual proyecto trabaja los siguientes objetivos [20]:

- Objetivo 9: Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación. Tal y como se describe en el propio objetivo, el actual proyecto promueve una industrialización inclusiva y sostenible, los cuales, junto con la innovación y la infraestructura, pueden dar rienda suelta a las fuerzas económicas dinámicas y competitivas que generan el empleo y los ingresos. Estas desempeñan un papel clave a la hora de introducir y

II. Objetivos

promover nuevas tecnologías, facilitar el comercio internacional y permitir el uso eficiente de los recursos

- Objetivo 12: Producción y Consumo Responsables, ya que el consumo y la producción mundial (fuerzas impulsoras de la economía mundial) dependen del uso del medio ambiente natural y de los recursos de una manera que continúa teniendo efectos destructivos sobre el planeta. El progreso económico y social conseguido durante el último siglo ha estado acompañado de una degradación medioambiental que está poniendo en peligro los mismos sistemas de los que depende nuestro desarrollo futuro (y ciertamente, nuestra supervivencia).

III. DESARROLLO DEL PROYECTO

III. Desarrollo del proyecto

III.1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

En el diagrama de bloques que se muestra a continuación se muestran las operaciones básicas que constituyen el proceso, sin mencionar en detalle, los equipo que forman cada operación básica. Se muestran de la misma manera las corrientes de entrada y de salida de todo el proceso en general.

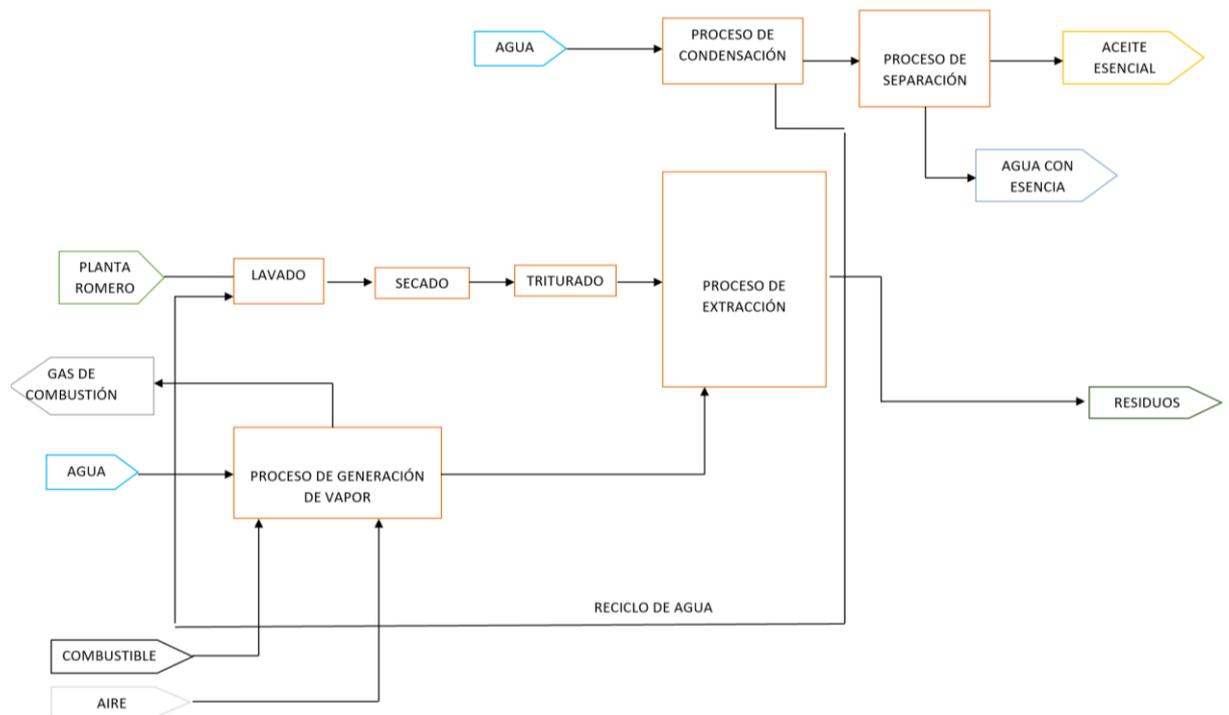


Figura 16. Diagrama de bloques de la planta de extracción.

La planta de romero cosechada se somete a unos pretratamientos con el fin de acondicionar esta materia prima para la obtención de aceite esencial mediante la extracción con vapor y su posterior condensación y separación.

III. Desarrollo del proyecto

III.2. EQUIPOS

Se detalla a continuación las diferentes zonas del diagrama de bloques, explicando la finalidad de cada una de las etapas, la operación que se lleva a cabo en cada etapa, los equipos necesarios para la realización de las operaciones y los dimensionamientos más importantes de estos equipos. Podemos encontrar el diagrama de flujo de todo el proceso de obtención de aceite en el Anexo VI.2. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA PLANTA.

III.2.1. ZONA DE PRETRATAMIENTO

Si analizamos el diagrama de bloques mostrado en la **Figura 16**, la primera zona que nos encontramos es la de pretratamiento de la materia prima. En esta zona se realizan las siguientes operaciones:

- Operación del lavado de la materia prima
- Operación de secado
- Operación de trituración o molienda

En la **Figura 17** podemos observar la zona de pretratamiento de la materia prima del diagrama de flujo.

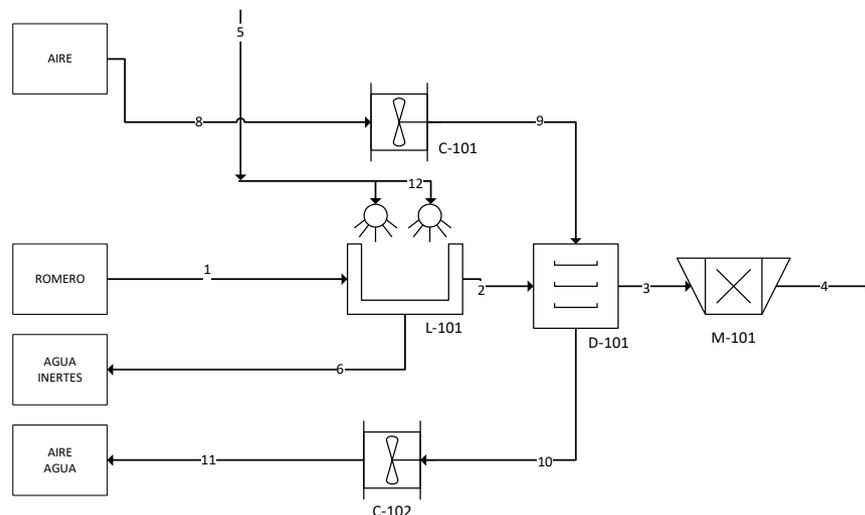


Figura 17. Zona de pretratamientos en el diagrama de flujo

Tabla 5. Relación de los códigos de los equipos con las etapas del proceso y sus corrientes.

III. Desarrollo del proyecto

CÓDIGO	ETAPAS DEL PROCESO	CORRIENTES PARTICIPATIVAS
C-101	Ventilador centrífugo (introduce aire al proceso de secado)	<ul style="list-style-type: none">• 8: Corriente de aire que alimenta el ventilador• 9: Corriente de aire que sale del ventilador centrífugo
C-102	Ventilador centrífugo (extrae aire del proceso de secado)	<ul style="list-style-type: none">• 10: Corriente de aire con agua que sale de la etapa de secado y entra en el ventilador• 11: Corriente de aire con agua que sale del ventilador.
D-101	Etapa de secado	<ul style="list-style-type: none">• 2: Corriente de romero que sale de la etapa de lavado• 9: Corriente de aire seco que proviene del ventilador (C-101)• 10: Corriente de aire con agua resultante del secado• 3: Corriente de romero que sale del proceso de secado
L-101	Etapa de lavado	<ul style="list-style-type: none">• 1: Corriente de romero fresco• 12: Corriente de agua que alimenta las boquillas de pulverización• 6: Corriente de agua que sale de la etapa de lavado• 2: Corriente de romero que sale de la etapa de lavado
M-101	Etapa de triturado	<ul style="list-style-type: none">• 3: Corriente de romero que sale de la etapa de secado• 4: Corriente de romero que sale de la etapa de triturado

III. Desarrollo del proyecto

III.2.1.1. OPERACIÓN DE LAVADO

Suponemos que toda la materia prima de romero fresco proviene directamente de su recolección. Como consecuencia, es muy importante que esta materia prima sea previamente lavada para poder eliminar las materias de inertes como insectos, tierra, polvo y otras materias biológicas que afectan de forma negativa en la calidad de las operaciones posterior a la del lavado. Para poder realizar esta operación con la mayor eficiencia posible se ha elegido el lavador el facilitado por la empresa "AMBITIOUS" cuyo modelo elegido ha sido el TSXQ-80 ya que nos proporciona una gran capacidad de materia prima a tratar ($300 - 500 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$).



Figura 18. Lavadero de materiales vegetales. Modelo TSXQ-80

El principio de funcionamiento del lavadero LG-5000 es que el romero recién recolectado entra en el lavadero y en primer lugar es sometido a un burbujeo de alta presión una vez es introducida la materia prima en el agua. Esto se consigue gracias a un generador de burbujas instalado en el tanque de almacenamiento de agua. El objetivo principal de este burbujeo a alta presión es conseguir frotar y hacer rodar el material para de alguna forma tener cierta similitud con el lavado manual.

Para mejor la eficiencia en el proceso de lavado, se ha elegido este modelo porque tiene incorporado en su estructura unas válvulas de pulverización localizadas por encima del material herbáceo y el agua. Este proceso se conoce con el nombre de lavado secundario.

III. Desarrollo del proyecto

En segundo lugar, una vez el material vegetal va avanzando en el proceso de lavado, este se eleva por la cintra transportadora, mientras que se sigue pulverizando agua sobre el material vegetal para acabar de eliminar las impurezas que puedan haber quedado después de los dos lavados anteriores.

Por último, hay que comentar que, si se necesita desinfectar, se puede añadir un desinfectante al agua o instalar un generador de ozono que permita la esterilización y desinfección de la materia vegetal.

III. Desarrollo del proyecto

III.2.1.2. OPERACIÓN DE SECADO

El secado consiste en la eliminación de agua en exceso que posee el material. Para cada planta medicinal existe unos determinados valores preestablecidos de contenido en agua, que deben cumplirse para su comercialización.

Un secado de forma eficiente permite [20]:

- Evitar la proliferación de microorganismos
- Evitar cambios de pigmentación y ennegrecimiento del material vegetal
- Lograr un producto homogéneo y de buen color
- Conservación de las esencias y sustancias antioxidantes

El proceso de secado depende de las condiciones ambientales que rodeen el producto: temperatura, humedad relativa y velocidad el aire.

De forma general, las condiciones ideales para el secado del material herbáceo son [20]:

- Temperatura entre 30 - 40 °C
- Humedad relativa entre el 40 - 60 %
- Tiempo de secado: 2 - 3 días en primavera-verano y de 3 - 6 días en otoño-invierno

La pérdida de peso, asociada a la eliminación de agua que tiene en exceso el material vegetal depende de la especie, del órgano de la planta que se vaya a utilizar y de la época de recolección. En la **Tabla 5** se muestra para distintas plantas, la cantidad de materia vegetal verde que se necesita para obtener un kilogramo de material vegetal seco.

III. Desarrollo del proyecto

Tabla 6. Kilogramo de hierba verde necesarios para obtener luego del secado [20]

PLANTA MEDICINAL	Kg verde / Kg seco
Ajedrea	4
Laurel hojas	4
Orégano	4
Romero	4
Salvia	4
Eneldo	5
Estragón	5
Tomillo	5

Para el secado del romero se ha optado por un secadero de platos perforados o también conocido como secadero de bandejas. Este tipo de equipo de secado es el más utilizado a nivel industrial para tratar todo tipo de hierbas. Se trata de equipos en operación discontinua, es decir, se introduce una cierta cantidad de material vegetal a tratar y cuando se ha completado el proceso, se introduce otra cantidad de materia a tratar. Por otra parte, hay que tener especial cuidado en el secado de plantas para un posterior proceso de producción de aceites esenciales ya que, si la temperatura de secado es muy alta, las moléculas del material vegetal empezarán el proceso de degradación que supondría la liberación de las moléculas de aceite esencial. Este hecho supondría un efecto negativo en cuanto al rendimiento de la extracción ya que en una de las primeras etapas del proceso ya estaríamos perdiendo nuestro producto objetivo [21]. También hay que tener especial cuidado en cuanto a la humedad relativa, ya que, si se quiere que al final del proceso de secado, el material este completamente seco, es decir, con una humedad relativa del aire a la salía sea aproximadamente del 100% puede existir riesgo debido a condensaciones en el proceso.

El secadero de platos perforados consiste, de forma general en una cabina aislada provista interiormente de un ventilador para circular aire a través de un calentador; el aire caliente sale por una rejilla de láminas ajustables y es dirigido, bien, horizontalmente entre bandejas cargadas de hierba, o bien, verticalmente a través de las bandejas perforadas y el producto.

III. Desarrollo del proyecto

Estos secaderos pueden disponer de reguladores para controlar la velocidad de aire nuevo y la cantidad de aire para la recirculación. Los calentadores del aire pueden ser quemadores directos de gas, serpentines calentados por vapor o, en los modelos más pequeños, calentadores de resistencia eléctrica.

Por regla general, en los sistemas de cabina se utilizan velocidades de aire, para los de flujo transversal, de 2 a 5 $\frac{m}{seg}$, y en los de flujo ascendente de 0,5 a 1,25 $\frac{m^3}{seg}$ de bandeja [22].

Los secaderos de cabina resultan relativamente baratos de construcción y de mantenimiento y son muy flexibles.

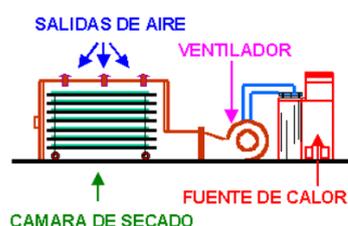


Figura 19. Esquema de un secador de platos perforados [22]

Como se ha comentado anteriormente para realizar esta operación se requiere de resistencias cuya función es calentar el aire que entra a la cámara de secado. Estas resistencias serán principalmente tubulares lisas. Su principal función es la de calentar una corriente gaseosa o líquida a una determinada temperatura preestablecida o también son incluso capaces de mantener el espacio a una determinada temperatura constante.

Este tipo de resistencias son las más utilizadas debido a su gran variedad en la forma y en su tamaño que les dota de la capacidad de poder instalarse para el calentamiento directo o indirecto.

III. Desarrollo del proyecto



Figura 20. Ejemplo de resistencia eléctrica tubular lisa y blindada [23]

Este tipo de resistencias se utilizan generalmente para una carga superficial de $0,5 - 4 \frac{W}{cm^2}$. En el caso de tener que trabajar con caudales de aire o gas circulante elevados, se pueden alcanzar potencias en la resistencia entre 3 y $7 \frac{W}{cm^2}$. [23].

III. Desarrollo del proyecto

III.2.1.2. OPERACIÓN DE TRITURACIÓN

Para obtener una mayor cantidad de aceite esencial extraído, es decir, para mejorar el rendimiento de la extracción se ha decidido por instalar en la planta una etapa en la cual el material herbáceo ya lavado y secado, es triturado.

Para realizar esta operación se ha optado por elegir un molino de martillos, idóneo para la molienda de materiales herbáceos. Este molino será elegido por catálogo de la empresa “SCHUTTE HAMMERHILL” y el modelo que elegiremos será el W-8-LH ya que es capaz de poder trabar entre 1,5 - 4 kW de potencia.



Figura 21. Molino de martillo W-8-LH [24]

Este modelo de molino nos proporciona la posibilidad de reemplazar las placas de desgaste internas si se van a tratar materiales un tanto abrasivos. Nos proporcionan numerosas mallas que se pueden instalar de manera sencilla para obtener el tamaño de partícula deseado. Y por último nos proporciona una amplia selección de martillos reversibles de cuatro direcciones [24].

III. Desarrollo del proyecto

III.2.2. ZONA DE EXTRACCIÓN

En el siguiente apartado se explica la zona de extracción del aceite esencial donde se incluye el extractor y el condensador. Véase la **Figura 22**.

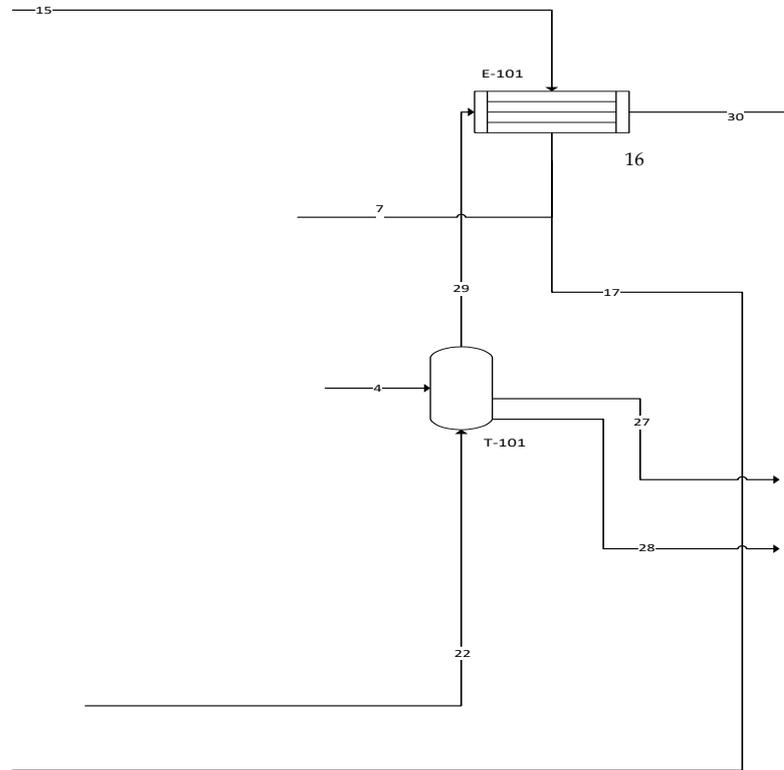


Figura 22. Etapa de extracción y condensación del diagrama de flujo.

III. Desarrollo del proyecto

Tabla 7. Relación de los códigos de los equipos con las etapas del proceso y sus corrientes

CÓDIGO	ETAPAS DEL PROCESO	CORRIENTES PARTICIPATIVAS
T-101	Etapa de destilación	<ul style="list-style-type: none">• 4: Corriente que proviene de la etapa de triturado• 27: Corriente de residuo sólido de la etapa de destilación• 28: Corriente de residuo de agua de la etapa de destilación• 22: Corriente de vapor generada por la caldera• 29: Corriente de vapor con aceite esencial, saliente de la etapa de destilación
E-101	Etapa de condensación	<ul style="list-style-type: none">• 15: Corriente proveniente del tanque de almacenamiento de agua de red (TK-101)• 29: Corriente vapor con aceite esencial proveniente de la etapa de destilación• 30: Corriente que sale de la etapa de condensación• 16: Corriente de las condensaciones acumuladas• 17: Corriente de agua proveniente de las condensaciones que se recircula al tanque de agua que alimenta la caldera (TK-102)• 7: Corriente de agua proveniente de las condensaciones que se recircula para alimentar las boquillas de pulverización en la etapa de lavado

III. Desarrollo del proyecto

III.2.2.1. OPERACIÓN DE EXTRACCIÓN

Una vez el Romero ha sido lavado, secado y triturado al tamaño de partícula requerido, se introduce en el extractor de aceite esencial o destilador. Este destilador consiste en un tanque que tendrá un diámetro igual o ligeramente inferior al tamaño de su altura, el cual dispondrá en su parte superior de una tapa instalada herméticamente.

El material habitual para construir este tipo de tanques es el acero inoxidable. Habrá que tener especial cuidado en el diseño de este equipo ya que el espesor del acero inoxidable es un parámetro muy importante a la hora de diseñar el tanque extractor o destilador.

En cuanto a la estructura de este tipo de tanque extractor/destilador, se distinguen varias partes para tener en cuenta.

En primer lugar, un tubo de entrada de vapor. Se encuentra en la parte baja del destilador, se debe de dejar una cierta separación entre el agujero de entrada de vapor y el fondo del tanque con el fin de utilizar ese espacio para almacenar las condensaciones. Se puede plantear un sistema de control de nivel para evitar que durante algún fallo en la producción aumente tanto el nivel de las condensaciones. Para mejorar el rendimiento de la extracción se ha decidido instalar en la parte baja del interior del tanque destilador o extractor un distribuidor de vapor de forma circular con un diámetro menor que el tanque destilador o extractor, para que el vapor que distribuya ocupe la mayoría del espacio del tanque **Figura 23**

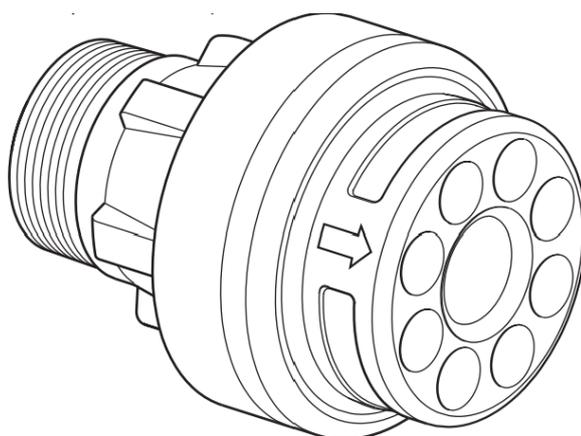


Figura 23. Distribuidor de vapor con forma circular [25].

Para diseñar un equipo destilador correctamente, éste debe ser hermético. Para ello, las juntas y el cierre de la tapa deben sellarse a la perfección. Otra cosa a tener en

III. Desarrollo del proyecto

cuenta en el diseño del destilador es que la carga depositada en su interior no este excesivamente comprimida para evitar dificultar el paso de vapor a través de la materia prima a destilar.

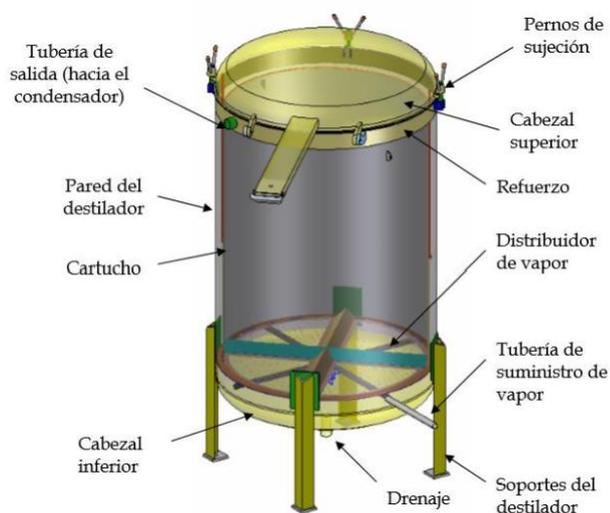


Figura 24. Esquema del destilador y sus partes [26].

En cuanto al método de operación, se ha decidido utilizar para la extracción vapor saturado. Para ello, dentro del tanque extractor ocurrirá, dos etapas. En la primera etapa como se supone que tanto el Romero como las paredes del tanque extractor están a la misma temperatura (25 °C) y se le inyecta vapor saturado a 1 atmósfera de presión y 100 °C, este vapor al entrar en contacto con materiales que están a menos temperatura condensará cediendo su calor latente para calentar a 100 °C tanto el material vegetal a tratar como las paredes del tanque que lo contienen. Esta etapa se conoce como calentamiento. Una vez finalizada esta etapa, todo el material contenido en el extractor estará a 100 °C, como consecuencia de esto, el vapor ya no condensará, sino que utilizará su calor para extraer las moléculas de aceite esencial de las glandulas celulares que lo contienen, dirigiéndose a la salida del extractor situado en la cabeza del tanque. Esta etapa se conoce como extracción.

Hay que tener en cuenta que el tiempo de extracción depende de dos parámetros muy importantes [27]:

III. Desarrollo del proyecto

- Tiempo básico (t). Es el tiempo requerido para que una glándula de aceite (parche) reviente por el efecto del calor suministrado.
- Factor de incremento (s). Es la relación entre el área de un parche de aceite y el incremento de su área por unidad de altura de carga. Matemáticamente se traduce en: $s = \frac{a}{\delta a}$

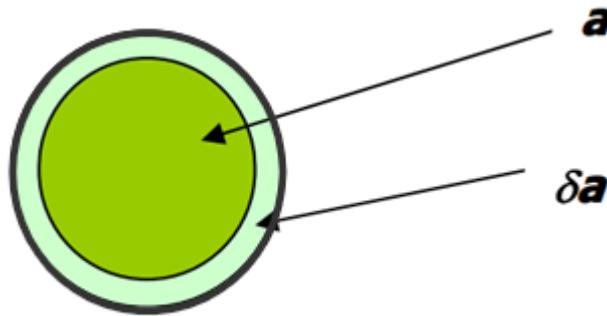


Figura 25. Área de un parche de aceite y su incremento [27].

Cada uno de los tiempos que comprenden las etapas mencionadas anteriormente son calculados en el apartado del diseño del extractor.

III. Desarrollo del proyecto

III.2.2.2. OPERACIÓN DE CONDENSACIÓN

En esta etapa el vapor que proviene de la cabeza del destilador junto con el aceite esencial está a la temperatura de 100°C y 1 atmósfera de presión, de modo que sigue saturado y por tanto se requiere de un equipo que sea capaz de condensar este vapor con el aceite esencial al estado líquido para ser posteriormente separar el aceite esencial del agua.

El equipo más efectivo para realizar esta operación es un intercambiador de carcasa y tubos ya que estos equipos proporcionan un área de transferencia muy grande en muy poco espacio. Un término muy importante que hay que controlar es la disposición de los fluidos dentro del intercambiador de calor.

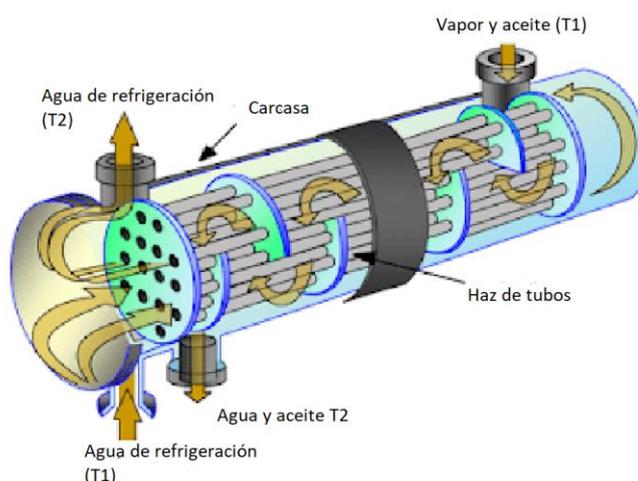


Figura 26. Corrientes propuestas para el intercambiador de carcasa y tubo [28].

Para el diseño de este intercambiador de carcasa y tubos se han propuesto dos etapas:

- Condensación del vapor proveniente de la cabeza del destilador. Esto se traduce en el cambio de estado de la mezcla.
- Etapa de subenfriamiento. El líquido condensado anterior se enfría hasta la temperatura estipulada. Se estimará que la temperatura de salida del agua y del aceite es de 42,5 °C. Esto es así ya que es la temperatura óptima para la posterior etapa de separación de los componentes.

III. Desarrollo del proyecto

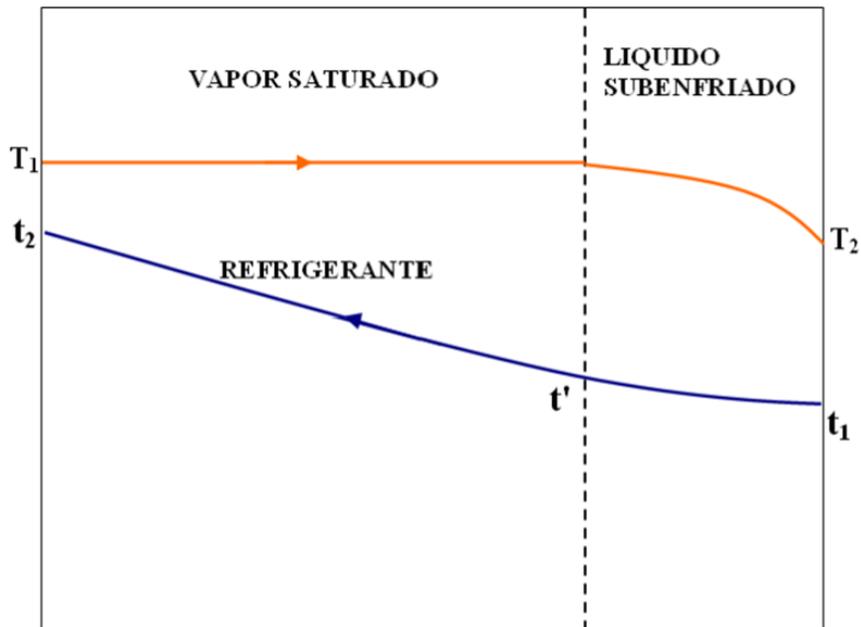


Figura 27. Zonificación del condensador [27].

Lo explicado anteriormente supone que se tenga que tratar cada etapa como un intercambiador de calor por separado, calculando para cada etapa el coeficiente global de transferencia correspondiente, para después sumar las áreas de transferencia obtenida para cada etapa y poder calcular el área total de transferencia del intercambiador de calor.

Hay tener especial cuidado en el valor que asignamos a t' . Este parámetro es la temperatura que tiene el refrigerante después de la condensación. Este valor no se puede imponer que sea demasiado bajo ya que el valor de caudal de refrigerante necesario para enfriar la mezcla sería demasiado alto. Al mismo tiempo t' no puede ser tampoco demasiado alto debido que, para enfriar la mezcla, esta temperatura tiene que ser menor a la temperatura de salida del condensado (T_2).

III. Desarrollo del proyecto

III.3. ESTUDIO FLUJOS DEL PROCESO

En el siguiente punto se analizan los balances de materia y de energía para cada etapa del diagrama de flujo del proceso de extracción del aceite esencial de romero.

III.3.1. BALANCE DE MATERIA PARA LA ETAPA DE LAVADO

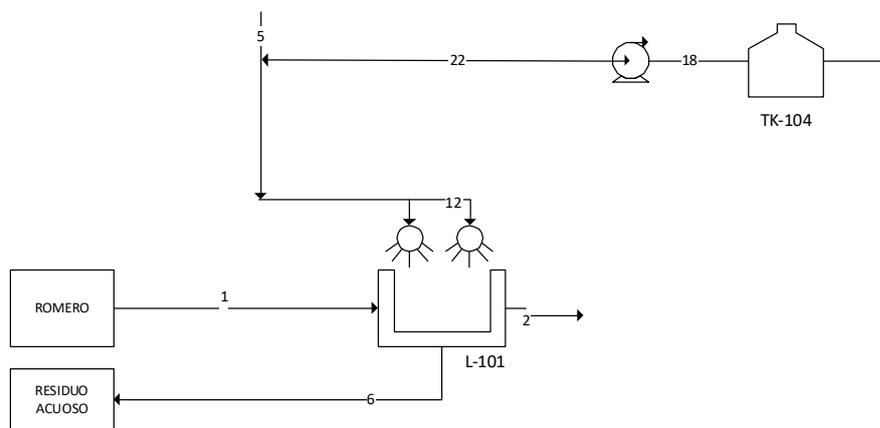


Figura 28. Etapa de lavado

Para poder abordar el balance de materia en la zona de lavado se van a tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- La masa de romero fresco inicial será de 750 kg.
- Se considera que la cantidad de agua necesaria para cubrir la demanda de esta etapa es la correspondiente al volumen del equipo de lavado.
- Se han obtenido datos de humedades relativas en la población de Alcoy y para el mes de septiembre nos encontramos que Alcoy presenta una humedad relativa promedio del 63% [29], por lo tanto, supondremos que el romero entra al lavado con un 63% de contenido en agua. Para tomar este valor hemos elegido el mes de septiembre ya que es cuando el romero está en plena floración y mayor cantidad y calidad de aceite esencial posee. A la salida del lavado consideraremos que el romero presenta un 68% de agua ya que sabemos que el romero no absorbe demasiada agua.

III. Desarrollo del proyecto

- Se considera que la concentración media de aceite esencial es de 5,5 kg por cada tonelada de romero fresco [21].
- Se asume que durante la etapa de lavado se trabaja a temperatura y presión constantes (1 atm y 25 °C)

Como sabemos que el material de entrada tiene un 63% de agua y que a la salida del lavado el material presenta un 68% de agua tendremos:

- Entrada: $m_{\text{Agua}} = 0,63 \cdot 750 = 473$ kg agua

Por otra parte, conocemos el contenido en sólidos de la entrada:

- Entrada: $m_{\text{sólidos}} = 0,37 \cdot 750 = 277$ kg de material sólido

Por otra parte, sabemos que la concentración media de aceite esencial de romero es de 5,5 kg por tonelada de romero fresco. A nuestra planta entra una cantidad inicial de 750 kg de romero fresco, a esta cantidad le corresponden 4,125 kg de esencia.

Como conocemos el porcentaje en peso de agua que tiene la corriente de salida del lavadero, también tenemos el porcentaje en sólidos que presenta esta corriente

- Salida: $m_{\text{total}} = \frac{0,37 \cdot 750}{0,32} = 867$ kg totales (considerando agua y sólidos)
- Salida: $m_{\text{Agua}} = 0,68 \cdot 867 = 590$ kg agua
- Salida: $m_{\text{sólidos}} = 0,32 \cdot 867 = 277$ kg agua

La cantidad de agua necesaria para realizar el proceso es el volumen máximo del equipo de lavado. Se considera que las boquillas de pulverización verterán la cantidad correspondiente al volumen del equipo lavador. El volumen del equipo de lavado seleccionado es de 2660 litros, por lo que las boquillas de pulverización verterán una cantidad de agua equivalente a 2660 kg

Con todos estos datos se han obtenido los siguientes resultados:

III. Desarrollo del proyecto

Tabla 8. Resultados del balance de materia del agua para la etapa de lavado.

	1	2	5	6	12	18	22
Agua (Kg)	473	590	1451	2543	2660	1209	1209
Esencia (Kg)	4,125	4,125	-	-	-	-	-
Materia vegetal (Kg)	272,875	272,875	-	-	-	-	-
Presión (atm)	1	1	1	1	1	1	1
Temperatura (K)	298	298	298	298	298	298	298

III. Desarrollo del proyecto

III.3.2. BALANCE DE MATERIA PARA LA ETAPA DE SECADO

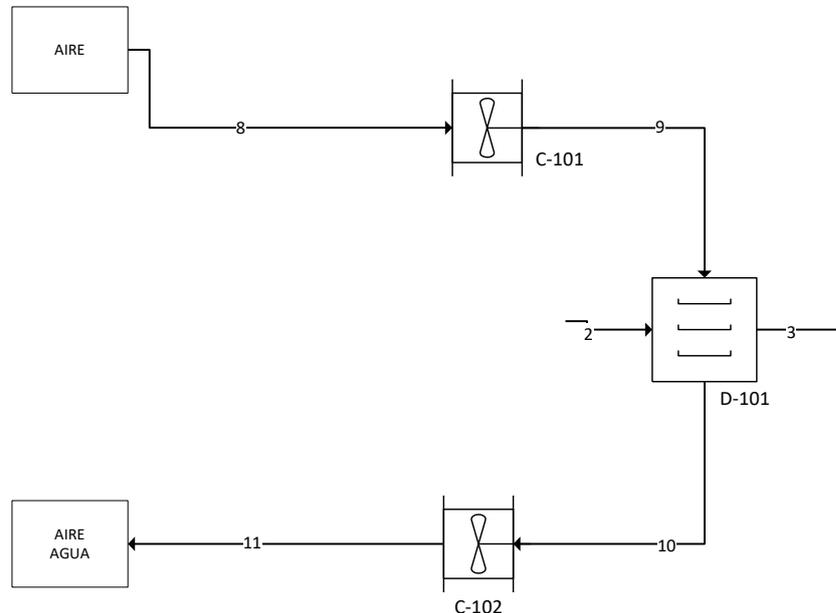


Figura 29. Etapa de secado.

Para poder realizar el balance de materia y de energía para la etapa de secado debemos tener en cuenta ciertas consideraciones:

- La masa de material a la entrada del secador es de 867 kg.
- Se considera que el aire entra al equipo con 40% de humedad relativa y no debe superar el rango de 40-45 °C para evitar la pérdida de componentes esenciales de la planta por degradación. Se utilizará un valor medio de 42,5 °C [30].
- Se considera que el material fresco entra al equipo con un 68% de agua. Para seleccionar el porcentaje en agua con el que tiene que salir el romero del secado, en general en el mercado existen valores establecidos del contenido adecuado de humedad para cada hierba o sus partes. Para el caso del romero estos valores oscilan entre 8 - 11%. Se ha seleccionado el valor del 9% porque es el porcentaje de humedad que exige Alemania para la comercialización de aceite esencial de romero.

III. Desarrollo del proyecto

- Se considerará que la corriente de salida de aire estará a 32,5 °C y se ha seleccionado un valor de humedad relativa del 80% para evitar que el propio aire condense en el secadero [31].

El parámetro más importante de este balance de materia es la cantidad de aire necesario para realizar el proceso de secado. Para poder calcular esta cantidad de aire, se necesita conocer previamente el valor de las humedades absolutas de la corriente de entrada y de salida del aire. Como disponemos de las humedades relativas y las temperaturas de aire a la entrada y a la salida, con la ayuda del diagrama psicrométrico a presión atmosférica podremos conocer el valor de las humedades absolutas.

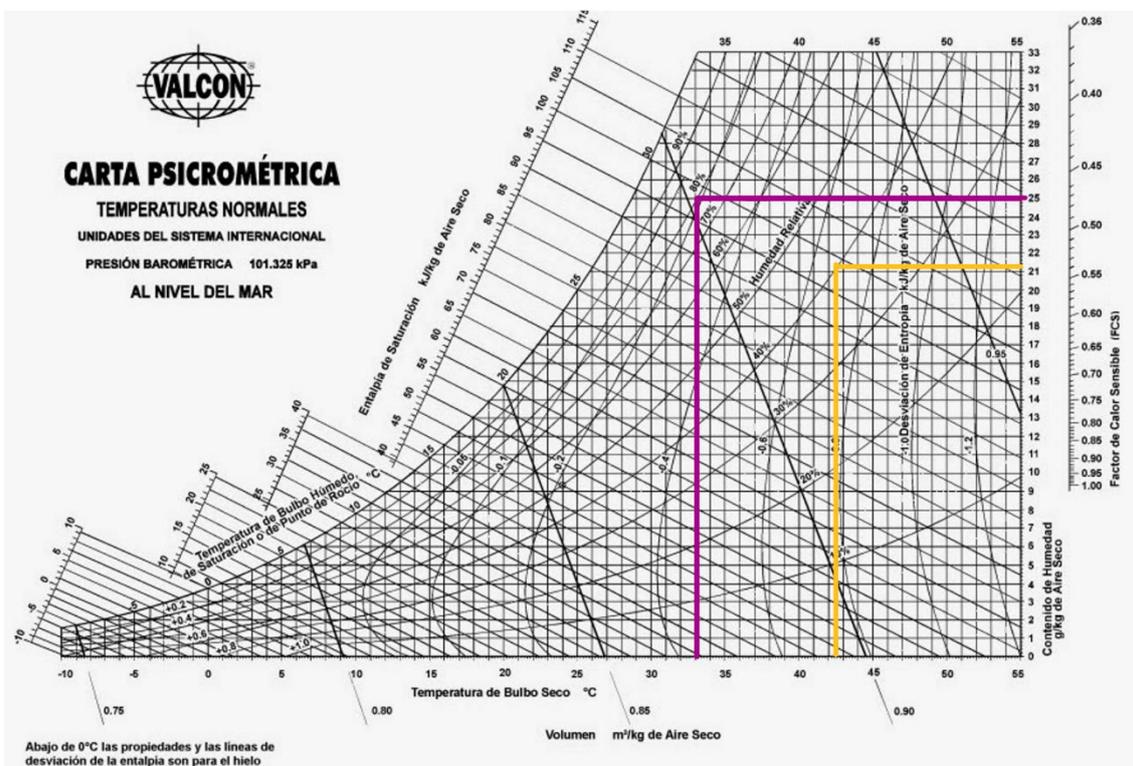


Figura 30. Diagrama psicrométrico aire-agua a presión atmosférica

De este diagrama obtenemos:

- Humedad absoluta para el aire en la entrada (W_{aire_e}): 21,4 g agua/kg aire seco.
- Humedad absoluta para el aire a la salida (W_{aire_s}): 25 g agua/kg aire seco.

III. Desarrollo del proyecto

El siguiente paso para continuar con el balance de materia, sería calcular la cantidad de agua que se transfiere de la corriente de sólidos a la entrada de la corriente de aire. Para poder realizar este cálculo haremos uso de las proporciones de agua que hemos definido en el inicio. Con estos datos y con la siguiente ecuación se podrá calcular la masa de aire seco necesario.

$$m_{aire\ seco} = \frac{m_{agua\ evap}}{W_{aire\ s} - W_{aire\ e}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

- $m_{aire\ seco}$ es la masa de aire seco necesaria (kg).
- $m_{agua\ evap}$ es la masa de agua que hay que evaporar (kg)
- $W_{aire\ e}$ es la humedad absoluta del aire a la entrada (kg agua/kg aire seco)
- $W_{aire\ s}$ es la humedad absoluta del aire a la salida (kg agua/kg aire seco)

Para poder continuar, es necesario conocer el volumen de aire necesario en relación con la masa obtenida anteriormente., para ello haremos uso de la ecuación de los gases ideales, teniendo en cuenta las consideraciones que hemos realizado en las condiciones de operación.

$$V_{aire\ seco} = \frac{m_{aire\ seco} \cdot R \cdot T}{P} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

- $V_{aire\ seco}$ es el volumen de aire seco necesario (m³)
- $m_{aire\ seco}$ es la masa de aire seco necesaria (kg)
- R es la constante de los gases ideales (kPa · m³ · kg⁻¹ · K⁻¹)
- P es la presión (kPa)

Por último, necesitaríamos calcular la masa de aire ambiente para el posterior cálculo del tiempo de secado. Para calcular la masa de aire ambiente recurriremos a la siguiente expresión:

$$m_{aire\ ambiente} = V_{aire\ seco} \cdot \rho_{aire} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

III. Desarrollo del proyecto

- $m_{aire\ ambiente}$ es la masa de aire ambiente (kg)
- $V_{aire\ seco}$ es el volumen de aire seco (m³)
- ρ_{aire} es la densidad del aire en condiciones normales (kg/m³)

Con estas expresiones, los valores considerados en las especificaciones iniciales, y los valores obtenidos del diagrama psicométrico se obtienen los siguientes parámetros de funcionamiento requeridos:

Tabla 9. Parámetros requeridos del secadero.

RESULTADOS BALANCE DE MATERIA	
$m_{aire\ seco}$ (Kg)	155.290
$V_{aire\ seco}$ (m ³)	139.870
$m_{aire\ ambiente}$ (Kg)	167.850

Por lo tanto, el resultado del balance de materia para la etapa de secado queda de la siguiente forma:

Tabla 10. Resultado del balance de materia y energía para el proceso de secado.

	2	3	8	9	10	11
Agua (Kg)	590	30.52	3.823	3.823	4.382	4.382
Esencia (Kg)	4,125	4,125	-	-	-	-
Materia vegetal (Kg)	272,875	272,875	-	-	-	-
Aire (Kg)	-	-	155.290	155.290	155.290	155.290
Presión (atm)	1	1	1	1	1	1
Temperatura (K)	298	305,5	315,5	315,5	305,5	305,5

A continuación, se procede a calcular el tiempo de secado una vez calculado la masa de aire ambiente necesario para secar el romero.

Para ello es necesario suponer una velocidad para el aire de entrada.

Según la información obtenida de un estudio realizado para obtener las condiciones adecuadas para el secado del romero [32], se ha podido obtener que la mejor velocidad de aire para el secado del romero es de $1,5 \frac{m}{s}$. La temperatura del aire

III. Desarrollo del proyecto

de entrada del aire se estableció en 42,5 °C con el fin de evitar la pérdida de compuestos activos del romero por efecto de la alta temperatura.

Con la siguiente expresión se podrá conocer el tiempo de secado para nuestro proceso, teniendo en cuenta ciertos parámetros que tendremos que estimar como las dimensiones de una rama de romero.

$$t_{\text{secado}} = \frac{m_{\text{romero seco}}}{A_{tt} \cdot v_{\text{secado}}} \cdot \left(\phi_i - \phi_c - \phi_c \cdot \ln \left(\frac{\phi_c}{\phi_f} \right) \right) \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

- t_{secado} es el tiempo de secado (s).
- $m_{\text{romero seco}}$ es la masa de romero seco inicial (kg).
- A_{tt} es el área de transferencia del aire y de la hierba (m²).
- v_{secado} es la velocidad de secado (kg · m⁻² · s⁻¹).
- ϕ_i es la humedad inicial.
- ϕ_c es la humedad crítica (Supondremos un valor del 25%).
- ϕ_f es la humedad final.

Para poder resolver esta ecuación en primer lugar deberemos calcular el área de transferencia. Para ello se calculará el área de una rama de romero y se multiplicará por una cantidad de ramas estimada. El área de una rama de romero se supondrá cuadrática. Con una longitud de aproximadamente 13 cm, para justificar este dato se han conseguido tres ramas de romero y se ha medido la longitud media. Además, el número de ramas se calculará de la forma que 2 ramas de romero pesa 1 g, junto con esto, teniendo en cuenta los gramos que entran en el equipo de secado, se tendrá la cantidad de ramas aproximadas introducidas.

$$A_{tt} = n \cdot A_{\text{rama}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

- A_{tt} es el área total de transferencia (m²).
- n es el número de ramas aproximadas.
- A_{rama} es el área aproximada de una rama (m²).

III. Desarrollo del proyecto

Por lo tanto, tendremos:

$$n = 277,44 \cdot 1.000 \cdot 2 = 554.800 \text{ ramas de romero aproximadamente}$$

$$A_{rama} = 0,13 \cdot 0,13 = 0,0169 \text{ m}^2$$

$$A_{tt} = n \cdot A_{rama} = 554.800 \cdot 0,0169 = 9.337,5 \text{ m}^2$$

También deberemos conocer cuál es la velocidad de secado para posteriormente saber el tiempo que tarda en secarse el romero. Para conocer esta velocidad de secado se emplea la siguiente ecuación:

$$v_{secado} = \frac{h \cdot (T_{aire_salida} - T_{aire_entrada})}{h_{fT_s}} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

- h es el coeficiente de película ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$).
- T_{aire_salida} es la temperatura del aire a la salida del secador (K).
- $T_{aire_entrada}$ es la temperatura del aire a la entrada del secador (K).
- h_{fT_s} es la entalpia del vapor de agua a la temperatura de salida de la corriente de aire (J/kg).

Para conocer la velocidad de secado es necesario hallar antes el coeficiente de película. Para ello se calculará a partir del número de Nusselt con la siguiente correlación [33]:

$$Nu_D = \frac{h \cdot D_e}{k} = 0,664 \cdot R_e^{\frac{1}{2}} \cdot P_r^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

- Nu_D es el número de Nusselt.
- h es el coeficiente de película ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$).
- D_e es el diámetro equivalente de partícula (m).
- k es la conductividad del fluido ($W / (m \cdot K)$).
- R_e es el número de Reynolds.
- P_r es el número de Prandalt (en nuestro caso escogeremos el del aire 0,7).

III. Desarrollo del proyecto

El diámetro equivalente se calculará teniendo en cuenta el área de una rama de romero y el perímetro que con ella trae, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$D_e = \frac{4 \cdot A_{rama}}{P} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

- D_e es el diámetro equivalente de partícula (m)
- A_{rama} es el área de una rama de romero (m²)
- P es el perímetro de una rama (m)

Por lo tanto, tendremos:

$$D_e = \frac{4 \cdot A_{rama}}{P} = \frac{4 \cdot 0,0225}{0,6} = 0,1127 \text{ m}$$

El número de Reynolds se calculará con la ecuación que se muestra a continuación después de obtener las propiedades físicas del aire a través de las tablas de propiedades de aire seco a presión atmosférica (Anexo VI.6. TABLA DE PROPIEDADES DEL AIRE SECO A PRESIÓN ATMOSFÉRICA).

$$R_e = \frac{D_e \cdot v_{aire} \cdot \rho_{aire}}{\mu_{aire}} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

- R_e es el número de Reynolds
- D_e es el diámetro equivalente (m)
- v_{aire} es la velocidad del aire (m/s)
- ρ_{aire} es la densidad del aire (kg/m³)
- μ_{aire} es la viscosidad del aire (kg · s · m⁻¹)

Con todos estos parámetros calculados previamente, es posible conocer el tiempo de secado obteniendo los siguientes resultados:

III. Desarrollo del proyecto

Tabla 11. Resultados del tiempo de la operación de secado

RESULTADOS	
A_{tt} (m ²)	9.335,5
D_e (m)	0,1127
Re	9.639,8
v_{secado} (kg · m ⁻² s ⁻¹)	5,42 · 10 ⁻⁵
t_{secado} (h)	4,47

III. Desarrollo del proyecto

III.3.3. BALANCE DE MATERIA PARA LA ETAPA DE TRITURADO

La etapa de triturado no supone ninguna complicación a la hora de obtener el balance de materia ya que tanto la cantidad de agua como de sólidos a la salida del secado tiene que ser igual a la salida del triturado. Se tendrá en cuenta unas pérdidas del 1% debido a que el material puede quedar adherido al equipo.

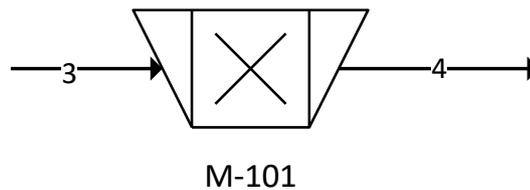


Figura 31. Etapa de trituración

Obteniendo, por tanto, los siguientes resultados:

Tabla 12. Resultado del balance de materia para la etapa de triturado

	3	4
Agua (Kg)	30,52	30,52
Esencia (Kg)	4,125	4,125
Materia vegetal (Kg)	272,875	270,146
Presión (atm)	1	1
Temperatura (K)	305,5	305,5

III. Desarrollo del proyecto

III.3.4. BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA PARA LA ETAPA DE EXTRACCIÓN

Para el proceso de extracción se considera que la cantidad media de esencia en el romero fresco es de 5,5 kg de aceite esencial por tonelada de material fresco [21]. Con esta cantidad de aceite y basándonos en los datos experimentales escogidos y habiendo calculado previamente el tiempo de extracción supondremos que el destilador consigue extraer el 95% de esencia presente en el material [1]. Hay que tener en cuenta que el 60% de la esencia restante queda absorbida en el residuo sólido y el 40% sale del proceso acompañado de las condensaciones. En cuanto al vapor generado para la etapa de extracción, se producirá mediante una resistencia eléctrica que dimensionaremos en el capítulo de dimensionamiento de equipos.

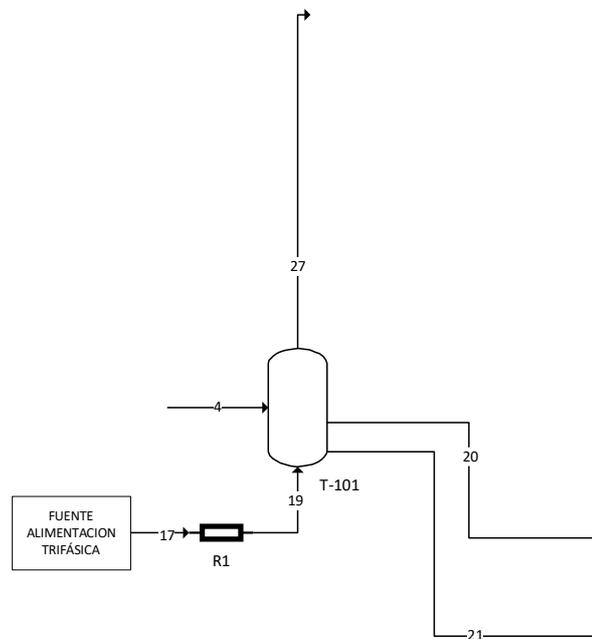


Figura 32. Proceso de extracción

Por otra parte, tenemos que considerar que el vapor necesario para cumplir el tiempo de calentamiento saldrá del extractor como residuo líquido en la corriente de las condensaciones, además, el vapor necesario para extraer el aceite esencial saldrá por la cabeza del destilador con unas pérdidas del 5% debido a que el sólido absorbe agua.

III. Desarrollo del proyecto

Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones, para poder abordar el balance de materia y de energía en primer lugar es necesario calcular el tiempo de calentamiento y la masa de vapor necesaria para el calentamiento.

Debido a que el tiempo de calentamiento está relacionado con la masa del acero elegido para el equipo y la masa del romero, en primer lugar, se calculara el área de la sección transversal del equipo destilador.

$$A = \frac{\pi \cdot D_i^2}{4} 1,7671 \text{ m}^2 \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

- A es el área de la sección transversal del equipo destilador (m^2)
- D_i es el diámetro interno de la columna, el cual supondremos en 1,5 m para poder seguir los cálculos.

Posteriormente deberemos calcula la altura del lecho mediante la siguiente expresión:

$$H_{lecho} = \frac{m_{romero_e}}{\rho_{romero} \cdot A} = 0,7591 \text{ m} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

- H_{lecho} es la altura de lecho (m)
- m_{romero_e} es la masa de romero a la entrada (kg)
- ρ_{romero} es la densidad del romero (205 kg/m^3) [34]
- A es el área de la sección transversal (m^2)

Con los parámetros anteriores calculados, se puede conocer cuál es el volumen de acero requerido para envolver el lecho mediante la siguiente expresión:

$$V_{acero} = \pi \cdot \frac{1}{2} (D_{ext} + D_{int}) \cdot e \cdot H_{lecho} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

- V_{acero} es el volumen de acero necesario (m^3)
- D_{ext} es el diámetro exterior (m)
- D_{int} es el diámetro interno (m)
- e es el espesor de la lámina de acero (m)

III. Desarrollo del proyecto

- H_{lecho} es la altura del lecho (m)

Para poder resolver esta ecuación en primer lugar se necesita conocer el espesor de la chapa de acero, se ha consultado el catálogo de un fabricante de chapas de acero inoxidable 304 llamado Bonnet y los espesores oscilan entre 0,8 y 1,5 mm, vamos a suponer un valor de espesor que este dentro de este rango tomando el valor de 1 mm para facilitar los cálculos.

Una vez conocido el espesor de la lámina de acero se puede saber el diámetro externo a través de la siguiente relación:

$$D_{ext} = D_{int} + 2 \cdot e = 1,502 \text{ m} \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde:

- D_{ext} es el diámetro exterior (m)
- D_{int} es el diámetro interior (m)
- e es el espesor (m)

Una vez que ya hemos calculado el espesor, se puede calcular el volumen del acero inoxidable necesario. Posteriormente se aplica un balance de energía para así obtener la masa de vapor necesario para el calentamiento, además del tiempo necesario para el proceso de calentamiento, suponiendo un caudal de vapor constante de 5,8 kg/min.

$$m_{acero} = \rho_{acero} \cdot V_{acero} = 28,279 \text{ kg} \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde:

- m_{acero} es la masa de acero requerido (kg)
- ρ_{acero} es la densidad para el acero elegido (kg/m³)
- V_{acero} es el volumen de acero inoxidable (m³)

Una vez conocida la masa de acero inoxidable necesario ya podemos aplicar la ecuación de balance de energía para conocer la cantidad de vapor necesario para el calentamiento.

$$m_{vap_c} \cdot \lambda = m_{romero_e} \cdot cp_{romero} \cdot (T_{romero_f} - T_{romero_i}) + m_{acero} \cdot cp_{acero} \cdot (T_{acero_f} - T_{acero_i}) \quad \text{Ecuación 16}$$

III. Desarrollo del proyecto

Donde:

- m_{vap_c} es la masa de vapor necesaria para la etapa de calentamiento (kg)
- λ es el calor latente del agua a 100 °C y 1 atmósfera (kJ/kg)
- m_{romero_e} es la masa de romero a la entrada (kg)
- cp_{romero} es el calor específico del romero (2,64 kJ/ (kg ·K)) [35]
- T_{romero_f} es la temperatura del romero al final de la operación (K)
- T_{romero_i} es la temperatura del romero al inicio de la operación (K)
- m_{acero} es la masa de acero necesaria para el lecho (kg)
- cp_{acero} es el calor específico del acero elegido (kJ/ (kg ·K))
- T_{acero_i} es la temperatura del acero al inicio de la operación (K)
- T_{acero_f} es la temperatura del acero al final de la operación (K)

Una vez se conoce la masa de vapor necesaria para el proceso de calentamiento se puede calcular el tiempo de calentamiento de acuerdo con la siguiente expresión:

$$t_{calent} = \frac{m_{vap_c}}{Q_v} = 3,82 \text{ min} \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde:

- t_{calent} es el tiempo de calentamiento (min)
- m_{vap_c} es la masa de vapor necesaria para el calentamiento (kg)
- Q_v es el caudal constante de vapor impuesto (kg/min)

Seguidamente a la etapa de calentamiento viene la etapa de extracción. Para esta etapa también deberemos calcular la cantidad de vapor necesario para extraer el aceite esencial, así como, el tiempo de extracción necesario para acabar de realizar el proceso.

Para poder realizar estos cálculos, requiere conocer dos parámetros importantes en la etapa de extracción tal y como se mencionaba anteriormente, el tiempo básico necesario para extraer un parche de aceite esencial (t_{extr}) y el factor de incremento del área del parche de aceite esencial con la altura del lecho (s). Para poder conocer estos valores se requiere de una batería de experimentos a escala de laboratorio. En nuestro caso hemos tomado la información del tiempo básico y del factor de incremento de un

III. Desarrollo del proyecto

artículo llamado “*Pilot Steam Distillation of Rosemary (Rosmarinus officinalis L.)*” [36] cuyos valores que hemos rescatado han sido:

- Tiempo básico (t_b): 4 minutos
- Factor de incremento (s): 23,3 cm

Estos valores no requieren adaptación a nuestro proceso debido a que el artículo comenta si se adapta el caudal de vapor de la prueba a nuestro proceso mediante la multiplicación por el área de la sección transversal, se pueden utilizar estos parámetros sin modificación alguna.

A partir de estos valores conocidos y la altura de carga del lecho calculada anteriormente, mediante la siguiente ecuación se puede calcular el tiempo de extracción necesario.

$$t_{extrac} = t_b \cdot \sqrt{1 + \frac{H_{lecho}}{s_{new}}} = 8,25 \text{ min} \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde:

- t_b es el tiempo básico (min)
- H_{lecho} es la altura del lecho
- s es el factor de incremento (m)

Una vez obtenido el tiempo de extracción, si sumamos el tiempo de calentamiento, tendremos el tiempo tal de la operación

$$t_{TOTAL} = t_{extrac} + t_{calent} = 12,08 \text{ min} \quad \text{Ecuación 19}$$

Con el tiempo total de operación y el caudal de vapor constante que hemos impuesto (5.8 kg/min) podremos calcular la masa de vapor total necesaria para realizar el proceso.

$$m_{vapTOTAL} = t_{TOTAL} * Q_{vap} = 70,06 \text{ kg} \quad \text{Ecuación 20}$$

De la siguiente forma podemos obtener los siguientes resultados:

III. Desarrollo del proyecto

Tabla 13. Resultados del balance de materia para la etapa de extracción

	4	19	20	21	27
Agua (Kg)	30,52	63,79	32,59	22,38	39,34
Esencia (Kg)	4,125	-	0,12	0,0825	3,92
Materia vegetal (Kg)	272,875	-	272,875	-	-
Presión (atm)	1	1	1	1	1
Temperatura (K)	305,5	373	373	373	373

En la tabla que se muestra a continuación se resume el resultado de los parámetros más importantes de la etapa de extracción, tales como el tiempo de total de operación y la masa de vapor total necesaria para poder llevar a cabo el proceso.

Tabla 14. Resultados balance de energía para las etapas de calentamiento y extracción

ETAPA DE CALENTAMIENTO		ETAPA DE EXTRACCIÓN	
A (m ²)	1,7671	t _{extrac} (min)	8,25
H _{lecho} (m)	0,7591	t _{TOTAL} (min)	12,08
D _e (m)	1,502	m _{vapE} (kg)	47,873
V _{acero} (m ³)	0,0036	m _{vapTOTAL} (kg)	70,06
m _{acero} (kg)	28,28		
m _{vapC} (kg)	22,18		
t _{calent} (min)	3,82		

III. Desarrollo del proyecto

III.3.5. BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA PARA LA ETAPA DE CONDENSACIÓN

Para la etapa de condensación se debe recalcar que se empleará un intercambiador de carcasa y tubos y que el fluido refrigerante será agua para ahorrar en costes de refrigeración. En primer lugar, debemos tener claro que esta etapa se subdivide en dos etapas:

- Etapa de condensación. En la que se produce el cambio de estado de la mezcla
- Etapa de subenfriamiento. Donde el condensado se enfría hasta la temperatura impuesta

La temperatura a la que saldrá de esta etapa la mezcla de agua y aceite esencial se impondrá en $42,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ con el fin de que el aceite esencial no pierda ninguna de sus principios activos debido a la temperatura, ya que como se ha comentado con anterioridad, a partir de $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ se pueden perder ciertos principios activos de los aceites esenciales. Por otra parte, también se tendrá que imponer la temperatura media que alcanzará el refrigerante al final de la etapa de condensación. Sabemos que esta temperatura no puede ser superior a $42,5^{\circ}\text{C}$, por lo que un valor prudente sería imponer un valor de $37,5^{\circ}\text{C}$. Supondremos que el caudal másico de vapor saturado de la mezcla de agua y aceite sale a $0,096\text{ kg/s}$.

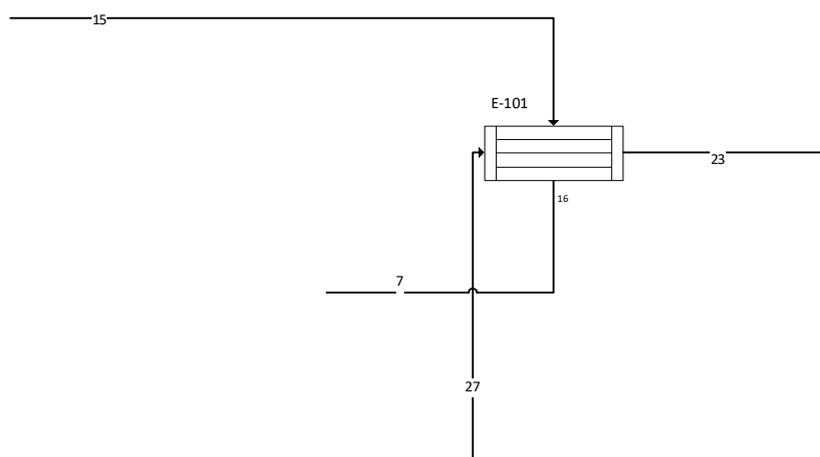


Figura 33. Etapa de condensación

III. Desarrollo del proyecto

Para abordar la etapa de condensación, debemos calcular en primer lugar la masa de agua refrigerante.

Por lo tanto, si aplicamos un balance de materia obtenemos:

$$Q_c = \dot{m}_{agRef} \cdot C_{p_{agRef}} \cdot (T'_r - T_{re}) = \dot{m}_{ag-ac} \cdot \lambda \quad \text{Ecuación 21}$$

Donde:

- Q_c es el calor que se intercambia en la etapa de condensación (kW)
- \dot{m}_{agRef} es el flujo másico de agua refrigerante (kg/s)
- $C_{p_{agRef}}$ es el calor específico del agua refrigerante (kJ/ (kg · s))
- T'_r es la temperatura del refrigerante cuando termina la etapa de condensación (310,5 K)
- T_{re} es la temperatura del refrigerante al inicio de la etapa de condensación (298 K)
- \dot{m}_{ag-ac} es el flujo másico de la mezcla de agua y aceite (kg/s)
- λ es el calor latente del agua a 100 °C (kJ/kg)

Una vez obtenida la masa de agua refrigerante, es necesario calcular C_{min} . Como en el proceso tenemos uno de los dos fluidos en ebullición, C_{min} se puede calcular de la siguiente manera:

$$C_{min} = \dot{m}_{agRef} \cdot C_{p_{agRef}} \quad \text{Ecuación 22}$$

Seguidamente debemos calcular el valor de la eficacia (\mathcal{E}) para junto con la relación de capacidades (C_R) poder calcular NTU.

$$Q_c = \mathcal{E} \cdot C_{min} \cdot \Delta T_{max} \quad \text{Ecuación 23}$$

$$C_R = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad \text{Ecuación 24}$$

Una vez obtenido C_R y \mathcal{E} se puede obtener NTU mediante el gráfico facilitado en el Anexo VI.7. DIAGRAMA C-NTU- \mathcal{E} DEL INTERCAMBIADOR DE CARCASA Y TUBOS o mediante la siguiente expresión.

$$\mathcal{E} = 1 - e^{-NTU} \quad \text{Ecuación 25}$$

De esta forma obtenemos los siguientes resultados:

III. Desarrollo del proyecto

Tabla 15. Resultados de balance de energía para la etapa de condensación del intercambiador

RESULTADOS BALANCE DE ENERGÍA	
\dot{m}_{agRef} (kg/s)	4,92
C_{min} (kJ/s)	10,7044
Q_c (kW)	256,91
ε	0,17
NTU	0,1863

Para la etapa de enfriamiento, el parámetro que se desconoce es la temperatura de salida del refrigerante (T_{rs}) esta temperatura se deberá calcular mediante un balance de energía aplicado a la etapa de enfriamiento del intercambiador.

$$Q_e = \dot{m}_{agRef} \cdot C_{p_{agRef}} \cdot (T_{rs} - T'_r) = \dot{m}_{ag-ac} \cdot C_{p_{ag-ac}} \cdot (T_{ag_{Sat}} - T_{ag-ac_{salida}})$$

Ecuación 26

Donde:

- Q_e es el calor intercambiado en la etapa de enfriamiento (kW)
- \dot{m}_{agRef} es el flujo másico de agua refrigerante (kg/s)
- $C_{p_{agRef}}$ es el calor específico del agua refrigerante (kJ/ (kg s))
- T'_r es la temperatura del refrigerante al terminar la condensación (310,5 K)
- T_{rs} es la temperatura del refrigerante a la salida (K)
- \dot{m}_{ag-ac} es el flujo másico de la mezcla de agua y aceite (kg/s)
- $C_{p_{ag-ac}}$ es el calor específico de la mezcla de agua y aceite (kJ/ (kg s))
- $T_{ag_{Sat}}$ es la temperatura de saturación del agua (373 K)
- $T_{ag-ac_{salida}}$ es la temperatura de la mezcla de agua y aceite a la salida (315,5 K)

Una vez tenemos calculada la temperatura de agua a la que sale el refrigerante, los demás cálculos para conocer el calor intercambiado, la eficacia y NTU se realizan de la misma forma que para la etapa de condensación, obteniendo de esta forma los siguientes resultados:

III. Desarrollo del proyecto

Tabla 16. Resultados del balance de materia para la etapa de enfriamiento

RESULTADOS BALANCE DE ENERGÍA	
T_{rs} (K)	311,62
C_{min} (kJ/s)	0,2090
Q_e (kW)	23,07
ε	0,92
NTU	2,3

Teniendo en cuenta que el agua de condensación se recircula completamente para abastecer el proceso de lavado, el balance de materia, por tanto, nos encontramos con los siguientes resultados:

Tabla 17. Resultados del balance de materia para la etapa de condensación para un tiempo total de extracción de 12,08 min.

	7	15	16	27	23
Agua (kg/min)	295,2	295,2	295,2	2,5	2,5
Esencia (kg/min)	-	-	-	0,25	0,25
Presión (atm)	1	1	1	1	
Temperatura (K)	311,62	298	311,62	373	315,5

III. Desarrollo del proyecto

III.3.6. BALANCE DE MATERIA ETAPA DE SEPARACIÓN

Para la etapa de separación, utilizaremos una centrifugadora con un rendimiento supuesto del 98%, ya que obtener una separación perfecta es muy complicado.

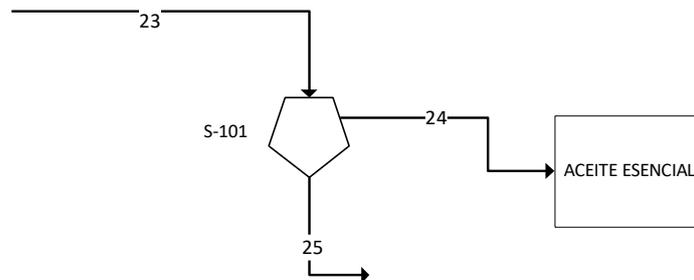


Figura 34. Etapa de separación

Tabla 18. Resultados del balance de materia para el proceso de separación

	23	24	25
Agua (kg)	39,34	-	39,34
Esencia (kg)	3,92	3,92	-
Presión (atm)	1	1	1
Temperatura (K)	311,62	298	311,62

A través de todos los procesos anteriores y haciendo las suposiciones comentadas para cada proceso en particular, se ha conseguido extraer en la planta una cantidad de 3,92 kg durante un tiempo de operación total (tiempo de secado, tiempo de calentamiento y tiempo de extracción) de 4,74 horas. Esto supone que por cada kg de material vegetal se ha conseguido extraer 0,005226 kg de esencia, ese hecho confirma el porqué del elevado precio de los aceites esenciales.

IV. ESTUDIO ECONÓMICO

IV. Estudio Económico

IV.1. DISEÑO DE LA INSTALACIÓN

IV.1.1. DIMENSIONAMIENTO DEL LAVADERO

Para el dimensionamiento del lavadero, se ha seleccionado el equipo de lavado fabricado por la marca "AMBITIOUS", concretamente se ha elegido el modelo TSXQ-80 [37] ya que este modelo posee una capacidad acorde a la cantidad de agua a utilizar en nuestro proceso de lavado.



Figura 35. Lavadero TSXQ-80 [37]

Tabla 19. Hoja de especificaciones del lavador TSXQ-80

CARACTERISTICAS DEL EQUIPO	
Material procesado	Agua, frutas, hortalizas, material herbáceo
Energía (kW)	9,2
Capacidad (kg/h)	300 - 500
Principio de trabajo	Burbujas de aire a alta presión
Desinfección	Generador de ozono
Voltaje (V)	380
Dimensiones (L x W x H mm)	8000 x 1650 x 1900
Correa de malla (mm)	800
Control de velocidad	Regulación continua de la velocidad
Coste (€)	5.322,25 €

IV. Estudio Económico

IV.1.2. DIMENSIONAMIENTO DEL SECADERO

Para el dimensionamiento del secadero industrial, seleccionaremos el equipo de acuerdo con la cantidad de material que entra al proceso de secado.



Figura 36. Secadero CT-C-IV [38]

Para poder cumplir con las capacidades de la planta de extracción se ha decidido instalar dos secaderos fabricados por la marca "HAIJIANG DRYING", el modelo seleccionado de estos secaderos ha sido el CT-C-IV ya que es el modelo el cual cumple con la capacidad a secar y con la cantidad de aire necesario para llevar a cabo el proceso de secado. La hoja de especificaciones de este modelo se encuentra a continuación.

Tabla 20. Hoja de especificaciones del secadero CT-C-IV

CARACTERISTICAS DEL EQUIPO	
Cantidad de secado (kg/ud)	480
Potencia equipada (kW/ud)	1,8
Consumo de vapor (kg/h/ud)	72
Área de radiación (m ²)	200
Cantidad de aire (m ³ /h/ud)	13.800
Cantidad de bandejas (ud)	192
Dimensiones (W x D x H mm /ud)	4460 x 2200 x 2290
Rango de temperatura	Ajustable
Coste (€/ud)	4.823,76

IV. Estudio Económico

IV.1.3. DIMENSIONAMIENTO DEL EXTRACTOR

Para el dimensionamiento del extractor, elegiremos un suministrador industrial que sus equipos sean capaces de asemejarse a nuestros parámetros de diseño (diámetro, altura de lecho). Hay que tener en cuenta que siempre podemos solicitar la fabricación del equipo de acuerdo con nuestras necesidades, es decir, “bajo pedido”, eligiendo las dimensiones, pero esto encarecerá el precio.



Figura 37. Extractor HG-2000 [39]

Para el dimensionamiento del extractor, se ha elegido el modelo de extractor HG-2000, suministrado por la marca “HG MACHINE”, hay que tener en cuenta que el equipo se ha sobredimensionado en un factor de 1,2 por razones de seguridad. Su hoja de especificaciones se muestra a continuación:

Tabla 21. Hoja de especificaciones del extractor HG-2000

CARACTERISTICAS DEL EQUIPO	
Capacidad de producción (L)	2000
Diámetro del tanque (m)	1,96
Área de calentamiento (m ²)	2
Altura (m)	3,15
Tiempo de calentamiento (min)	7,46
Tiempo de extracción (min)	8,28
Tiempo de operación (min)	15,75
Coste (€)	10.121,24

IV. Estudio Económico

IV.1.4. DIMENSIONAMIENTO DEL CONDENSADOR

El condensador elegido para la puesta en marcha de la planta deberá tener la suficiente potencia, necesaria para cumplir la etapa de condensación y la etapa de enfriamiento, asociadas a cada una de ellas, respectivamente, un calor de 133,81 kW y 12,02 kW.



Figura 38. Intercambiador de calor SC4508-6 [40]

Para cumplir estas condiciones se ha optado por elegir el modelo de intercambiador de calor de tubos y carcasa, SC4508-6, suministrado por el fabricante "BOWMAN", cuya refrigeración es por agua y su hoja de especificaciones se muestra a continuación:

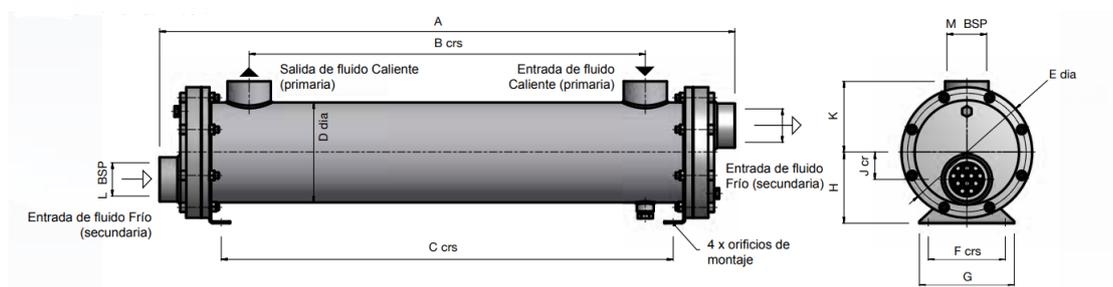


Figura 39. Esquema del intercambiador de calor SC4508-6 [40]

IV. Estudio Económico

Tabla 22. Hoja de especificaciones del intercambiador SC4508-6.

CARACTERISTICAS DEL EQUIPO		
Calor disipado (kW)		156
Agua-carcasa- (l/min)		100
Agua/Aceite-tubos- (l/min)		140
Peso (kg)		27
	A	1144
	B	900
	C	964
	D	114
	E	160
	F	80
Dimensiones (mm)	G	110
	H	90
	J	114
	K	28
	L	1 ¼"
	M	1 ¼"
Coste (€)		3.457,11

IV. Estudio Económico

IV.1.5. DIMENSIONAMIENTO LA RESISTENCIA GENERADORA DE VAPOR

Como se ha comentado anteriormente, para generar el vapor que extraerá el aceite esencial de romero en la etapa de extracción, utilizaremos una resistencia eléctrica, la cual sea capaz de proporcionarnos la suficiente energía como para que se produzca la subetapa de calentamiento en el proceso de extracción.

Se sabe que la energía que necesitamos para que se produzca el proceso de calentamiento es de:

$$Q_{calent} = m_{vap_c} \cdot \lambda = 50.500,63 \text{ kJ} \quad \text{Ecuación 27}$$

El proceso de calentamiento sabemos que dura 7,46 minutos, por tanto, tendremos que la resistencia debe proporcionarnos una potencia de:

$$P_{resist} = \frac{Q_{calent}}{(7,46 \cdot 60) \text{ segundos}} = 112,85 \text{ kW} \quad \text{Ecuación 28}$$

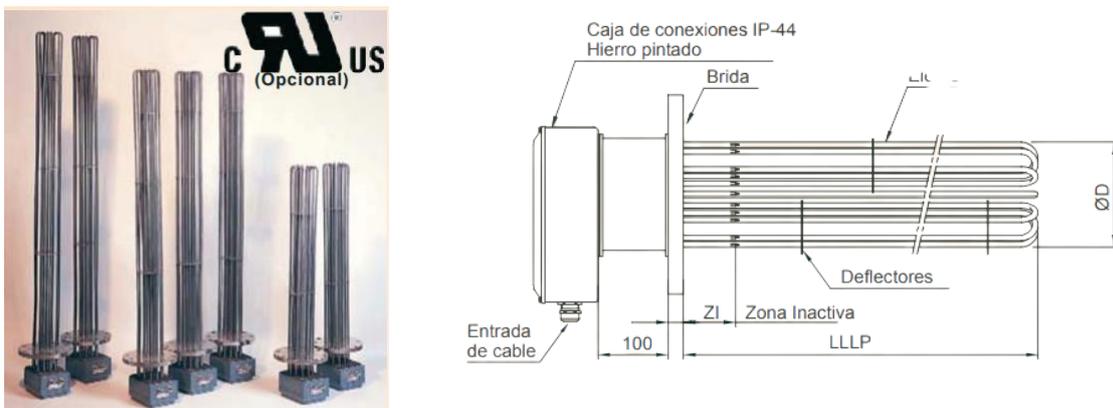


Figura 40. Resistencia eléctrica GCB-V para la generación de vapor [41]

Para cumplir las condiciones mencionadas anteriormente hemos seleccionado el modelo de resistencia GCB-V suministrado por el fabricante "BROTOTERMIC" cuya hoja de especificaciones se muestra a continuación:

IV. Estudio Económico

Tabla 23. Hoja de especificaciones resistencia GCB-V para la generación de vapor.

CARACTERISTICAS DEL EQUIPO	
Diámetro Nominal (mm)	250
Numero de varillas (Ø 10mm)	30
Longitud llano platina (mm)	1750
Potencia (kW)	114,75
Voltaje (V)	230 - 400
Temperatura de diseño (°C)	100 - 140
Presión de diseño (bar)	7,2
Coste (€)	2.862,63

Con este tipo de resistencia se encarecen mucho los costes, una propuesta para reducir estos costes sería el diseño de una caldera de vapor y comparar si estos costes se verán reducidos.

IV. Estudio Económico

IV.1.6. DIMENSIONAMIENTO LOS TANQUES DE ALMACENAMIENTO

En la planta de producción de aceite esencial de romero se utilizarán cuatro tanques de almacenamiento (TK-101, TK-102, TK-103), cada uno de ellos destinado a almacenar un tipo distinto de contenido.

TK-101 / TK-102: Destinados para almacenar agua.

TK-103 / TK-104: Destinados para almacenar agua de romero y aceite esencial respectivamente.

Para poder dimensionar los tanques, elegiremos un suministrador industrial que sea capaz de proporcionarnos tanques de la capacidad que necesitamos para almacenar los distintos tipos de contenido.



Figura 41. Tanque de almacenamiento de agua ZG3T

Para los tanques TK-101 y TK-102 dedicados al almacenamiento de agua se ha optado por comprar el modelo de tanque ZG3T fabricados por la compañía "HENAN ZHONGZAN MACHINERY CO" cuya hoja de especificaciones se muestra a continuación:

IV. Estudio Económico

Tabla 24. Hoja de especificaciones del tanque de almacenamiento de agua ZG3T

CARACTERISTICAS DEL EQUIPO	
Volumen (L)	3000
Diámetro interior (mm)	1400
Altura total (mm)	2900
Altura cilíndrica (mm)	2000
Máx. presión (MPa)	20
Coste (€)	996,07

Para los tanques de almacenamiento TK-103 y TK-104 destinados respectivamente a almacenar agua de romero y aceite esencial, se dimensionarán de acuerdo con la capacidad de producción del agua de aceite de romero y del aceite esencial.



Figura 42. Tanque de almacenamiento aceite esencial y agua de romero

Se ha elegido un tanque de almacenamiento de 15 litros para el tanque TK-104 suministrado por la compañía "Shandong Yuejiang machinery Co.". Para el tanque TK-103 se ha utilizado el mismo fabricante, pero con una capacidad superior 40 litros. La hoja de especificaciones de los dos modelos de tanques se muestra a continuación:

IV. Estudio Económico

Tabla 25. Hoja de especificaciones del tanque de 15 Litros

CARACTERISTICAS DEL EQUIPO	
Volumen (L)	15
Dimensiones (mm)	450 x 600
Espesor (mm)	0,8
Coste (€)	37,89

Tabla 26. Hoja de especificaciones del tanque de 40 Litros

CARACTERISTICAS DEL EQUIPO	
Volumen (L)	40
Dimensiones (mm)	550 x 700
Espesor (mm)	0,8
Coste (€)	89,56

IV. Estudio Económico

IV.1.7. DIMENSIONAMIENTO LAS BOMBAS Y VÁLVULAS

Para el dimensionamiento de las bombas centrífugas (P-101 y P-102) se ha seleccionado el modelo YLIZ50-32-125 fabricado por la marca "MINAMOTO" la cual es capaz de proporcionarnos el caudal que necesitamos en nuestra planta.



Figura 43. Bombas centrífugas YLIZ50-32-125 [42]

Para el correcto funcionamiento de la planta necesitaremos implantar dos bombas centrífugas de este modelo, cuya hoja de especificaciones se muestra a continuación:

Tabla 27. Hoja de especificaciones de la Bomba centrífuga YLIZ50-32-125

CARACTERISTICAS DEL EQUIPO	
Caudal volumétrico (m ³ /h)	15
Altura (m)	18,5
Velocidad (rpm/min)	2900
Potencia (kW)	2,2
Eficiencia (%)	60
Coste (€)	785

IV. Estudio Económico

Para el dimensionamiento de las válvulas, necesitaremos un total de 10 para poder regular los caudales del proceso.



Figura 44. Válvulas de bola con brida Q41F-16P

Se han seleccionado las válvulas de bola con brida fabricadas por la empresa “APIRT”, en concreto el modelo Q41F-16P ya que es capaz de aguantar altas presiones, presiones bajas y presiones medias.

La hoja de especificaciones de este equipo se muestra a continuación junto a su coste:

CARACTERISTICAS DEL EQUIPO	
Material	Acero inoxidable 304
Temperatura mínima (°C)	-40
Temperatura máxima (°C)	200
Presión (MPa)	1.6 - 32
Coste (€)	448

IV. Estudio Económico

IV.2. CRONOGRAMA DEL PROCESO (DIAGRAMA DE GANTT)

Como se ha mencionado al principio del proyecto, la planta que se ha diseñado trabajará en discontinuo, es decir, mediante la introducción de lotes.

En este capítulo del proyecto lo que se pretende es acoplar de manera temporal las etapas del proceso con el fin de conseguir que la planta trabaje 24 horas al día, siendo capaz de procesar 3 lotes diarios.

Para poder conocer esta secuenciación se ha trabajado con el programa Microsoft Project, el cual ha permitido crear el Diagrama de Gantt que se muestra a continuación:

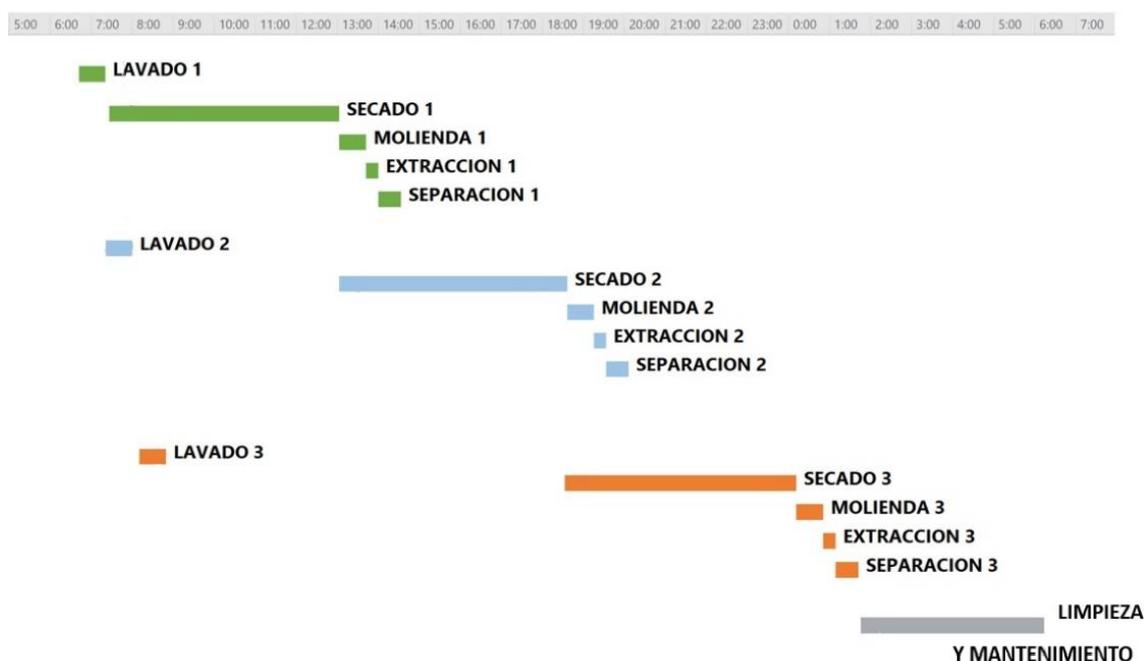


Figura 45. Secuenciación de las etapas del proceso (Diagrama de Gantt)

IV. Estudio Económico

Para poder realizar el anterior Diagrama de Gantt se debe tener con anterioridad los tiempos que necesitan cada equipo para llevar a cabo el proceso:

Lote 1

- Lavado 1: Durará 35 minutos teniendo en cuenta la cantidad de material que hay que procesar.
- Secado 1: Tendrá una duración de 4,47 horas, teniendo en cuenta los tiempos de carga y descarga del equipo, la operación completa tendrá una duración de 5 horas.
- Triturado 1: Tendrá una duración de 35 minutos, lo suficiente como para poder disminuir el volumen lo suficiente para una extracción eficaz.
- Extracción 1: Considerando los dos tiempos (calentamiento y extracción) el proceso tendrá una duración de 12,08 minutos, teniendo en cuenta los tiempos de carga y descarga el tiempo del proceso será de 16 minutos.
- Separación 1: Como para separar el agua y el aceite se usa una centrifugadora, esta es programable y por tanto el tiempo durante el que trabajará será de 30 minutos, suficiente para una correcta separación.

Para los siguientes lotes (Lote 2 y Lote 3) se tendrán en cuenta los mismos tiempos, lo que se deberá hacer hincapié es que las etapas de los lotes 2 y 3 comenzarán cuando termine el tiempo de operación de cada equipo.

Para el correcto y completo funcionamiento de la planta se han contratado a cinco operarios por turno, además del ingeniero que trabajarán a turno central (8:30 – 17:00).

IV. Estudio Económico

IV.3. ESTUDIO DE RENTABILIDAD ECONÓMICA

En el siguiente capítulo del proyecto se abordará la rentabilidad económica de la planta de producción de aceite esencial de romero. Para poder abordar el siguiente capítulo se partirá de la premisa de que el proceso de obtención de aceite esencial de romero se adicionará a una planta que ya está en funcionamiento y, por tanto, los costes de terreno, oficina y otros costes se suprimirán.

La rentabilidad económica se compone de dos etapas:

- Cuenta de pérdidas y ganancias
- Presupuesto de Tesorería → Flujos de entrada y salida

Para llevar a cabo el estudio de la rentabilidad económica de la planta se tendrán en cuenta los siguientes factores:

IV.3.1. ESTIMACIÓN DE LA INVERSIÓN INICIAL

La inversión inicial se conoce como el capital que se necesita aportar antes de poner en marcha la planta. Para poder calcular este coste se necesitan conocer con anterioridad otros factores que se mencionan a continuación.

- Capital Inmovilizado (CI)
- Capital Circulante (CC)
- Costes Precios (CP)
- Costes de la puesta en marcha (CPM)

IV. Estudio Económico

IV.3.1.1. CAPITAL INMOVILIZADO

El activo inmovilizado son los bienes y derechos adquiridos, o fabricados, por la compañía. Estos están destinados, de forma duradera, a la actividad principal de la empresa, por lo que es la partida más importante del activo no corriente.

El activo inmovilizado puede estar compuesto tanto de activos adquiridos por la compañía (maquinaria o terrenos, por ejemplo), como fabricados por la misma (patentes o software, por ejemplo).

Con el paso del tiempo, el inmovilizado, tanto material como intangible, pierde valor. Existen una serie de figuras contables para reflejar estas pérdidas de valor:

- La amortización y la depreciación: Reflejan la pérdida de valor por el uso habitual del inmovilizado.
- Deterioro de valor: Refleja la pérdida de valor por otros motivos distintos al uso habitual del inmovilizado. A diferencia de la amortización y la depreciación, este deterioro puede revertirse en un futuro. Esta figura no es exclusiva del inmovilizado; también existe deterioros de valor en las existencias o en las mercaderías.

Para poder calcular el capital inmovilizado se requiere conocer el coste de los equipos empleados en el proceso productivo. Existen una gran variedad de métodos de estimación de costes, para el cálculo del capital total inmovilizado utilizaremos el Método del factor múltiple de Vian.

IV. Estudio Económico

IV.3.1.1.1. COSTES DE LOS EQUIPOS

El coste total de los equipos será la suma de los costes de cada equipo individualmente.

Tabla 28. Coste de los equipos individuales

COSTE DE LOS EQUIPOS	
Lavadero (L-101)	5.322,25 €
Secadero (D-101)	4.823,76 €
Molino de martillo (M-101)	2.415,73 €
Extractor (T-101)	10.121,24 €
Intercambiador de calor (E-101)	3.457,11 €
Centrífuga (S-101)	785 €
Bombas centrífugas x2 (P-101, P-102)	1.570 €
Tanques de almacenamiento x4 (TK-101, TK-102, TK-103, TK-104)	2.119,59 €
Resistencia (R1)	2.862,63 €
Distribuidor de vapor	156,78 €
Válvulas	448
TOTAL	34.082,09 €

IV. Estudio Económico

IV.3.1.1.2. COSTE TOTAL DEL CAPITAL INMOVILIZADO

Ya obtenido el coste individual de los equipos, el siguiente paso es calcular el capital total inmovilizado en la planta. Para poder estimar este coste se hará uso del Método del factor múltiple de Vian, este método nos permite conocer cuál será el importe total del capital inmovilizado asignando previamente un porcentaje a cada grupo de componentes. Véase la **Tabla 29**

Tabla 29. Estimación de los costes que contribuyen al capital inmovilizado

Objeto	Importe	Coste (€)
Maquinaria (I ₁)	I ₁	34.082,09
Instalación (I ₂)	0,45 · I ₁	15.336,94
Tuberías (I ₃)	0,5 · I ₁	17.041,05
Instrumentación y control (I ₄)	0,15 · I ₁	5.112,31
Aislamiento (I ₅)	0,07 · I ₁	2.385,74
Instalación eléctrica (I ₆)	0,15 · I ₁	5.112,31
Edificaciones anteriores (I ₇)	0,15 · I ₁	5.112,31
Instalaciones auxiliares (I ₈)	0,40 · I ₁	13.632,84
Capital físico primario (Y)	$\sum_{n=1}^8 I_n$	97.815,59
Proyecto y dirección montaje (I ₉)	0,3 · I ₁	10.224,63
Capital directo (Z)	Y + I ₉	108.040,22
Contratista (I ₁₀)	0,04 · Z	4.321,61
Gastos no previstos (I ₁₁)	0,2 · Z	21.608,04

Si se tienen en cuenta los términos calculados anteriormente, el capital inmovilizado total se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$CI(2022) = Z + I_{10} + I_{11} = 133.969,87 \text{ €} \quad \text{Ecuación 29}$$

IV. Estudio Económico

IV.3.1.2. CAPITAL CIRCULANTE

El capital circulante es el conjunto de elementos que están en continuo movimiento dentro de la empresa, se caracterizan por participar en el proceso productivo. Este capital solo se recuperará con el cierre de la empresa.

El importe económico de este capital incluye las materias primas necesarias para que el proceso se lleve a cabo, el salario mensual de los trabajadores de la planta y la fabricación del producto entre otros factores.

Mediante el Método global se realizará una estimación del capital circulante. Esta estimación se resume en un porcentaje del capital inmovilizado. El capital circulante se considera que oscila entre el 10% y el 30% del capital inmovilizado. Se supone un valor medio del 20%.

$$CC (2022) = 0,2 \cdot CI (2022) = 26.793,97 \text{ €} \qquad \text{Ecuación 30}$$

Donde:

- CC es el capital circulante (€)
- $CI (2022)$ es el capital inmovilizado 2022 (€)

IV.3.1.3. COSTES PREVIOS Y COSTES DE PUESTA EN MARCHA (CP Y CM)

Se debe recalcar que los costes previos y los costes de puesta en marcha son dos conceptos diferentes:

- Costes previos: Es todo aquel capital necesario antes de empezar con el proyecto (gastos de I+D, estudios de mercado...)
- Costes de puesta en marcha: Se refiere a los gastos que se producen durante la puesta en marcha del proceso (limpieza, mantenimiento...)

Ambos costes se consideran gastos no previstos cuya cuantía está incluida en el capital inmovilizado, calculado por el Método de factor múltiple de Vian.

IV. Estudio Económico

IV.3.1.4. INVERSIÓN TOTAL INICIAL

La inversión total inicial se puede calcular mediante la expresión que se muestra a continuación si se tienen en cuenta el capital inmovilizado y el capital circulante.

$$I_0 = CI (2022) + CC = 160.763,84 \text{ €} \quad \text{Ecuación 31}$$

Con este valor se puede saber en qué porcentaje participan el capital inmovilizado y el capital circulante a la inversión inicial:

- Capital inmovilizado (CI) → 83,33% de la inversión inicial
- Capital circulante (CC) → 16,67% de la inversión inicial

IV.3.2. ESTIMACIÓN DE LOS COSTES DE PRODUCCIÓN

Los costes de producción son aquellos costes que emanan de la producción. Estos costes se dirigen de forma general a convertir las materias primas en producto acabado, de forma que, en cierta parte, determinan el valor añadido al producto acabado.

Estos costes se clasifican atendiendo al origen en:

- Costes de fabricación (M)
- Costes administrativos y de ventas (G)

Para calcular estos costes se procederá mediante el Método de estimación de Vian.

IV.3.2.1. COSTES DE FABRICACIÓN (M)

Para calcular los costes de fabricación se debe tener en cuenta tres factores:

- Materia Prima (M_1)
- Mano de obra (M_2)
- Servicios generales (M_5)

IV. Estudio Económico

IV.3.2.1.1. MATERIAS PRIMAS (M₁)

La materia prima que utilizaremos para el proceso productivo es la rama de romero fresco.

Si se conoce el consumo anual de ramas de romero fresco y el precio de comercialización de esta materia (5,81 €/kg) se puede obtener el coste de adquisición de la materia prima.

En la tabla que se presenta a continuación se muestra el coste de anual de la materia prima.

Tabla 30. Estimación de los costes de materia prima

Materia prima	Coste (€/kg)	Consumo anual (T/año)	Coste anual (€/año)
Rama de romero fresco	5,81	585	3.398.850

IV.3.2.1.2. MANO DE OBRA(M₂)

La mano de obra incluye a todas las personas que participan directamente en el proceso de fabricación. Para la planta diseñada en este proyecto el personal que participa en el proceso productivo son los operarios de fábrica y el ingeniero técnico industrial.

Está dictaminado por ley que los operarios deben trabajar 8 horas al día, 40 horas semanales. Como la empresa trabaja a tres turnos, será necesario un mínimo de 5 operarios para cubrir toda una semana completa.

Los salarios serán fijados según el convenio colectivo de la industria química con un total de 14 pagas.

La tabla que se presenta a continuación muestra los costes de mano de obra directa.

IV. Estudio Económico

Tabla 31. Estimación de los costes de mano de obra directa [37].

Cargo	Trabajadores	Sueldo bruto anual (€/año)	Sueldo bruto mensual (€/mes)
Operario	5	82.608,6	1.376,81
Ingeniero	1	24.286,13	2.023,84
TOTAL	6	106.894,73	8.907,89

IV.3.2.1.3. SERVICIOS GENERALES(M₅)

Los servicios generales incluyen todos fungibles que se utilizan en la planta de producción pero que no se han contabilizado en las materias primas por no intervenir directamente en el proceso (energía, recursos naturales...).

En este proyecto se va a considerar como servicios generales, únicamente el consumo de electricidad y el consumo de agua.

Para estimar el consumo de electricidad se tendrá en cuenta dos conceptos:

- El consumo de energía (kWh)
- La potencia contratada (kW)

Para el consumo de energía se tiene que contabilizar el tiempo que este operativo cada equipo y la potencia que gasta durante este tiempo, obteniendo los siguientes resultados:

IV. Estudio Económico

Tabla 32. Potencia unitaria de los quipos del proceso

EQUIPO	POTENCIA (kW)	TIEMPO TRABAJO (h)	CONSUMO DIARIO (kWh/día)	CONSUMO ANUAL (kWh/año)
Lavadero (L-101)	9,2	1,75	16,1	4.186
Secadero (D-101)	3,6	13,41	48,28	12.552,8
Molino de martillo (M-101)	2,75	1,75	4,81	1.250,6
Intercambiador de calor (E-101)	156	0,79	123,24	32.042,4
Centrífuga (S-101)	3	1,5	4,5	1.170
Bombas centrífugas x2 (P-101, P-102)	4,4	0,85	3,74	972,4
Resistencia (R1)	114,75	0,12	13,77	3.580,2
TOTAL	293,7	20,17	214,44	55.754,4

Para conocer la potencia que debemos contratar, debemos analizar el Diagrama de Gantt proporcionado para el acoplamiento entre los distintos lotes y observar en qué momento del día hay más de dos equipos funcionando a la vez. Si analizamos el Diagrama de Gantt podemos comprobar que los equipos que funcionan simultáneamente son:

- Secado 1 + Lavado 2 → 12,8 kW
- Secado 2 + Molienda 1 → 6,35 kW
- Secado 2 + Extracción 1 → 274,35 kW
- Secado 2 + Separación 1 → 6,6 kW

Como podemos observar mientras se produce el secado del segundo lote, se está produciendo la extracción, que es el proceso que más potencia requiere, por lo que la potencia mínima que deberemos contratar será de 274,35 kW/día.

El coste total de la energía quedara:

$$C_{M5e} = \left(55.754,4 \text{ kWh} \cdot 0,137994 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) + \left(71.331 \text{ kW} \cdot 0,08271 \frac{\text{€}}{\text{kW}} \right) = 13.593,56 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

Ecuación 32

IV. Estudio Económico

Donde los precios de la potencia y de la energía se han obtenido de la compañía Naturgy [38].

Para la estimación del coste de agua necesario para el proceso productivo tendremos en cuenta la cantidad de agua que hace falta para el proceso.

Tabla 33. Estimación del coste de agua anual

Objeto	Coste (€/m ³)	Consumo anual (T/año)	Coste anual (€/año)
Agua	1,91	223,979	427.800,25

Por lo tanto, los costes de los servicios generales totales quedarán de la siguiente forma:

$$C_{M5} = 427.800,25 + 13.593,56 = 441.393,81 \text{ €} \quad \text{Ecuación 33}$$

Teniendo en cuenta los factores anteriormente comentados y aplicando el Método de Vian se puede hacer una estimación de los costes debido a la fabricación del producto.

Tabla 34. Estimación de los costes provenientes del proceso de fabricación

Objeto	Importe	Coste (€)
Materia prima (M ₁)	M ₁	3.398.850
Mano obra directa (M ₂)	M ₂	106.894,73
Mano obra indirecta (M ₄)	0,15 · M ₂	16.034,21
Servicios generales (M ₅)	M ₅	441.393,81
Suministros (M ₆)	0,005 · CI	661,04
Mantenimiento (M ₇)	0,05 · CI	6.610,44
Laboratorio (M ₈)	0,1 · M ₂	10.689,47
Envasado y expedición (M ₉)	0,1 · CI	13.220,88
Directivos y empleados (M ₁₀)	0,15 · M ₂	16.034,21
Aseguradoras (M ₁₃)	0,01 · CI	1.322,08

En este proyecto los términos de patentes (M₃) y alquiler (M₁₂) no se contabilizarán ya que el proyecto se implantará en una empresa ya formada como se ha comentado con anterioridad.

IV. Estudio Económico

Por otra parte, la amortización (M_{11}) se calculará en otro apartado de forma más detallada.

Teniendo en cuenta la estimación por el “Método de Vian”, el coste total de fabricación se calcula como:

$$M = \sum_{i=1}^{13} M_i = 4.011.710,87 \text{ €} \quad \text{Ecuación 34}$$

IV. Estudio Económico

IV.3.2.2. COSTES DE ADMINISTRACIÓN Y VENTAS (G)

Los costes generales son aquellos costes que se desprenden del emprendimiento, es decir no afectan al proceso productivo de la empresa. Se incluyen dentro de estos costes funciones como el Marketing, administración o las finanzas de la empresa. En este proyecto como ya se ha comentado se parte de una empresa que ya está formada con su propia cartera de clientes, teniendo en cuenta, que, además, no se pide ningún préstamo, estos costes se consideran despreciables.

IV.3.3. ESTIMACIÓN DE LAS VENTAS

El capital que ingresa en la empresa gracias a las ventas tiene una participación muy grande en el capital que aporta la empresa. Para poder obtener beneficios, este capital tiene que ser mayor al coste de producción.

En este proyecto el producto acabado es el aceite esencial de romero, este producto constituye el total de los ingresos de ventas.

Se ha podido obtener que el aceite de romero industrial se vende a 1300 € el litro, este valor se ha elegido en base al catálogo de una empresa dedicada a la obtención de aceites esenciales [39]. Para nuestro caso elegiremos un precio de venta más barato (1100 €/litro) para poder ser competitivos en el mercado.

Por lo tanto, teniendo en cuenta estos datos se puede obtener una estimación de los ingresos por las ventas.

Tabla 35. Estimación de los ingresos gracias a las ventas.

Objeto	Precio venta (€/L)	Consumo anual (L/año)	Ingreso anual (€/año)
Aceite esencial de romero	1.100	3.710	4.081.000

IV. Estudio Económico

IV.3.4. RENTABILIDAD ECONÓMICA

Para poder conocer si el proyecto presentado es rentable y viable económicamente a largo plazo es necesario realizar varios estudios.

IV.3.4.1. FLUJO DE CAJA NETO (CF_t)

El flujo de caja neto o “Net cash Flow” tiene en cuenta todos los gastos y beneficios año a año durante un cierto periodo de tiempo. Este término es uno de los indicadores de mayor relevancia en la solvencia de la empresa ya que se define como el acumulo de activo durante un tiempo, en nuestro proyecto estimaremos un tiempo de vida útil de 15 años.

El flujo neto de caja se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$CF_t = \text{Beneficio neto} + \text{amortización} \quad \text{Ecuación 35}$$

Para esto, en primer lugar, se tiene que hacer un balance de flujos mediante los ingresos y gastos del primer año. Para obtener datos de los años futuros, se empleará una correlación de IPC (Índice de Precios y Consumos).

$$€ \text{ año}_i = € \text{ año}_{i-1} \cdot (1 + IPC) \quad \text{Ecuación 36}$$

Se han consultado bases de datos y se ha obtenido que el IPC para el 2022 es del 10,2 % [40].

Por otro lado, hay que tener en cuenta que la amortización son gastos que indican la disminución del valor de los equipos y las instalaciones. Para poder calcular la amortización se aplicará el Método del cálculo decreciente.

$$A_i = CI \cdot r \cdot (1 - r)^{i-r} \quad \text{Ecuación 37}$$

Donde:

- CI es el capital inmovilizado en 2022 (€)
- r es la tasa de amortización (€)
- i es el año de cálculo

IV. Estudio Económico

Para calcular la tasa de amortización se empleará la ecuación que se muestra a continuación:

$$r = 1 - \left(\frac{R}{CI}\right)^{\frac{1}{t}} \quad \text{Ecuación 38}$$

Donde:

- R es el valor residual. Se considera un 1% del capital inmovilizado (€)
- t es el periodo de amortización. Para nuestro proyecto 15 años (años)

En la **Tabla 37**, al final de este capítulo, se muestran los resultados obtenidos del flujo neto de caja para cada año.

IV. Estudio Económico

IV.3.4.2. VAN

El VAN, valor actual neto, es un parámetro que sirve para mantener actualizados los flujos de caja. Consiste en ir actualizando los ingresos y gastos de una inversión para conocer cuánto se va a ganar o perder. El VAN se puede calcular mediante la siguiente expresión.

$$VAN = -I_0 + \sum_t \frac{CF_t}{(1+i)^t} \quad \text{Ecuación 39}$$

Donde:

- VAN es el valor actual neto (€)
- I_0 es la inversión inicial (€)
- CF_t es el flujo neto de caja (€)
- i es el tipo de interés actual (10%)
- t es el tiempo de vida útil de la planta

IV.3.4.3. TIR

La tasa interna de retorno (TIR) es la rentabilidad que ofrece una inversión, es decir, es el porcentaje de beneficio o la pérdida que tendrá una inversión. También se define como la tasa de descuento que hace que el VAN sea cero.

Este tanto por ciento se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$0 = -I_0 + \sum_t \frac{CF_t}{(1+TIR)^t} \quad \text{Ecuación 40}$$

Donde:

- I_0 es la inversión inicial (€)
- CF_t es el flujo neto de caja (€)
- TIR es la tasa interna de retorno (%)
- t es el tiempo de vida útil de la planta

IV. Estudio Económico

IV.3.5. VIABILIDAD ECONÓMICA

Mediante los resultados obtenidos anteriormente, consecuencia de aplicar las expresiones mencionadas en los apartados posteriores se puede hacer un estudio de la viabilidad económica.

Los ingresos debidos a las ventas son mayores que los costes de producción, por tanto, se puede intuir que obtenemos beneficios y por tanto se recupera la inversión inicial.

Además, se obtiene un resultado del VAN de 546.208,89 euros, lo que significa un valor positivo del VAN, lo que deriva en que el proyecto genera rentabilidad y por lo tanto puede ser aceptado.

Finalmente, se ha obtenido un valor del TIR del 38,49% como este valor es mayor que la tasa mínima de rentabilidad, considerada de un 10%, se sigue confirmando que el proyecto se puede llevar a cabo.

Por último, un dato curioso sería conocer a partir de qué precio nuestro producto hace que el van sea nulo, es decir, obtenemos el precio mínimo de venta para que tras los 15 años de inversión no se produzcan ni pérdidas ni ganancias.

Para esto realizaremos una iteración con Excel hasta conseguir un valor del VAN igual a cero y por consiguiente obteniendo un valor del TIR del 10% durante los 15 años de inversión. El precio mínimo que hace que se cumplan condiciones mencionadas anteriormente es:

Tabla 36. Resultados del precio mínimo de venta.

Objeto	Precio mínimo de venta (€/L)	Valor Actual Neto (VAN)	Tasa Interna de Retorno (TIR)
Aceite esencial de romero	1.085,20606	0,00	0,00

IV. Estudio Económico

Lo que indica este precio es que tras los 15 años de inversión no se conseguirían beneficios según el estudio económico realizado en los apartados anterior. Se ha consultado bibliografía y se ha obtenido que una empresa dedicada a la fabricación de aceites esenciales llamada Gya-Labs [39], vende el aceite industrial de romero a un precio de 1300 € el litro de aceite esencial. Se ha decidido optar por el precio de venta de 1100 € el litro para el aceite esencial obtenido en esta planta debido a que en el segundo año ya se obtendrían beneficios netos y es un precio que es competitivo en el mercado ya que es menor que el precio que ofrece la casa comercial Gya-Labs.

IV. Estudio Económico

Tabla 37. Flujo neto de caja para cada año.

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Ingresos (€)	0	4081000,00	4497262,00	4955982,72	5461492,96	6018565,24	6632458,90	7308969,71	8054484,62	8876042,05	9781398,34	10779100,97	11878569,27	13090183,33	14425382,03	15896771,00
Costes (€)	0	4011710,87	4420905,38	4871837,73	5368765,18	5916379,22	6519849,90	7184874,59	7917731,80	8725340,45	9615325,17	10596088,34	11676889,35	12867932,06	14180461,14	15626868,17
Amortización M11 (€)	0	27884,77	20513,21	15090,39	11101,13	8166,46	6007,59	4419,44	3251,13	2391,67	1759,41	1294,30	952,14	700,43	515,27	379,05
Beneficio bruto (€)	0	41404,36	55843,41	69054,61	81626,66	94019,56	106601,40	119675,67	133501,69	148309,94	164313,75	181718,33	200727,78	221550,83	244405,63	269523,77
Beneficio neto (€)	0	0,00	35193,71	47466,90	58696,42	69382,66	79916,63	90611,19	101724,32	113476,43	126063,45	139666,69	154460,58	170618,61	188318,21	207744,78
CF (€)	-160763,84	27884,77	55706,92	62557,28	69797,54	77549,12	85924,22	95030,63	104975,45	115868,10	127822,85	140960,99	155412,72	171319,04	188833,48	208123,84

V. CONCLUSIONES

V.1. CONCLUSIONES

En la actualidad, la producción de aceites esenciales con fines cosméticos o alimentarios a escala mundial está en pleno crecimiento. Debido a que los aceites esenciales provienen de las plantas no suponen un gran impacto ambiental. Los residuos generados durante el proceso de obtención del aceite esencial se podrían revalorizar utilizándolos para la producción de compost para la posterior obtención de materia orgánica.

Para llevar a cabo este proyecto se ha elegido el aceite esencial de romero, ya que el romero es una planta muy abundante en la provincia de Alicante debido al clima que presenta.

El aceite esencial de romero se ha obtenido mediante la extracción con arrastre de vapor de agua, ya que es el método más eficiente y que más respeta el medio ambiente debido a que para la extracción se utiliza vapor de agua como líquido absorbedor.

Se ha propuesto un Diagrama de Gantt para el acoplamiento de las etapas del proceso, de forma que la planta pueda trabajar a 3 turnos de 8 horas por día, siendo capaz de procesar 750 kg de romero fresco en cada lote.

De la planta de extracción se espera extraer 3,92 kg de aceite esencial. Para realizar este proyecto se requiere una inversión inicial de 160.763,84 €. El precio mínimo al que se debería vender el aceite esencial de romero es de 1.085,20606 € el litro para que en 15 años no se obtengan ni ganancias ni pérdidas, es decir el VAN sea cero y el TIR del 10%. El precio de venta de nuestro aceite esencial se ha fijado en 1.100 € el litro ya que con este precio ya se obtienen beneficios en el segundo año de inversión y además es un precio competitivo ya que la casa comercial Gya-Labs vende su aceite esencial a 1.300 € el litro.

Desde el punto de vista económico el proyecto es viable ya que se obtiene un valor de VAN de 546.208,89 euros, es decir, positivo y un valor de TIR de 38,49% (mayor al 10%).

V. Conclusiones

Por último, hay que comentar que el proyecto desarrollado trabaja en los objetivos de desarrollo sostenible propuestos por las Naciones Unidas, en concreto, trabaja en los objetivos 9 y 12 ya nombrados en el apartado de II.3. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS).

VI. APÉNDICES

VI. Apéndices

VI.1. REFERENCIAS

M. F. Ordoñez Sánchez, «Manual práctico de Aceites esenciales, aroma y perfumes,» AIYANA, 2006, p. 7.

M. F. Ordoñez Sánchez, «Manual práctico de Aceites esenciales, aroma y perfumes,» AIYANA, 2006, p. 8.

P. A. M. M., «Aceites Esenciales,» Medellín, 2021.

L. R. Paredes Quiroz, «Extracción, caracterización y evaluación de la actividad,» Scientia Agropecuaria, Perú, 2012.

M. C. Flores Gutiérrez, *INVESTIGACIÓN DE LOS ACEITES ESENCIALES, SUS CARACTERISTICAS Y*, Santiago de Chile: Universidad de Chile, 2010.

«The Observatory of Economic Complexity (OEC),» 2019. [En línea]. Available: <https://oec.world/es>. [Último acceso: 03 03 2022].

«persistencemarketresearch.com,» Febrero 2022. [En línea]. Available: <https://www.persistencemarketresearch.com/market-research/essential-oils-market.asp>. [Último acceso: 22 Marzo 2022].

«Mint Essential Oils Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Cornmint, Peppermint, Spearmint, Dementholized Peppermint), By Application, By Usage (Direct, Indirect), And Segment Forecasts, 2019 - 2025,» Grand View Research, Noviembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/mint-essential-oils-market>. [Último acceso: 22 Marzo 2022].

«Essential Oils Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Orange, Cornmint, Eucalyptus), By Application (Medical, Food & Beverages, Spa & Relaxation), By Sales Channel, By Region, And Segment Forecasts, 2021 - 2028,»

VI. Apéndices

Grand View Research, Noviembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/mint-essential-oils-market>. [Último acceso: 22 Marzo 2022].

M. N. F. Cerutti, «Introducción a la obtención de aceite esencial de limón,»
10] 2004, pp. 149 - 155.

L. Delgado Márquez, Extracción del aceite esencial de mandarina (citrus
11] reticulata) utilizando dióxido de carbono en condición supercrítica como solvente.,
Venezuela, 2003.

A. Bandoni, Los Recursos vegetales aromáticos en latinoamérica. Su
12] aprovechamiento industrial para la producción de aromas y sabores, Buenos Aires:
CYTED, 2003.

J. Fortuny Santos, Metodología del análisis selectorial en el sistema
13] agroalimentario aplicada al subsector agrícola catalán. Evaluación de la
competitividad, el progreso tecnológico y la eficiencia económica empresarial,
lérica: Universidad Politénica de Catalunya, 2002.

«Región de Murcia,» [En línea]. Available:
14] https://www.regmurcia.com/servlet/s.SI?sit=c,543,m,2719&r=ReP-19848-DETALLE_REPORTAJESPADRE. [Último acceso: 23 Marzo 2022].

A. y. P. d. I. R. C. E. B. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales,
15] Bioquímica y Genética de las Antocianinas del Grano de Maíz, México: Instituto
Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias Centro de
Investigación Regional CentroCampo Experimental Bajío, 2012.

E. Flores Villa, «Romero (Rosmarinus officinalis L.): su origen,
16] importancia,» *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, vol. 23, p. 5,
2020.

E. Flores Villa, «Romero (Rosmarinus officinalis L.): su origen,
17] importancia,» *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, vol. 23, p. 4,
2020.

VI. Apéndices

«Ventos,» Leaders in essence, 2022. [En línea]. Available:
18] <https://www.ventos.com/es/producto/10563/essential>. [Último acceso: 23 Marzo 2022].

«Global Rosemary Extract Market - Industry Trends and Forecast to 2028,»
19] Data Briedge Market Research, 2021.

L. Bancharo , S. Carballo y J. Telesca, MANUAL DE SECADO SOLAR DE
20] ESPECIES MEDICINALES Y AROMÁTICAS PARA PREDIOS FAMILIARES,
Uruguay: DIGEGRA - MGAP, 2008.

E. Moré y R. Melero, TRANSFORMACIÓN DE PLANTAS AROMÁTICAS
21] Y MEDICINALES, Área de Productos Secundarios del Bosque del CENTRE
TECNOLÒGIC DE CATALUNYA, Barcelona.

«herbotecnia,» [En línea]. Available:
22] <http://www.herbotecnia.com.ar/poscosecha-secadoMaquinas.htm>. [Último
acceso: 09 Mayo 2022].

«TRE C,» [En línea]. Available: [https://www.resistencias-
electricas.com/productos/aire/resistencias-de-calentamiento-tubulares-y-
aletas/resistencias-tubulareslisas/](https://www.resistencias-
23] electricas.com/productos/aire/resistencias-de-calentamiento-tubulares-y-
aletas/resistencias-tubulareslisas/). [Último acceso: 09 Mayo 2022].

«SCHUTTE HAMMERHILL,» [En línea]. Available:
24] [https://www.hammermills.com/es/equipment/w-series-laboratory-scale-
hammer-mill/](https://www.hammermills.com/es/equipment/w-series-laboratory-scale-hammer-mill/). [Último acceso: 16 Mayo 2022].

«Spirax Sarco,» [En línea]. Available:
25] [https://www.spiraxsarco.com/global/es-ES/products/boiler-controls-and-
systems/steam-injectors](https://www.spiraxsarco.com/global/es-ES/products/boiler-controls-and-systems/steam-injectors). [Último acceso: 05 Julio 2022].

S. P. Jaramillo Jaramillo, *Aprovechamiento industrial del aceite esencial de*
26] *Dacryodes peruviana*, Ecuador, 2017.

E. López Arenales y J. M. Carvajal Albarracín, *Diseño y construcción de una*
27] *planta para la extracción de aceites esenciales con capacidad para 300 Kg de material*

VI. Apéndices

vegetal, Bucaramanga, 2009.

«Tecnología marítima blog spot,» 7 Agosto 2020. [En línea]. Available:
28] <http://tecnologia-maritima.blogspot.com/2020/08/intercambiador-de-calor-de-carcasa-y.html>. [Último acceso: 18 Mayo 2022].

«Climate-Data.org,» [En línea]. Available: <https://es.climate-data.org/europe/espana/comunidad-valenciana/alcoi-56855/#climate-table>.
29] [Último acceso: 11 Junio 2022].

F. H. d. J. Campo Sepúlveda, «EVALUACIÓN DEL SECADOR
30] MECÁNICO PARA EL SECADO DE TOMILLO (THYMUS VULGARIS) Y SU CONTRIBUCIÓN EN LAS CARACTERÍSTICAS FINALES DEL PRODUCTO PARA OBTENER EL CUMPLIMIENTO DE LA NORMA NTC 4423 (ICONTEC, 1998),» Institución universitaria, Medellín, Colombia, 2014.

A. Curioni , R. Righini, O. Antelo y W. Alfonso, «Secado de especies
31] aromáticas en la provincia de Bueno Aires. Factibilidad del recurso solar,» Buenos Aires, 2000.

J. H. Palomino Cahuana, «ESTUDIO DE LAS CONDICIONES DE SECADO
32] SOBRE LA CINÉTICA DE DESHIDRATACIÓN DE LAS HOJAS DE ROMERO (Rosmarinus officinalis L),» UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA, Perú, 2016.

T. Kovacı , E. Dikmen y A. Şencan Şahin, «Evaluation of heat mass
33] performances for freeze drying of mint leaves,» *Wiley*, p. 4, 2021.

C. Erlo Talanda, *THE DESING, CONSTRUCTION AND TESTING OF A
34] MOBILE ESSENTIAL OIL DESTILATION UNIT*, Pietermaritzburg, 2005.

S. Soon Chen y M. Spiro, «Kinetics of Microwave Extraction of Rosemary
35] Leaves in Hexane, Ethanol and a Hexane + Ethanol Mixture,» *Flavour and fragrance journal*, vol. 10, pp. 101-112, 1995.

T. Nogueira, E. M Mateus, C. Lopes, J. L. A.A. y . M. C. M.J., Pilot Steam
36] Distillation of Rosemary (*Rosmarinus officinalis L.*) from Portugal, Lisboa: Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação. Departamento de

VI. Apéndices

Tecnología de Industrias Químicas, Estrada do Paço do Lumiar, , 2006.

«Made in China,» [En línea]. Available: https://es.made-in-china.com/co_zhuchengtianshun/product_Fruit-and-Vegetable-Washer-Washing-Vegetable-Machine_eissyieny.html. [Último acceso: 16 Julio 2022].

«Made in China,» [En línea]. Available: https://es.made-in-china.com/co_hengchengfirst/product_CT-C-Series-Industrial-Tray-Dryer-Machine-CT-C-I-_ensgrhisg.html. [Último acceso: 18 Julio 202].

«Made in China,» [En línea]. Available: <https://es.made-in-china.com/productSearch?keyword=+HG-2000&file=&inputkeyword=Extractor+HG-2000&historywords=Sus+Palabras+claves+Recientes>. [Último acceso: 19 Julio 2022].

«Bowman,» [En línea]. Available: <https://ej-bowman.com/es/>. [Último acceso: 15 Julio 2022].

«Brotermic,» [En línea]. Available: <https://brototermic.com/>. [Último acceso: 15 Julio 2022].

«Alibaba,» [En línea]. Available: <https://spanish.alibaba.com/g/minamoto-pump.html>. [Último acceso: 10 Julio 2022].

«CCOO Industria,» 2 Agosto 2021. [En línea]. Available: https://industria.ccoo.es/Industria_quimica/Convenio. [Último acceso: 2022 Julio 13].

«Naturgy,» [En línea]. Available: https://www.naturgy.es/hogar/luz/tarifa_por_uso_luz#precios-y-condiciones. [Último acceso: 29 Julio 2022].

«Gya Labs,» 2022. [En línea]. Available: <https://gyalabs.com/products/rosemary-organic-essential->

VI. Apéndices

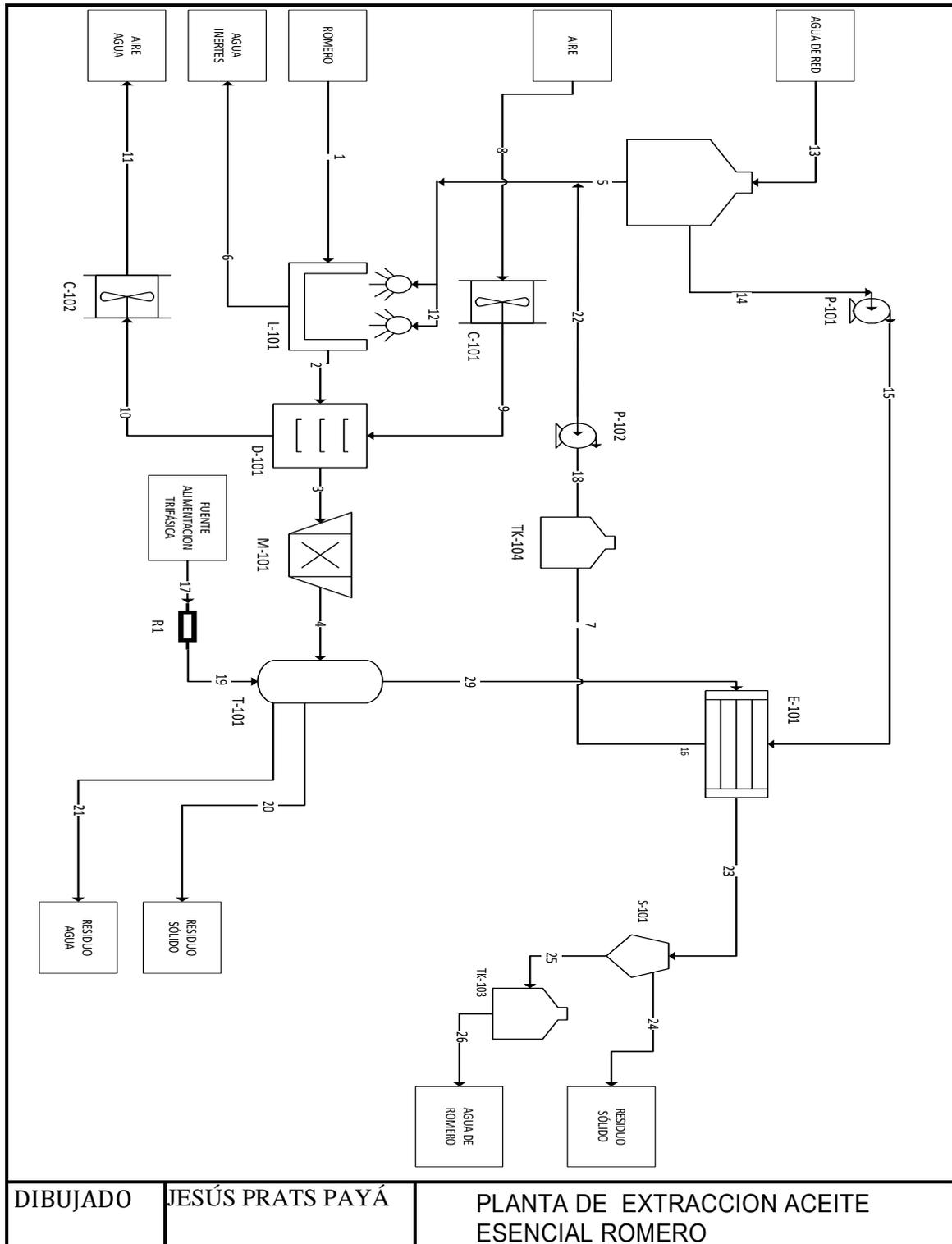
oil?_pos=3&_sid=af9a8b84a&_ss=r. [Último acceso: 17 Julio 2022].

«Instituto Nacional de Estadística,» 29 Junio 2022. [En línea]. Available:
46] <https://www.ine.es/daco/daco42/daco421/ipcia0622.pdf>. [Último acceso: 17 Julio 2022].

«Roams Energía,» [En línea]. Available:
47] <https://energia.roams.es/companias-energeticas/endesa/precio-kwh/>. [Último acceso: 17 Julio 2022].

VI. Apéndices

VI.2. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA PLANTA



VI. Apéndices

VI.4. TABLA DE PROPIEDADES DEL VAPOR DE AGUA A PRESIÓN ATMOSFÉRICA

T (°C)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^7$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
100.1	0.5973	2.044	122.7	20.54	25.1	20.56	0.9992
110	0.5808	2.023	126.4	21.77	25.78	21.94	0.992
120	0.5652	2.007	130.2	23.04	26.5	23.37	0.9861
130	0.5504	1.995	134	24.35	27.26	24.82	0.9812
140	0.5365	1.987	137.9	25.71	28.05	26.31	0.9771
150	0.5233	1.981	141.8	27.1	28.86	27.84	0.9735
160	0.5108	1.977	145.8	28.53	29.7	29.41	0.9703
170	0.4989	1.975	149.7	30.01	30.57	31.02	0.9675
180	0.4876	1.974	153.7	31.52	31.45	32.67	0.9649
190	0.4768	1.975	157.7	33.08	32.36	34.37	0.9624
200	0.4665	1.976	161.8	34.68	33.28	36.11	0.9602
220	0.4472	1.98	169.9	37.99	35.19	39.74	0.9559
240	0.4295	1.986	178.1	41.46	37.16	43.56	0.9519
260	0.4131	1.994	186.3	45.1	39.19	47.57	0.948
280	0.398	2.003	194.6	48.89	41.28	51.77	0.9444
300	0.384	2.013	202.9	52.84	43.41	56.16	0.9408
350	0.3529	2.04	223.7	63.38	48.96	67.98	0.9323
400	0.3266	2.07	244.5	74.87	54.75	80.98	0.9245
450	0.3039	2.102	265.2	87.26	60.76	95.13	0.9173
500	0.2842	2.135	285.7	100.5	66.97	110.4	0.9108
550	0.2669	2.168	306.1	114.7	73.35	126.8	0.9048
600	0.2516	2.203	326.2	129.7	79.89	144.2	0.8994

Fuente: S.A. Klein y F.L. Alvarado, "Engineering Equation Solver Software (EES)", Academia Versión 6.271 (20-07-2001).

VI. Apéndices

VI.5. TABLA DE PROPIEDADES DEL AGUA LÍQUIDA A PRESIÓN ATMOSFÉRICA

T (°C)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^6$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	$\beta \cdot 10^3$ (1/K)	Pr
0.001	1005	4.213	1766	1.757	567.2	0.1339	-0.08021	13.12
5	1004	4.201	1506	1.500	574.8	0.1363	0.01135	11.00
10	1003	4.191	1300	1.297	583.0	0.1387	0.08744	9.348
15	1001	4.184	1135	1.134	591.4	0.1412	0.1523	8.033
20	999.5	4.180	1001	1.001	599.8	0.1436	0.209	6.975
25	997.9	4.176	890.1	0.8920	608.0	0.1459	0.2594	6.114
30	996.2	4.175	797.6	0.8007	616.0	0.1481	0.3051	5.406
35	994.3	4.174	719.6	0.7238	623.6	0.1503	0.347	4.817
40	992.4	4.174	653.3	0.6583	630.7	0.1523	0.3859	4.323
45	990.3	4.175	596.3	0.6022	637.4	0.1542	0.4225	3.906
50	988.1	4.177	547.1	0.5537	643.6	0.1559	0.4572	3.551
55	985.7	4.179	504.2	0.5115	649.3	0.1576	0.4903	3.245
60	983.2	4.182	466.6	0.4746	654.4	0.1592	0.5221	2.981
65	980.6	4.184	433.5	0.4420	659.1	0.1606	0.5528	2.752
70	977.9	4.188	404.1	0.4132	663.2	0.1620	0.5827	2.551
75	975.0	4.191	378.0	0.3877	666.9	0.1632	0.6118	2.375
80	971.9	4.195	354.6	0.3648	670.2	0.1644	0.6402	2.219
85	968.8	4.199	333.6	0.3443	673.0	0.1654	0.6682	2.081
90	965.5	4.204	314.6	0.3259	675.5	0.1664	0.6958	1.958
95	962.1	4.209	297.5	0.3092	677.5	0.1673	0.723	1.848
100	958.5	4.214	281.9	0.2941	679.3	0.1682	0.7501	1.749

Fuente: S.A. Klein y F.L. Alvarado, "Engineering Equation Solver Software (EES)", Academia Versión 6.271 (20-07-2001).

VI. Apéndices

VI.6. TABLA DE PROPIEDADES DEL AIRE SECO A PRESIÓN ATMOSFÉRICA

T (°C)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^6$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
-150	2.867	0.9825	8.636	3.013	11.71	4.157	0.7246
-100	2.039	0.9656	11.9	5.835	15.82	8.034	0.7263
-90	1.927	0.9753	12.49	6.482	16.62	8.842	0.733
-80	1.828	0.9835	13.07	7.153	17.42	9.692	0.7381
-70	1.738	0.9901	13.64	7.85	18.22	10.59	0.7414
-60	1.656	0.9952	14.2	8.572	19.01	11.53	0.7433
-50	1.582	0.999	14.74	9.317	19.79	12.52	0.744
-40	1.514	1.002	15.27	10.08	20.57	13.56	0.7436
-30	1.452	1.004	15.79	10.88	21.34	14.65	0.7425
-20	1.394	1.005	16.3	11.69	22.11	15.78	0.7408
-10	1.341	1.006	16.8	12.52	22.88	16.96	0.7387
0	1.292	1.006	17.29	13.38	23.64	18.17	0.7362
5	1.269	1.006	17.54	13.82	24.01	18.8	0.735
10	1.247	1.006	17.78	14.26	24.39	19.44	0.7336
15	1.225	1.007	18.02	14.71	24.76	20.08	0.7323
20	1.204	1.007	18.25	15.16	25.14	20.74	0.7309
25	1.184	1.007	18.49	15.61	25.51	21.4	0.7296
30	1.164	1.007	18.72	16.08	25.88	22.08	0.7282
35	1.146	1.007	18.95	16.54	26.25	22.76	0.7268
40	1.127	1.007	19.18	17.02	26.62	23.45	0.7255
45	1.11	1.007	19.41	17.49	26.99	24.16	0.7241
50	1.092	1.007	19.63	17.97	27.35	24.87	0.7228
55	1.076	1.007	19.86	18.46	27.72	25.59	0.7215
60	1.06	1.007	20.08	18.95	28.08	26.31	0.7202
65	1.044	1.007	20.3	19.45	28.45	27.05	0.719
70	1.029	1.007	20.52	19.95	28.81	27.79	0.7177
75	1.014	1.008	20.74	20.45	29.17	28.55	0.7166
80	0.9996	1.008	20.96	20.97	29.53	29.31	0.7154
85	0.9857	1.008	21.17	21.48	29.88	30.07	0.7143
90	0.9721	1.008	21.39	22	30.24	30.85	0.7132
95	0.9589	1.009	21.6	22.52	30.6	31.63	0.7121
100	0.946	1.009	21.81	23.05	30.95	32.42	0.7111
110	0.9213	1.01	22.23	24.12	31.65	34.02	0.7092
120	0.8979	1.011	22.64	25.21	32.35	35.64	0.7073
130	0.8756	1.012	23.05	26.32	33.05	37.3	0.7057
140	0.8544	1.013	23.45	27.44	33.74	38.98	0.7041
150	0.8343	1.014	23.85	28.59	34.43	40.68	0.7027
160	0.815	1.016	24.24	29.74	35.11	42.4	0.7014
170	0.7966	1.017	24.63	30.92	35.79	44.15	0.7003
180	0.779	1.019	25.01	32.11	36.46	45.92	0.6992
190	0.7622	1.021	25.39	33.32	37.13	47.71	0.6983
200	0.7461	1.023	25.77	34.54	37.79	49.53	0.6974
210	0.7306	1.025	26.14	35.78	38.45	51.36	0.6967
220	0.7158	1.027	26.51	37.04	39.1	53.21	0.696
230	0.7016	1.029	26.88	38.31	39.75	55.08	0.6955
240	0.6879	1.031	27.24	39.6	40.4	56.97	0.695
250	0.6748	1.033	27.6	40.9	41.04	58.88	0.6946
260	0.6621	1.035	27.95	42.22	41.67	60.81	0.6942
270	0.6499	1.037	28.3	43.55	42.31	62.75	0.694
280	0.6382	1.04	28.65	44.9	42.93	64.72	0.6938
290	0.6269	1.042	29	46.26	43.56	66.69	0.6936
300	0.6159	1.044	29.34	47.64	44.18	68.69	0.6935

VI. Apéndices

VI.7. DIAGRAMA C-NTU- ϵ DEL INTERCAMBIADOR DE CARCASA Y TUBOS

