

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



**“DISEÑO DE PLANTA PILOTO PARA LA EXTRACCIÓN DE COMPUESTOS
FENÓLICOS A PARTIR DE RESIDUOS DE CAFÉ USANDO CO₂ COMO
FLUIDO SUPERCRÍTICO”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO QUÍMICO

Shessira Olenka, Vera Ponce

Melissa Thalia, Quiroz Burgos

Callao, 2021

PERÚ

DEDICATORIA

A Dios, por guiarnos en nuestras vidas y por darnos la fuerza de alcanzar nuestras metas.

A nuestra familia, en especial nuestros padres, hermanos y amigos cercanos por su constante soporte y comprensión en cada momento de nuestras vidas, sobre todo en esta etapa muy importante para nosotras, a puertas del título profesional.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, queremos agradecer nuestros padres quienes han sabido formarnos y guiarnos para poder convertirnos en las personas donde puedan ver reflejado sus esfuerzos y sacrificios brindados. También queremos agradecer a nuestros profesores de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Callao que con sus consejos y apoyo hicieron posible el desarrollo del presente trabajo de investigación.

ÍNDICE

TABLAS DE CONTENIDO	4
RESUMEN.....	6
ABSTRACT.....	7
INTRODUCCIÓN.....	8
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	10
1.1 Descripción de la realidad problemática	10
1.2 Formulación del problema	11
1.2.1 Problema general	11
1.2.2 Problemas específicos	11
1.3 Objetivos	12
1.3.1 Objetivo general	12
1.3.2 Objetivos específicos	12
1.4 Limitantes de la investigación.....	12
1.4.1 Limitantes teóricas	12
1.4.2 Limitantes temporales	13
1.4.3 Limitantes espaciales	13
II. MARCO TEÓRICO.....	14
2.1 Antecedentes	14
2.1.1 Antecedentes Internacionales	14
2.1.2 Antecedentes Nacionales.....	16
2.2 Bases Teóricas	19
2.2.1 Diseño de planta piloto para extracción con fluido supercrítico	19
2.2.2 Fluidos supercríticos	22

2.2.3	Extracción de componentes fenólicos con CO ₂ supercrítico.....	27
2.2.4	Granos de café gastados (SCG)	32
2.3	Conceptual.....	38
2.4	Definición de términos básicos.....	41
III.	HIPÓTESIS Y VARIABLES	43
3.1	Hipótesis	43
3.1.1	Hipótesis General.....	43
3.1.2	Hipótesis específicas.....	43
3.2	Definición conceptual de variables	43
3.2.1	Variable independiente.....	43
3.2.2	Variable dependiente	44
3.2.3	Operacionalización de las variables.	44
IV.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	46
4.1	Tipo y diseño de investigación	46
4.2	Método de investigación.....	46
4.2.1	Primera etapa de la investigación:.....	46
4.2.2	Segunda etapa de la investigación.....	46
4.2.3	Tercera etapa de la investigación.....	47
4.3	Población y muestra.....	47
4.4	Lugar de estudio y periodo desarrollado.....	48
4.5	Técnicas e instrumentos para la recolección de la información	48
4.5.1	Métodos o técnicas de recolección de datos	48
4.6	Análisis y procesamiento de datos	48
V.	RESULTADOS	49

5.1	Resultados descriptivos	49
5.1.1	Condiciones termodinámicas de proceso de extracción	49
5.1.2	Selección del equipo principal	54
5.1.3	Selección de equipos secundarios	60
5.2	Resultados inferenciales	77
VI.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	77
6.1	Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados.	77
6.1.1	Contrastación de hipótesis específica	77
6.1.2	Contrastación de hipótesis general	78
6.2	Contrastación de los resultados con otros estudios similares.	79
6.3	Responsabilidad ética de acuerdo con los reglamentos vigentes	80
VII.	CONCLUSIONES	81
VIII.	RECOMENDACIONES	82
IX.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
	ANEXOS.....	87

TABLAS DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Extracción de compuestos fenólicos de granos de café gastados	21
Tabla 2	Estudios en la extracción de aceite de granos de café gastados	22
Tabla 3	Propiedades críticas para fluidos supercríticos comunes	25
Tabla 4	Propiedades físicas de gases, líquidos y fluidos supercríticos	26
Tabla 5	Composición química de granos de café gastados	34
Tabla 6	Estudios en extracción de aceite de granos de café gastados	35
Tabla 7	Compuestos fenólicos identificados en granos de café gastados	37
Tabla 8	Operacionalización de variables	45
Tabla 9	Estados termodinámicos del CO ₂	51
Tabla 10	Resumen de especificaciones del Recipiente de extracción	59
Tabla 11	Resumen de especificaciones del Tanque pulmón	64
Tabla 12	Estados termodinámicos del refrigerante R-134a	67
Tabla 13	Propiedades físicas del CO ₂ y R134a en intercambiador de calor	68
Tabla 14	Propiedades físicas del CO ₂ en el calentador eléctrico	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Esquema simplificado del proceso de extracción con CO ₂	19
Figura 2	Extracción por fluido supercrítico para matrices sólidas	21
Figura 3	Diagrama de equilibrio de fases	23
Figura 4	Diagrama de fase densidad y presión del CO ₂	31
Figura 5	Diagrama de fases de presión y temperatura del CO ₂	32
Figura 6	Método de investigación	47
Figura 7	Esquema de componentes de la planta piloto	49
Figura 8	Diagrama de Presión – Entalpía del CO ₂	50
Figura 9	Propiedades mecánicas para el AISI 316	57
Figura 10	Ciclo termodinámico para el Refrigerante R-134a	66
Figura 11	Modelos de intercambiadores de calor de fabricante SWEP	69
Figura 12	Bombas industriales para aplicaciones de CO ₂ líquido	71
Figura 13	Modelos de calentadores eléctricos de CAS Aluminum Solutions	74
Figura 14	Regulador contrapresión modelo 26-1700 marca TESCO	75

RESUMEN

Los residuos de café gastados son subproductos con una gran fuente de compuestos fenólicos, su uso es de interés para diferentes industrias. Esta investigación se ha centrado en la extracción con CO₂ como fluido supercrítico ya que es una técnica más limpia que los procesos convencionales, además permite mantener los principios activos de las sustancias. En este trabajo, se ha desarrollado el diseño de planta a nivel piloto teniendo como primera etapa la revisión de la información científica con la finalidad de encontrar antecedentes de estudio. En base a las condiciones óptimas de extracción empleadas de la revisión bibliográfica, se determinó el ciclo termodinámico del proceso que constó de 6 etapas, siendo los parámetros de temperatura y presión de 20°C y 57.37bar; 0°C y 57.37bar, 17°C y 300bar; 40°C y 300bar; 21°C y 60 bar; 25°C y 60 bar, respectivamente para cada etapa. En conclusión, se diseñó y seleccionó el equipo principal, el recipiente de extracción, cuya capacidad es de 5L, con un diámetro interno de 155mm, una altura interna de 265 mm y espesor 19 mm para una presión de diseño de 330 bar y temperatura de trabajo de 40°C con un material acero inoxidable AISI 316. Como también se seleccionó y diseñó el tanque pulmón y se determinaron las condiciones de operación del intercambiador de calor de placas soldadas a flujo contracorriente modelo B12 del fabricante SWEP, selección de la bomba tipo reciprocante de pistón tríplex de la marca CAT PUMPS modelo 781KM, calentadores eléctricos modelo CAST-X-2000 del fabricante CAS Aluminum solutions y un regulador de presión.

Palabras claves: Extracción supercrítica con CO₂, granos de café gastados, fluido supercrítico.

ABSTRACT

Spent coffee residues are by-products with a great source of phenolic compounds, their use is of interest to different industries. This research has focused on extraction with CO₂ as a supercritical fluid since it is a cleaner technique than conventional processes, it also allows to maintain the active principles of the substances. In this work, the plant design has been developed at a pilot level, having as a first stage the review of scientific information to find study antecedents. Based on the optimal extraction conditions used in the literature, the thermodynamic cycle of the process was determined, which consisted of 6 stages, the temperature and pressure parameters being 20°C and 57.37bar; 0°C and 57.37bar, 17°C and 300bar; 40 ° C and 300bar; 21 ° C and 60 bar; 25°C and 60 bar, respectively for each stage. In conclusion, the main equipment was designed and selected, the extraction vessel, whose capacity is 5L, with an internal diameter of 155mm, an internal height of 265 mm and a thickness of 19 mm for a design pressure of 330 bar and temperature of work of 40°C with a material stainless steel AISI 316. As the buffer tank was also selected and designed and the operating conditions of the countercurrent flow brazed plate heat exchanger model B12 from the manufacturer SWEP were determined, selection of the reciprocating pump type of triplex piston from the CAT PUMPS brand model 781KM, electric heaters model CAST-X-2000 from the manufacturer CAS Aluminum solutions and a pressure regulator.

Key words: Supercritical CO₂ extraction, spent coffee grounds, supercritical fluid.

INTRODUCCIÓN

El café es una de las bebidas más consumidas, y la industria cafetera, cafeterías y restaurantes en el Perú, se ha incrementado a través de los años, como consecuencia, generan muchas toneladas de residuos sólidos de café gastados o *Spent Coffee Grounds* (SCG), el cual no tiene valor comercial y son eliminados, sin embargo debido a su alto contenido y la presencia de compuestos tales como cafeína, taninos y polifenoles pueden tener efectos negativos al medio ambiente (Diaz R. & Gonzales V, 2017) en ese contexto resulta atractivo el aprovecharlos ya que estos compuestos tienen muchas propiedades beneficiosas, que pueden ser de interés como materia prima para diferentes industrias y campos, como la alimentación, farmacéuticos o cosméticos, por lo que se considera una alternativa interesante para dar valor agregado a estos residuos y evitar impactos ambientales negativos.

En este ámbito, y siguiendo las tendencias actuales de sostenibilidad del ambiente, surge el desarrollar tecnologías para obtener productos finales más limpios y amigables. Por lo que, se plantea una técnica de extracción que permita el no causar daño al medio ambiente, extracción por fluido supercrítico, el cual tiene la característica de ser una tecnología de vanguardia, que a diferencia de otros métodos no deja residuos no deseados en el producto final, sin embargo en la actualidad, este método no es del todo utilizado en nuestro país por lo cual es considerado una tecnología innovadora, es por ello que se plantea el diseño de una planta piloto y permita impulsar este tipo de tecnología, a nivel laboratorio y su uso a escala industrial.

En este trabajo de investigación, se busca desarrollar un diseño de planta piloto para la obtención de compuestos fenólicos usando CO₂ como fluido supercrítico, buscando la manera de contribuir y ayudar a impulsar esta tecnología, y su posterior implementación en los laboratorios de la facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Callao.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción de la realidad problemática

La industria cafetalera, debido a su expansión generan grandes cantidades de granos de café molido durante su proceso, generando en todo el mundo alrededor de 6 000 000 de toneladas de residuos (Diaz R. & Gonzales V, 2017), estos residuos se conocen como *Spent Coffee Grounds* (SCG) y generalmente son eliminados, generando un impacto ambiental negativo, sin embargo pueden ser aprovechados debido a su alto contenido de compuestos fenólicos, que pueden ser empleados como materia prima para la elaboración de diversos productos dentro del campo de las diferentes industrias, entre ellas la industria cosmética, en donde se han vuelto de interés los efectos beneficiosos de los compuestos fenólicos para la elaboración de productos para tratamiento y prevención del envejecimiento de la piel.

Los métodos comúnmente usados para la extracción, involucran el uso de solventes orgánicos, sin embargo, en las industrias de productos cosméticos o en otras aplicaciones para consumo humano, es importante la eliminación de los residuos de solventes utilizados en el proceso de extracción, generando un costo adicional por lo que, teniendo en cuenta que, en estos tiempos, las industrias se ven obligadas a desarrollar tecnologías que ofrezcan productos de buena calidad y ser amigables con el medio ambiente, se plantea la alternativa de extracción de compuestos fenólicos mediante CO₂ supercrítico, debido a la velocidad, eficiencia y bajos costos,

además se evita el uso de solventes orgánicos, que representan una amenaza para el medio ambiente.

Al tratarse de un método atractivo e innovador para esta materia prima, se ve la necesidad e importancia de desarrollar este trabajo, y aplicar los conceptos para la selección del equipo principal que considera en la planta piloto.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿De qué manera se puede diseñar una planta piloto para la extracción de compuestos fenólicos a partir de residuos de café usando CO₂ como fluido supercrítico?

1.2.2 Problemas específicos

- a) ¿Cuáles son los parámetros de operación para la extracción de compuestos fenólicos a partir de los granos de café gastados usando CO₂ como fluido supercrítico?
- b) ¿Cuáles son los criterios para la selección del equipo principal para la extracción de compuestos fenólicos a partir de los granos de café gastados usando CO₂ como fluido supercrítico?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Diseñar una planta piloto para la extracción de compuestos fenólicos a partir de los granos de café gastados usando CO₂ como fluido supercrítico.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) Determinar los parámetros de operación para la extracción de compuestos fenólicos a partir de los granos de café gastados usando CO₂ como fluido supercrítico.
- b) Seleccionar el equipo principal para la extracción de compuestos fenólicos a partir de los granos de café gastados usando CO₂ como fluido supercrítico.

1.4 Limitantes de la investigación

1.4.1 Limitantes teóricas

La limitante teórica en esta investigación es la poca información respecto al diseño de una planta para la recuperación de compuestos fenólicos a partir de residuos de café gastados usando CO₂ como fluido supercrítico, mayormente la literatura brinda información sobre resultados de la recuperación a escala laboratorio. Así como también, los diseños teóricos encontrados fueron realizados a partir de otras materias primas.

El diseño de la planta se limitó a la determinación de los parámetros de operación y selección del equipo principal para llevar a cabo la extracción

de compuestos fenólicos mediante los datos de rendimientos de extracción de fuentes bibliográficas. No se abarcó etapas de ingeniería de detalle y evaluación económica luego del diseño, basándose esta tesis en un diseño teórico y no práctico y/o experimental.

1.4.2 Limitantes temporales

En la presente investigación no se encontraron limitantes con respecto al tiempo de la ejecución de esta.

1.4.3 Limitantes espaciales

Se ha recolectado esta información de fuentes secundarias, producto de investigaciones previas, ejecutadas por entidades destacadas dedicadas a la investigación relacionadas con los indicadores necesarios, basándose esta tesis en un diseño teórico.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

2.1.1 Antecedentes Internacionales

Ortiz (2020) "***Evaluación de una propuesta para la obtención de cafeína partiendo de residuos de café generados por la industria cafetera***", desarrolló una propuesta de diseño conceptual para la extracción de cafeína con el fin de aprovechar estos residuos mediante el método de extracción asistida por ultrasonido manteniendo la relación sólido/solvente constante en una proporción de 1/20 g/ml sobre los contenidos de cafeína de los extractos, encontrando que los valores óptimos estaban a 37°C y 312 minutos. Además, estimó el costo del proceso para una capacidad de producción de 60 kg/mes, logrando un rendimiento y pureza para la pulpa y grano de café gastado de 83.30%, 90.04%; y 98.76%, 98.43% respectivamente.

Rattana & Israpong (2019) "***Recovery of spent coffee grounds oil using supercritical CO₂: Extraction optimization and physicochemical properties of oil***", evaluaron los métodos de extracción Soxhlet, extracción supercrítica con CO₂ y la extracción acelerada de disolventes en granos de café gastados de café Arábica, encontrando que estos diferentes métodos no mostraron diferencias significativas en la cantidad de aceite obtenido. Seleccionaron el método de extracción con CO₂ supercrítico para estudiar y determinar la composición del aceite obtenido, debido a las ventajas de esta tecnología de trabajar a baja temperatura evitando la degradación

térmica de compuestos volátiles. La condición de extracción óptima para un alto rendimiento y mejores propiedades de aceite crudo, se obtuvo cuando simultáneamente se establecieron las siguientes condiciones: 50°C, 200 bar y 2h con flujo de CO₂ de 110-170 L/h, obteniendo un rendimiento de 12.14%, índice de acidez de 3.89 mg KOH/g de aceite, 2.11% de ácidos grasos libres y un valor de TBARS de 0.76 mg de malondialdehído/kg de aceite; demostrando el potencial de este método como tecnología verde y los granos de café como una valiosa fuente de ácidos linoleicos y palmíticos.

Ribeiro et al. (2013) "***From coffee industry waste materials to skin-friendly products with improved skin fat levels***". Los autores estudiaron la viabilidad de extraer la fracción lipídica de granos de café gastados mediante la extracción con CO₂ supercrítico para formulaciones cosméticas. Realizaron las extracciones de con CO₂ utilizando 0,5 kg de granos de café gastados secos por lote a 55°C, 250 bar con un promedio de CO₂ de 15 kg / h para 1 hora aproximadamente de extracción. Concluyeron que el uso de una crema al 10% de esta fracción de aceite mejoró los niveles de lípidos cutáneos e hidratación.

Andrade et al. (2011) "***Supercritical fluid extraction from spent coffee grounds and coffee husks: Antioxidant activity and effect of operational variables on extract composition***", describieron al café como una bebida popular, la cual genera una cantidad de carga ambiental en forma de granos de café gastado (SCG), derivada de la porción no utilizada.

Estudiaron la composición química y la actividad antioxidante de granos de café gastados y cascarillas de café obtenida por extracción con CO₂ supercrítico y con CO₂ con etanol como cosolvente. Determinó las condiciones óptimas de operación para la extracción con CO₂ supercrítico con flujo del solvente 11.2 g/min, 2.3 h, 313.15 K, 300 bar con rendimiento de 10.5 ± 0.2% de extracción de componentes fenólicos a partir los granos de café gastados.

Couto et al. (2009) “**Supercritical fluid extraction of lipids from spent coffee grounds**”, estudiaron la extracción de aceite de granos de café gastados con fluido supercrítico CO₂ en diferentes condiciones. Obtuvieron un máximo porcentaje de recuperación de 15% de fracción lipídica con los parámetros de operación de 313-333K, 3h, 15-30MPa y con un flujo de solvente CO₂ de 10 g/min. Además, encontraron que elevando la temperatura de extracción condujo a una disminución del rendimiento de extracción. Los ácidos palmítico y Linoleico fueron los principales ácidos grasos determinados, aproximadamente 35% cada uno del total contenido de ácidos grasos del aceite.

2.1.2 Antecedentes Nacionales

Quevedo (2019) “**Diseño de una planta piloto de extracción de aceite esencial de limón usando CO₂ como fluido supercrítico**”, desarrolló el diseño de una planta piloto, en el cual hizo uso de CO₂ en estado supercrítico como el solvente para la extracción de aceite esencial de

cáscara fresca de limón. Determinó las condiciones óptimas de 200 bar, 45°C con un volumen de recipiente de extracción de 5L. Desarrolló el diseño de la planta piloto con la debida revisión bibliográfica, posteriormente determinó las ecuaciones que se utilizaran para el correcto dimensionamiento en el diseño del equipo principal y equipos secundarios, realizó la selección del material acero inoxidable del tipo AISI 316. Así mismo determinó los datos necesarios para la selección de accesorios que de la planta piloto. Finalmente, cotizó el costo de implementación de la planta piloto, obteniendo la suma de s/.104535.46 + IGV, el cual incluyó compra y fabricación de equipos, servicios de ingeniería y montaje de equipos.

Ochoa (2017) "***Diseño de una planta piloto de extracción bio-botánica utilizando dióxido de carbono supercrítico***", identificó las especies botánicas que puedan beneficiarse de esta tecnología de extracción con CO₂ supercrítico, como la páprika, café, cacao entre otros. Para el diseño de la Planta piloto empleó las condiciones de extracción de Omega-3 del Sacha inchi por requerir las más altas especificaciones de presión y temperatura de 300 bar y 60°C respectivamente para poder procesar la mayoría de biomateria del país. A partir de estos parámetros determinó el ciclo termodinámico y diseño mecánico para procesar 5 litros de biomateria con un flujo másico de solvente CO₂ de hasta 1 kg/min por corrida, capaz de trabajar hasta 300 bar y 100°C. Realizó la cotización de la implementación de la planta piloto obteniendo un costo de US\$ 60812.27

incluido IGV, el cual incluyó compra de equipos, fabricación de equipos, servicios de ingeniería y montaje de equipos.

Cuellar (2017) “***Diseño de la automatización para un Planta piloto de Extracción por fluido supercrítico utilizando CO₂ como solvente***”, diseñó la automatización de una planta piloto de extracción por fluido supercrítico utilizando CO₂ como solvente. Determinó el circuito termodinámico en forma circular para reutilizar el CO₂. Tuvo como parámetros de operación 145 bar y 40°C. Con el ciclo termodinámico diseñó la instrumentación y la parte eléctrica por medio de un PCL-1200 de Siemens, además considero el diseño mecánico de las investigaciones realizadas en la Universidad Guelph de Canadá y la Pontificia Universidad Católica del Perú.

Vivar (2013) “***Diseño de una Planta piloto de extracción de oleorresina de páprika usando CO₂ como fluido supercrítico***”, realizó el diseño de una planta piloto con un proceso tipo *batch* de 15 min cada lote, con un volumen de recipiente de extracción de 5 L, el cual le permitió obtener 0.25 kg/h de oleorresina de páprika a partir de 2,6 kg/h de páprika en polvo y 13 kg/h de CO₂. La planta piloto tuvo la capacidad de alcanzar 400 bar y 55°C que fue el punto óptimo de extracción para la oleorresina de páprika, para esto definió mediante la ingeniería básica los siguientes equipos principales: un recipiente pulmón de CO₂ líquido, dos intercambiadores de placas soldadas, una bomba reciprocante de triple émbolo, un recipiente de extracción enchaquetado, un ciclón que funciona como recipiente de separación y un recipiente de almacenamiento de CO₂ gaseoso.

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 Diseño de planta piloto para extracción con fluido supercrítico

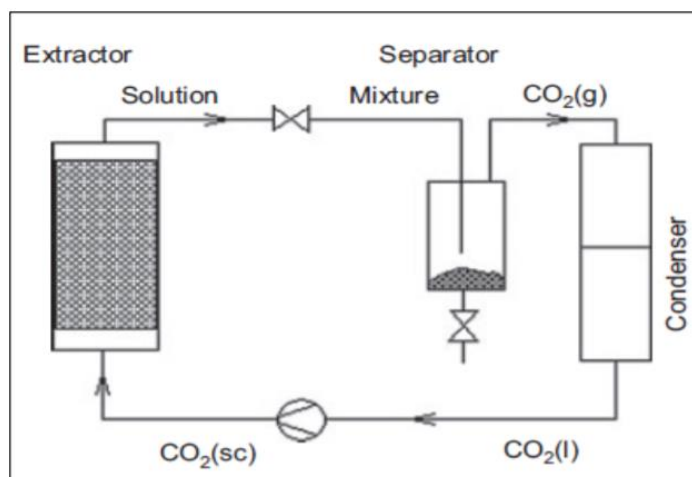
El diseño de planta piloto se define como una aproximación para dar solución a un problema de manera sistemática. Esto aplicado a un grupo de datos que deben ser analizados y con esto mejorar los resultados mediante el control y el monitoreo del sistema.

En el proceso de extracción con fluido supercrítico (EFS) los cuatro pasos principales implicados son: acondicionamiento del solvente, extracción, expansión y separación; por lo que se puede decir que los cuatro componentes críticos correspondientes necesarios Figura 1.

- Bomba para aumentar la presión del solvente
- Extractor de alta presión
- Válvula de reducción de presión
- Separador de baja presión

Figura 1

Esquema simplificado del proceso de extracción con CO₂



Fuente: Quevedo (2019)

Extracción con fluido supercrítico de compuestos desde una matriz sólida

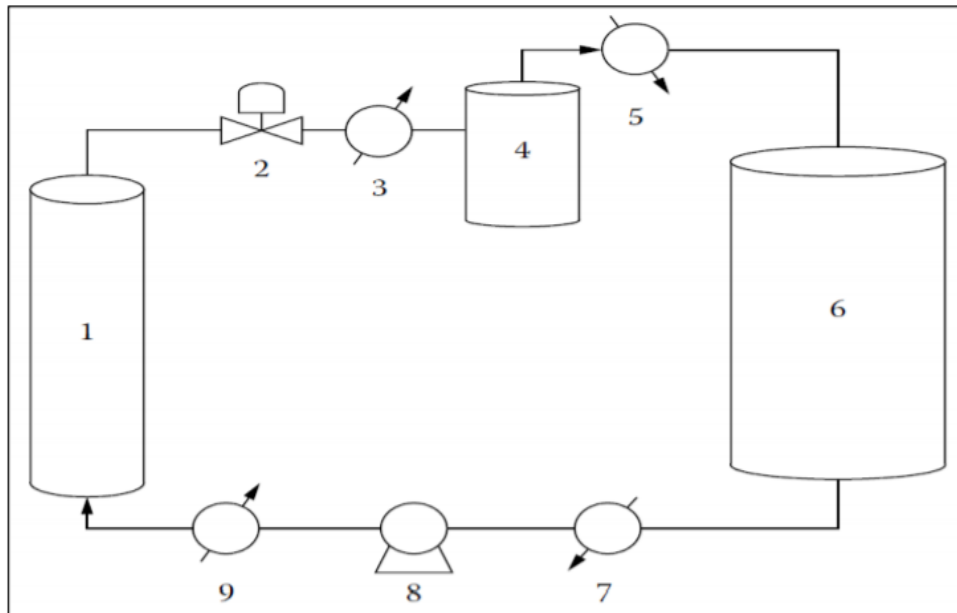
Según las investigaciones que se ha encontrado la mayoría de los desarrollos industriales en las extracciones por fluido supercrítico se ha realizado sobre materia prima solida o matrices sólidas. El proceso según se puede ver en la Figura 2, el solvente antes de ingresar a la bomba se debe subenfriar, convirtiéndose este en líquido y evitar la cavitación de la bomba, luego antes de su ingreso al extractor el solvente es calentado por encima de su temperatura crítica hasta la temperatura de extracción. En el extractor donde se encuentra la matriz sólida es calentado a la temperatura de extracción, el solvente en estado supercrítico fluye a través de todo el extractor extrayendo los compuestos solubles de la matriz sólida.

El fluido supercrítico junto al extracto, abandonan el extractor por la parte superior, a través de una válvula reductora de presión, de tal modo que los compuestos se precipitan (Ochoa, 2017).

Para garantizar la precipitación total del soluto, el solvente en estado supercrítico se calienta por encima de su temperatura de saturación para alcanzar la fase gaseosa. Luego el material deseado o soluto se recolecta en el separador mientras el solvente en estado gaseoso abandona el recipiente de separación por la parte superior y es recirculado hacia el recipiente de extracción (Ochoa, 2017).

Figura 2

Extracción por fluido supercrítico para matrices sólidas



Nota: (1) Recipiente de Extracción, (2) Válvula de Reducción de Presión, (3) Vaporizador, (4) Separador, (5) Condensador, (6) Receptor, (7) Pre Enfriador, (8) Bomba, (9) Pre Calentador.

Fuente: Ochoa (2017)

En la Tabla 1 se muestra las mejores condiciones de operación experimentales de presión y temperatura para la extracción supercrítica de compuestos fenólicos a partir de granos de café gastados.

Tabla 1

Extracción de compuestos fenólicos de granos de café gastados

Método	Condiciones	Rendimiento	Autor
Extracción con CO ₂ supercrítico	Flujo del solvente 11 ± 2 g/min, 2.3h, 313.15K, 300 bar, materia prima 15g	Rendimiento: 10.5 ± 0.2% TPC: 21.5 ± 0.8mg CAE/g extracto DPPH: 15.2 % ABTS: 7.3 ± 0.1 %	Andrade, K. S., Gonçalves, R. T., Matachín, M., Ribeiro-do-Valle, R. M., Martínez, J., & Ferreira, S. R. S. (2012).

çFuente: McNutt (2018)

Tabla 2*Estudios en la extracción de aceite de granos de café gastados*

Método	Condiciones	Rendimiento	Autor
Extracción con CO ₂ supercrítico	313-333K, 3h, 15-30 MPa	15%	Couto et al. (2009)
Extracción con CO ₂ supercrítico	Flujo del solvente entre 110 y 170 L/h, 2h, 50°C, 200 bar	12.11 ± 1.33%	Rattana Muangrat & Israpong Pongsirikul (2019)
Extracción con CO ₂ supercrítico	Flujo del solvente 15 kg/h, 1h, 55°C, 250 bar, 0.5 kg SGC	12.1%	H. Ribeiro et al. (2013)
Extracción con CO ₂ supercrítico	220.90 min, 33.18°C, 28.40 MPa	11.41%	N.A. Akgun, H. Bulut, I. Kikic, D. Solinas, (2014)

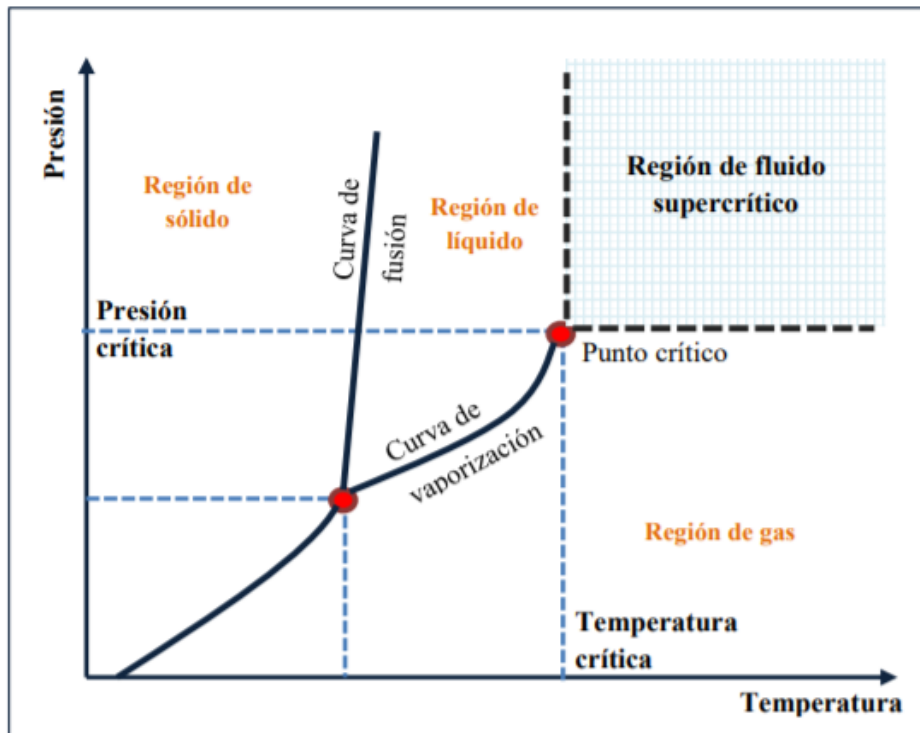
Fuente: McNutt (2018)

2.2.2 Fluidos supercríticos

Los estados de la materia son dependientes de la temperatura y la presión y estos son sólido, líquido y gaseoso. Esto quiere decir que, para una determinada presión y temperatura, la materia va a presentar ciertas propiedades que son características de la región o estado en el que se encuentre (Vivar, 2013). Este comportamiento se puede ver en el diagrama de fase de la Figura 3.

Figura 3

Diagrama de equilibrio de fases



Fuente: Gavilán (2016)

Como podemos ver en el diagrama de fases, este se divide en tres zonas representando cada uno de los estados básicos de la materia: sólido, líquido y gas. En el diagrama se resumen las condiciones de una sustancia, como podemos visualizar si se mantiene la presión y se aumenta la temperatura, y se comienza en estado sólido, se funde para pasar al estado líquido y finalmente se evapora para pasar a gas. Las líneas que separan las regiones indican las condiciones en las que estos estados pueden estar en equilibrio (Vivar, 2013).

Como se puede observar en el diagrama de equilibrio de la Figura 2, a partir de determinada presión se puede calentar el líquido sin encontrar el punto

de evaporación, es decir la sustancia solo se va a poner cada vez más caliente sin que ocurra algún cambio repentino. El valor de presión y temperatura característico en el cual las fases líquidas y gaseosas no se pueden distinguir, se conoce como el punto crítico y está determinada por una presión y una temperatura críticas. Por encima de este punto crítico en el diagrama de equilibrio se observa que existe una región aparentemente desconocida. El estado de la sustancia que se encuentra en esta región se conoce como fluido supercrítico (FSC). Esta sustancia se comporta como un gas, llena y toma la forma del depósito que lo contiene, características que no tiene cuando se encuentra en estado líquido (fluido no compresible que ocupa el fondo del depósito).

Los valores de P_c y T_c son características de cada sustancia y pueden ser muy distintas unas de otras, como se muestra en la Tabla 3, en la que se muestra los valores críticos para las sustancias más usadas en la extracción por Fluido Supercrítico. Algunas sustancias alcanzan el estado supercrítico a niveles relativamente moderados de presión y temperatura, como es el caso del Dióxido de Carbono (CO_2) o el Monóxido de Dinitrogeno (N_2O), mientras que otras sustancias, como el Agua (H_2O) o el Amoniacó (NH_3) requieren elevados valores de presión y temperatura para alcanzar el estado supercrítico. Esto último es una característica crucial al momento de determinar que sustancia se debería utilizar como fluido supercrítico para un proceso de extracción determinado (Ochoa, 2017).

Tabla 3*Propiedades críticas para fluidos supercríticos comunes*

Sustancia	Temperatura crítica (°C)	Presión crítica (MPa)	Densidad crítica (g/cm ³)
Etileno	9.3	5.04	0.22
Xenón	16.6	5.84	0.12
Dióxido de carbono	31.1	7.38	0.47
Etano	32.2	4.88	0.20
Óxido nitroso	36.5	7.17	0.45
Propano	96.7	4.25	0.22
N-butano	152.1	3.80	0.23
N-pentano	196.5	3.37	0.24
Isopropanol	235.2	4.76	0.27
Metanol	239.5	8.10	0.27
Tolueno	318.6	4.11	0.29
Agua	374.2	22.05	0.32

Fuente: Quevedo (2019)

Propiedades de los fluidos supercríticos

Los fluidos supercríticos presentan un gran atractivo para ser utilizados como solventes ya que poseen propiedades de solvatación similares a las de los líquidos debido a que presentan densidades similares, pero a la vez los coeficientes de difusión de los solutos en un fluido supercrítico son mucho mayores que en un disolvente líquido debido a que su viscosidad es mucho menor (Ochoa, 2017). Los fluidos supercríticos poseen unas propiedades fisicoquímicas intermedias entre las de los gases y líquidos, como podemos observar en los valores de la Tabla 4.

Por lo que se deduce que la extracción sea tan completa por fluidos supercríticos como la que se realiza a cabo con solventes líquidos ya que ambos presentan características similares y a la misma vez, que sea mucho más eficiente y rápida, ya que su baja viscosidad facilita la transferencia de masa y penetrabilidad en la matriz del material que contiene el material requerido o soluto.

Tabla 4

Propiedades físicas de gases, líquidos y fluidos supercríticos

Fluido	Densidad (g/ml)	Viscosidad (Pa.s)	Difusividad (cm ² /s)
Gases	10 ⁻³	10 ⁻⁵	10 ⁻¹
FSC	0.2 – 0.9	10 ⁻⁴	10 ⁻⁴
Líquidos	0.6 – 1.6	10 ⁻³	10 ⁻⁵

Fuente: Ochoa (2017)

En general se puede mencionar que los FSC tienen las siguientes propiedades:

- Densidad entre 100 a 1000 veces mayor que la de un gas y comparable con la de un líquido, como resultado las propiedades de solvatación son similares a la de los líquidos (Vivar, 2013).
- Valores de viscosidad de 10 a 100 veces más bajos y coeficiente de difusión de 10 a 100 veces más altos con respecto al de los líquidos, lo que hacen que la transferencia de masa de solutos en extracciones con fluidos supercríticos sea significativamente más alta que en las extracciones con líquidos (Vivar, 2013).

- Los fluidos supercríticos pueden dar lugar a reacciones que son difíciles o incluso imposibles de conseguir con los solventes convencionales (Ochoa, 2017).

2.2.3 Extracción de componentes fenólicos con CO₂ supercrítico

Principios de separación química en extracción por fluidos supercríticos

La extracción supercrítica es una operación unitaria de transferencia de masa que se basa en que el solvente se encuentra en su estado supercrítico; esta extracción permite controlar y manipular propiedades tales como la difusividad y densidad del fluido mediante pequeños cambios de presión y temperatura, lo que conlleva a una variación en la selectividad y el poder de solvencia de este (Moreno, 2017).

La extracción por fluidos supercríticos en productos naturales se lleva a cabo utilizando el principio de percolación. El principio de la filtración implica la penetración de disolvente en los poros de la matriz de la muestra para extraer los solutos (Gavilán, 2016).

El proceso de extracción es determinado por las propiedades tanto de soluto a extraer y el disolvente. El efecto de los factores tales como la densidad, la viscosidad y la tensión superficial del disolvente debe tenerse en cuenta de forma individual. En el caso de una extracción de muestra sólida, de baja viscosidad y la tensión superficial aumentan la tasa de

percolación y el rendimiento del extracto ya que el paso del disolvente a través de capilares estrechos se facilita y acelera (Gavilán, 2016).

El proceso de extracción mediante fluidos supercríticos cuenta con 4 etapas básicas que son:

- Etapa de presurización: con el fin de alcanzar la presión necesaria del solvente para la extracción que se requiere ya sea por medio de un compresor o de una bomba.
- Etapa de ajuste de temperatura: Remoción o adición de energía térmica ya sea con un intercambiador de calor, baños térmicos o resistencias eléctricas, para llevar el fluido comprimido a la temperatura de extracción requerida.
- Etapa de extracción: Es llevada a cabo en un recipiente extractor a alta presión, el cual contiene la matriz que será procesada. En esta etapa, el fluido entra en contacto con la matriz sólida y arrastra el soluto deseado, el cual son los componentes fenólicos.
- Etapa de separación: Consiste en separar la sustancia extraída del solvente, en condiciones de baja temperatura y presión (Moreno, 2017).

Ventajas de CO₂ supercrítico como solvente

En comparación con otros tipos de solventes y extracciones, las principales ventajas por las que se utiliza fluidos supercríticos son las siguientes:

- Menores tiempos de extracción
- Uso generalmente de un fluido no corrosivo, no inflamable y no tóxico.
- Extracción a temperaturas altas sin afectar a compuestos termolábiles
- Separación de los solutos del fluido supercrítico
- Alta pureza del solvente
- Posibilidad de realizar fraccionamientos
- Posibilidad de seleccionar el tipo de extracción eligiendo la polaridad del fluido, su densidad y la utilización o no de modificadores
- Bajo costo del solvente.

El interés del CO₂ como fluido supercrítico se basa en su temperatura crítica de 31°C, esto hace que se pueda trabajar con los materiales biológicos sin alterar las propiedades, que generalmente no se alteran hasta los 35°C. El CO₂ puede disolver triglicéridos en concentraciones hasta de 1% en masa. Pero la ventaja principal surge de una reducción de la temperatura de extracción y una reducción más grande de presión se traduce en la precipitación del soluto extraído, por tanto, no arrastrará residuos de la materia prima ni del solvente en caso sea utilizado (Cuellar, 2017).

El CO₂ es ambientalmente benigno y no tóxico que no deja residuos en el medio tratado, ha sido el fluido supercrítico de elección para este tipo de aplicaciones. Además, CO₂ tiene una baja temperatura crítica fácilmente

accesible de 31°C, lo que permite la operación a temperaturas más bien bajas. Esto evita la degradación de compuestos termolábiles, que es especialmente importante en la industria alimentaria y también limita los costes de calefacción (Moreno, 2017).

Villada y Carrera (2007), mencionan que el CO₂ supercrítico es usado en innumerables industrias que incluyen diferentes campos como: farmacéuticas, alimentos, agricultura, pesticidas, acuicultura, procesos microbianos y petroquímica, debido a que posee ventajas importantes:

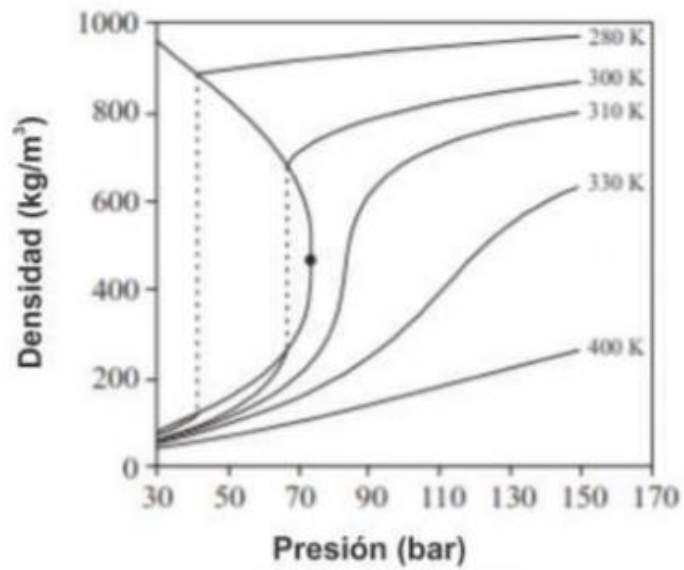
- Posee un coeficiente de viscosidad más baja que lo líquidos y alto coeficiente de difusión
- No cuentan con tensión superficial, aumentando la operación de extracción debido a la rápida penetración de estos al interior de los poros de la matriz heterogénea.
- La selectividad puede ser manipulada durante la extracción debido a la variación de las diferentes condiciones de operación temperatura y presión afectando la solubilidad de varios componentes en el fluido supercrítico.
- La extracción con fluidos supercríticos no deja residuos químicos.
- La extracción con CO₂ supercrítico permite su fácil recuperación en procesos de reciclaje.
- La solubilidad aumenta proporcionalmente con la densidad (es decir aumento de la presión). La rápida expansión de las soluciones

supercríticas conduce a la precipitación de un sólido finamente dividido; ver Figura 4.

- Las condiciones de presión y temperatura del fluido supercrítico CO₂ son óptimas para la extracción de compuestos orgánicos, se muestra en la Figura 5.

Figura 4

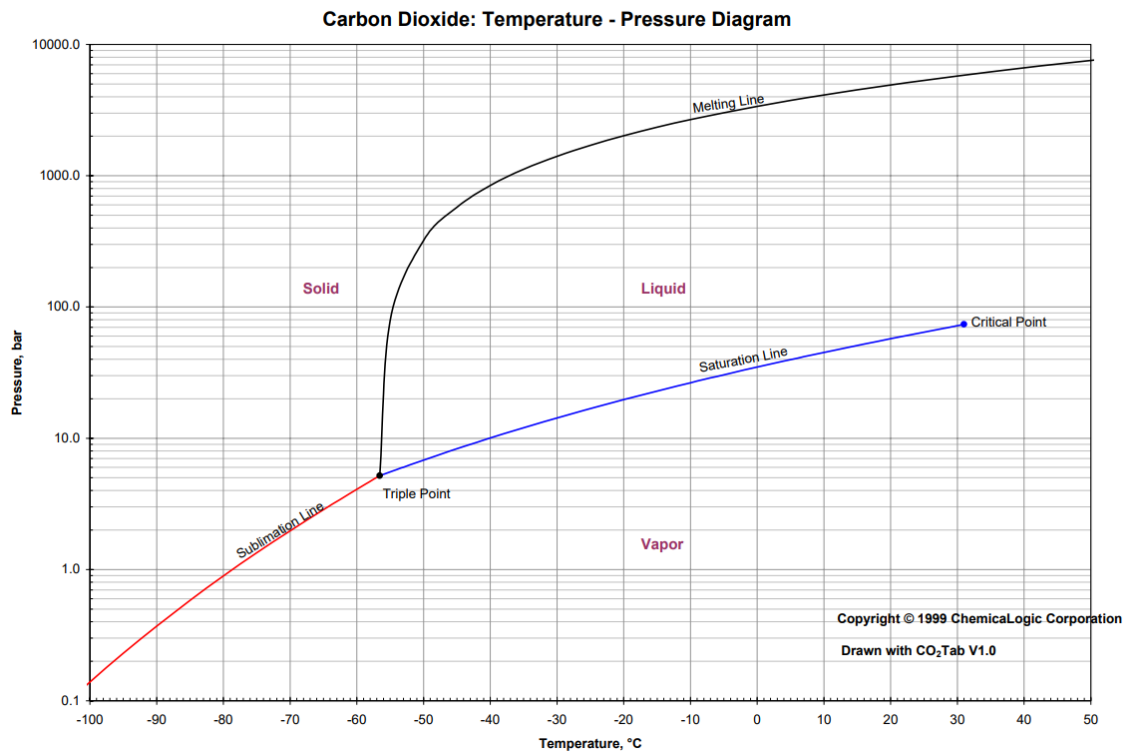
Diagrama de fase densidad y presión del CO₂



Fuente: Cuellar (2017)

Figura 5

Diagrama de fases de presión y temperatura del CO₂



Fuente: http://www.chemicallogic.com/Documents/co2_phase_diagram.pdf

Por estos motivos, el CO₂ es el disolvente con el que se va a trabajar. Además de ser inerte, no tóxico, barato, puede adquirir con un alto grado de pureza.

2.2.4 Granos de café gastados (SCG)

Según algunos investigadores, el café llega a América con los inmigrantes europeos en el siglo XVIII y ellos introdujeron su cultivo en Centro América y Sudamérica. Desde 1850 los inmigrantes europeos introdujeron el café al valle de Chanchamayo, junto a la coca, tabaco, cacao y caña de azúcar. En 1930, capitales ingleses consolidan como zona cafetera el valle de

Chanchamayo para su consumo local y para la exportación a Alemania, Chile y Gran Bretaña. Desde fines del siglo XX, la producción de café peruano ha mejorado en cantidad y calidad, ganando una buena fama internacional.

Botánicamente, el café pertenece al género *Coffea* de la familia *Rubiaceae*, con él especies comercialmente relevantes son *C. Arábica* y *C. Canephora*, que representan, respectivamente, aproximadamente dos tercios y un tercio de la producción mundial de café. La especie Arábica se cultiva a gran altura (> 1000m sobre el nivel del mar) en los trópicos y subtropicales, donde el clima es más frío, mientras que las especies Robusta se cultiva a altitudes relativamente bajas (<800m sobre el nivel del mar). A pesar de que los cafés Robusta toleran temperaturas más altas, lluvias más intensas y presentan rendimientos más altos que los Arábicas, estos últimos son considerados, por los exigentes catadores de café y bebedores, para producir bebidas de cualidades superiores a las anteriores (Anzueto et al., 2005) y, por lo tanto, se comercializa a precios más altos en los mercados internacionales.

En la cadena de procesamiento del café, incluido el procesamiento primario y secundario, se generan una serie de subproductos o desechos, siendo las principales cáscaras, cáscaras de pergamino, paja y los granos de café gastados, más conocidos como "*Spent Coffee Grounds*" (SCG).

La preparación de bebidas de café y en la fabricación de café instantáneo, se genera corrientes de desechos masivos en forma de granos de café gastados (SCG), el cual es el término utilizado para el residuo que queda

después de la molienda y la posterior extracción de los compuestos deseables; siendo este el subproducto de café más abundante.

Composición química

Los granos de café gastados (SCG), son compuestos naturales, cuya composición depende del tipo de granos de café, las condiciones de tostado y el proceso de extracción; sin embargo, la mayoría de los SCG tienen una composición similar. El componente más grande de SCG son los polisacáridos, más específicamente celulosa y hemicelulosa, que se combinan para formar alrededor del 50% de la masa seca del SCG. La manosa, la galactosa y la arabinosa son los componentes principales de los azúcares de hemicelulosa, mientras que la glucosa es el componente principal de la celulosa (McNutt, 2018).

Tabla 5

Composición química de granos de café gastados

Componente	Composición (g/100g masa seca)
Celulosa	12.40 ± 0.79
Hemicelulosa	39.10 ± 1.94
Arabinosa	3.60 ± 0.52
Manosa	19.07 ± 0.85
Galactosa	16.43 ± 1.66
Lignina	23.90 ± 1.70
Insoluble	17.59 ± 1.56
Soluble	6.31 ± 0.37
Cenizas	1.30 ± 0.10
Proteína	17.44 ± 0.10
Nitrógeno	2.79 ± 0.10

Fuente: McNutt (2018)

Fracción de aceite

Las cantidades de lípidos extraíbles de los SCG dependen del método de elaboración y extracción. Este aceite derivado de los SCG es sin olor y tiene un color marrón (Kavalcik, Obruca & Marova, 2018).

El método más común de extracción es el Soxhlet; sin embargo, también hay una variedad de otros métodos utilizados, incluida la extracción de fluido supercrítico, la extracción asistida por microondas y la extracción asistida por ultrasonido.

Tabla 6

Estudios en extracción de aceite de granos de café gastados

Método	Condiciones	Rendimiento	Composición	
	3h, 15-30MPa, 313-333K	15%	Ácido (~35%) Ácido (~35%)	Linoleico Palmítico
Supercrítica con CO ₂	190bar, 55°C, 5%w/w etanol	11.97%	-	
	190 bar, 40°C	15%	-	
	33.18°C, 28.40MPa, 220.90 min	11.41%	Ácido Linoleico (48%) Ácido Palmítico (25%)	
	0.5kg SCG, 55°C, 250 bar, 15 kg CO ₂ /h, 1h	12.1%	Ácido (44.7%) Ácido (33.1%)	Linoleico Palmítico
Extracción asistida por microondas	600W, 10 min, 1:1 n-hexano a metanol	15.11%	-	
Extracción asistida por ultrasonido	45min, 40kHz, 60°C, 160 W, 2.7L, 4mL solvente/g	12%	-	
Extracción Soxhlet	Hexano, 30 min	15.28%	-	

Fuente: McNutt (2018)

Fibra cruda y otros componentes

La fibra cruda es la fracción lignocelulósica compuesta de celulosa, hemicelulosa y lignina, que se entrelazan mutuamente.

En comparación con otros materiales lignocelulósicos, los SCG contienen una cantidad relativamente pequeña de celulosa (aproximadamente 10% en peso) y un alto contenido de hemicelulosa (30-40% en peso).

Las hemicelulosas, debido a su estructura amorfa y naturaleza hidrófila, tienen una alta sensibilidad mecánica contra el agua y son fácilmente hidrolizables en comparación con la lignina y la celulosa. La fracción de hemicelulosa de los SCG puede extraerse mediante extracción con agua sobrecalentada y utilizarse para diversas aplicaciones de alta gama, especialmente en productos farmacéuticos como las sustancias prebióticas (Kavalcik et al., 2018).

La lignina es un polímero adicional junto con celulosa y hemicelulosa; actúa como estabilizador contra tensiones mecánicas y otras tensiones biológicas internas/externas. La porción de lignina que se encuentra en los granos de café verde es de aproximadamente 3% en peso. Sin embargo, algunos trabajos informaron que la concentración de lignina total en los SCG fue de alrededor de 19.8 a 29.8%. Las diferencias pueden deberse al origen diferente de los granos de café utilizados, así como al tratamiento aplicado (Kavalcik et al., 2018).

Los componentes fenólicos se pueden extraer de los SCG mediante el uso de solventes polares o polares intermedios, como etanol o metanol

mezclado con agua desionizada. Los compuestos fenólicos identificados en los SCG se muestran en la Tabla 7, los cuales son agentes bioactivos con un captador de radicales apreciable, capacidad de absorción de radicales de oxígeno, propiedades antitumorales, antiinflamatorias y antialérgicas. La cantidad de fenólicos extraídos depende del método de extracción aplicado en las condiciones de extracción (tipo de solvente, relación SCGs sólido/solvente), tiempo de exposición y temperatura).

Tabla 7

Compuestos fenólicos identificados en granos de café gastados

Componente	µg GAE/g	mg/g
Ácido clorogénico	0.3-41.3	1.8-5.6
Catequina	0.3	0.3-0.6
Ácido cafeico	0.1	0.03-0.07
Ácido elágico	nd	0.06-0.1
Ácido ferúlico	nd	0.004-0.01
Ácido gálico	14.3	1.3-2.5
Ácido p-hidroxibenzoico	3.1	-
Ácido p-cumárico	-	0.01
ácido protocatechuico	0.6-33.1	Nd
Rutina	-	0.06
Quercetina	-	0.96-1.0
Ácido tánico	0.7	-

Nota: GAE; Galic Acid Equivalent (equivalente de ácido gálico) Fuente: Kovalcik et al. (2018)

Entre los componentes esenciales adicionales presentes en los SCG se encuentran la cafeína (0.4 mg/g), las proteínas (10% de los SCG en peso seco), aminoácidos, minerales y melanoidinas. La cafeína es un alcaloide de metilxantina, que estimula el sistema nervioso central. Los aminoácidos y las proteínas están involucrados en la formación del sabor y el color del café preparado. Las melanoidinas son pigmentos de color marrón de alto peso molecular formados a través de la reacción de Maillard durante el proceso de tostado.

Incluso los extractos de agua SCG se han sugerido como nuevos ingredientes alimentarios funcionales bioactivos potenciales debido a sus actividades anti mutagénicas y antimicrobianas. (Kavalcik et al., 2018).

2.3 Conceptual

Una Planta piloto es una planta de proceso a escala reducida, es decir consiste en ensamblar partes específicas que deben operar de forma armónica con el fin de reproducir a escala, procesos productivos que nos permita analizar fenómenos, las interacciones tales como la termodinámica, flujo de fluidos, transferencias tanto de masa como de energía, entre otros; que permita establecer los parámetros de operación y determinar si su aplicación a nivel industrial es viable.

La planta piloto resulta fundamental para el desarrollo de nuevas tecnologías, ya que de esta se generan criterios técnicos y nos permite experimentar el comportamiento eficaz a escalar de: Condiciones de operación, operaciones

unitarias, problemas de trabajo, entre otros; que nos permitirá prever errores antes de su operación a la planta industrial.

Los procesos continuos se diseñan para operar las 24 horas del día, durante todo el año, donde se puede prever alguna parada para el mantenimiento de este y los procesos discontinuos se diseñan para operar por lotes, y es el que elegimos en nuestra investigación, ya que el producto a obtener es de un valor elevado y se producen en pequeñas cantidades, siendo utilizado principalmente en productos alimentarios y productos para el cuidado personal. Dentro las principales ventajas encontramos que permite la producción de tipos de productos diferentes en el mismo equipo, caudal muy flexible ya que no hay episodios inestables cuando se opera a baja producción, facilidad de llevar a cabo el escalado de un proceso químico a partir de datos de laboratorio y necesitan menor capital para volúmenes de producción pequeños.

El proceso de extracción con un fluido supercrítico se basa en que se efectúa por encima del punto crítico del solvente (fluido supercrítico), en nuestro caso el CO₂, en el cual, modificando su densidad con cambios de presión o temperatura, nos permite separar de manera selectiva. Dentro de las principales ventajas es que se usan temperaturas relativamente bajas, el cual evita el deterioro de la materia prima, uso de solventes no nocivos como el CO₂ haciéndolo un proceso sustentable y se mejoran las propiedades de transportes, lo que facilita el proceso de extracción.

El proceso estudiado lo podemos dividir principalmente en cuatro etapas:

Presurización: Alcanzar la presión necesaria del CO₂ (solvente), para la extracción, por medio de una bomba.

Ajuste de Temperatura: Remoción y adición de energía térmica, para que el fluido comprimido alcance la temperatura que se requiere, por medio de un intercambiador de calor.

Extracción: En un recipiente extractor a alta presión, el cual contendrá nuestra materia prima, el SCG, en esta etapa el fluido supercrítico entrará en contacto con la SCG y arrastrará el soluto de interés, en nuestro caso los compuestos fenólicos.

Separación: En esta etapa la sustancia extraída, los compuestos fenólicos, se separa del solvente, CO₂, mediante los cambios de presión y temperatura. Los equipos para la extracción con fluidos supercríticos vienen a ser los siguientes:

Tanque de almacenamiento: Se almacena el solvente en condiciones ambientales.

Intercambiador de calor: Este equipo es usado para evitar la cavitación en la bomba.

Calentadores eléctricos: Para calentar al solvente a su temperatura supercrítica y también usado en la separación del solvente del soluto.

Bomba: Para comprimir el solvente por encima de la presión crítica.

Recipiente de extracción: El solvente en estado supercrítico pasa a través de la materia prima arrastrando el soluto de nuestro interés.

Regulador de presión: Para elevar la presión en la separación del solvente del soluto.

El interés en los granos de café gastados se refleja en que estos son generalmente son eliminados, sin embargo pueden ser aprovechados debido a su alto contenido de compuestos fenólicos, que pueden ser empleados como materia prima para la elaboración de diversos productos con alto valor económico y/o comercial dentro del campo de las diferentes industrias, entre ellas la industria cosmética, en donde se han vuelto de interés los efectos beneficiosos de los compuestos fenólicos para la elaboración de productos para tratamiento y prevención del envejecimiento de la piel..

2.4 Definición de términos básicos

Componentes fenólicos: Compuestos orgánicos cuyas estructuras moleculares contienen al menos un grupo fenol, un anillo aromático unido al menos a un grupo funcional hidroxilo. Lo más destacable de los compuestos fenólicos son sus propiedades antioxidantes.

Diseño Conceptual: Identifica los requerimientos de un sistema para la necesidad de cubrir para el diseño final.

Fluido supercrítico: Es aquel fluido que se encuentra sometido a condiciones de presión y temperatura por encima del punto crítico, siendo éste el punto designado por una temperatura crítica (T_c) y una presión crítica (P_c), por encima del cual no puede haber una licuefacción al elevar la presión o vaporización al aumentar la temperatura.

Líquido comprimido o líquido subenfriado: Sustancia en fase líquida que no está a punto de evaporarse.

Líquido saturado: Sustancia en estado líquido coexistente en equilibrio con la fase vapor. Líquido que está a punto de evaporarse.

Planta Piloto: Es una planta de proceso a pequeña escala diseñada para obtener información que se puede utilizar en procesos a escala industrial.

Polifenoles: Son micronutrientes que abundan en los alimentos vegetales naturales como especies secas, frutas, vegetales, café, entre otros; con propiedades antioxidantes.

Presión de saturación: Presión a una determinada temperatura en la cual una sustancia cambia de fase.

SCG: “*Spent Coffee Grounds*” o también granos de café gastados. Son subproductos naturales de la cadena de procesamiento del café, incluido el procesamiento primario y secundario. Tienen como componente principal a los polisacáridos, más específicamente celulosa y hemicelulosa.

Temperatura de saturación: Temperatura a una determinada presión en la cual una sustancia cambia de fase.

Vapor saturado: Sustancia en estado vapor coexistente en equilibrio con la fase líquida. Vapor que está a punto de condensarse.

Vapor sobrecalentado: Sustancia en fase gaseosa que no está a punto de condensarse.

III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1 Hipótesis

3.1.1 Hipótesis General

El diseño de una planta piloto para la extracción de compuestos fenólicos a partir de los granos de café gastados usando CO₂ como fluido supercrítico es posible determinando los parámetros de operación y equipo principal.

3.1.2 Hipótesis específicas

- a) La temperatura y presión como parámetros de operación permite la extracción de compuestos fenólicos a partir de los granos de café gastados usando CO₂ como fluido supercrítico.
- b) Los criterios de selección del equipo principal para la extracción de compuestos fenólicos a partir de los granos de café gastados usando CO₂ como fluido supercrítico son la presión, temperatura, cantidad de materia prima, rendimiento y balance de materia.

3.2 Definición conceptual de variables

3.2.1 Variables independientes

X₁ = Parámetros de operación para la extracción de compuestos fenólicos a partir de los granos de café gastados usando CO₂ como fluido supercrítico

X₂ = Selección del equipo principal de la planta piloto para la extracción de compuestos fenólicos a partir de los granos de café gastados usando CO₂ como fluido supercrítico.

3.2.2 Variable dependiente

Y = Diseño de la planta piloto para la extracción de compuestos fenólicos a partir de los granos de café gastados usando CO₂ como fluido supercrítico.

3.2.3 Operacionalización de las variables.

A continuación, se muestra la operacionalización de variables identificadas, así como sus correspondientes indicadores

Tabla 8*Operacionalización de variables*

Variables independientes	Dimensión	Indicador	Método	Técnica
X ₁ = Parámetros de operación para la extracción de compuestos fenólicos a partir de los granos de café gastados usando CO ₂ como fluido supercrítico	Temperatura (T) Presión (P) Flujo del solvente (F)	°C bar kg/h	Cuantitativo	Cálculos de las condiciones termodinámicas del proceso de extracción
X ₂ = Selección del equipo principal de la planta piloto para la extracción de compuestos fenólicos a partir de los granos de café gastados usando CO ₂ como fluido supercrítico	Altura Diámetro Volumen Espesor	m L m	Cuantitativo	Selección y dimensionamiento de equipo principal
Variable dependiente	Dimensión	Indicador	Método	Técnica
Y = Diseño de la planta piloto para la extracción de compuestos fenólicos a partir de los granos de café gastados usando CO ₂ como fluido supercrítico	Parámetros de operación Rendimiento	°C bar kg/h m L %	Cuantitativo	Cálculo de balance de materia

IV. DISEÑO METODOLÓGICO

Para lograr los objetivos propuestos en este trabajo de investigación, relacionado con el diseño de una planta piloto de extracción de compuestos fenólicos a partir de residuos de café usando CO₂ como fluido supercrítico, se utilizará la siguiente metodología.

4.1 Tipo y diseño de investigación

Este trabajo es una investigación predictiva y aplicada, ya que se busca el diseño de una planta piloto para la extracción de compuestos fenólicos a partir de residuos de café gastados usando CO₂ como fluido supercrítico, en la cual se utilizará técnicas de las ciencias aplicadas y tecnológicas para su elaboración. Además, es del tipo cuantitativo ya que estas variables son medibles.

4.2 Método de investigación

4.2.1 Primera etapa de la investigación:

Esta etapa consistirá en la revisión de la información científica relevante, con la finalidad de encontrar antecedentes de estudio, las cuales nos ayudará a cuantificar y caracterizar los residuos de café gastados, se determinará el tipo de café, el rendimiento de extracción.

4.2.2 Segunda etapa de la investigación.

Esta etapa consistirá en el cálculo de los parámetros óptimos, teniendo en cuenta las propiedades físicas, químicas y termodinámicas de los compuestos químicos que se utilizan en este proceso, las cuales se

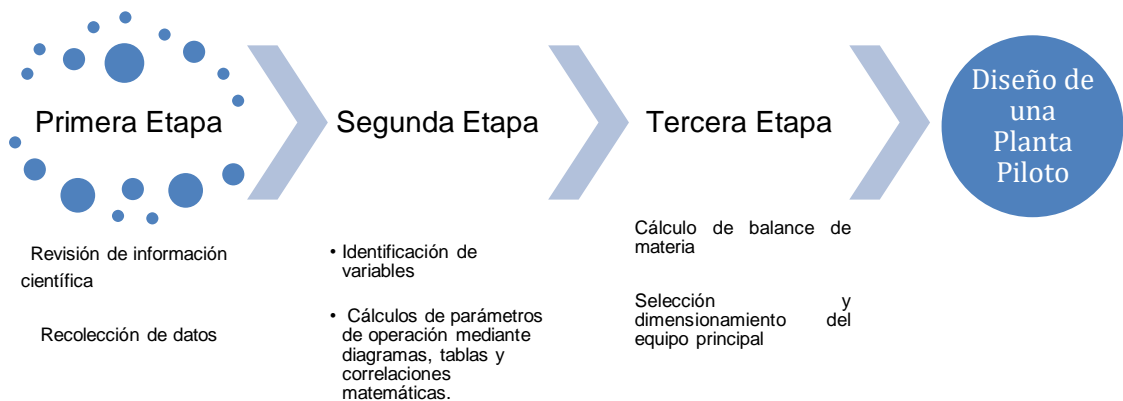
determinarán mediante tablas, diagramas y gráficas o calculadas por correlaciones para la predicción de propiedades físicas.

4.2.3 Tercera etapa de la investigación

En esta etapa se seleccionará y diseñará el equipo principal de extracción de compuestos fenólicos de granos de café gastados usando CO₂ como fluido supercrítico mediante la capacidad y dimensionamiento de este. Adicionalmente, se determinará la capacidad de extracción mediante el cálculo de balance de materia.

Figura 6

Método de investigación



4.3 Población y muestra

Nuestra tesis solo posee un elemento en la población, la cual es el grupo de condiciones óptimas de extracción (temperatura, presión, flujo de solvente-materia prima y rendimiento) de compuestos fenólicos con CO₂ supercríticos de los cafés gastados encontrados por Andrade et al.,2012, los cuales fueron la

base para el diseño. Al contar nuestra población con un elemento, la muestra viene a ser la misma.

4.4 Lugar de estudio y periodo desarrollado

El lugar de estudio será de manera virtual.

4.5 Técnicas e instrumentos para la recolección de la información

4.5.1 Métodos o técnicas de recolección de datos

- Recopilación de información con respecto a la caracterización de los residuos de café gastados y rendimiento de extracción de compuestos fenólicos usando CO₂ como fluido supercrítico.
- Cálculos de las condiciones termodinámicas del proceso de extracción.
- Selección y dimensionamiento del equipo principal.
- Cálculo de balance de materia.

4.6 Análisis y procesamiento de datos

Se realizó el análisis y procesamiento de datos teniendo en cuenta las propiedades físicas, químicas y termodinámicas de los compuestos químicos involucrados en las etapas del proceso de extracción mediante el uso de gráficas, tablas y correlaciones matemáticas. Así mismo, la selección y dimensionamiento del equipo principal se calcularon mediante correlaciones matemáticas.

V. RESULTADOS

5.1 Resultados descriptivos

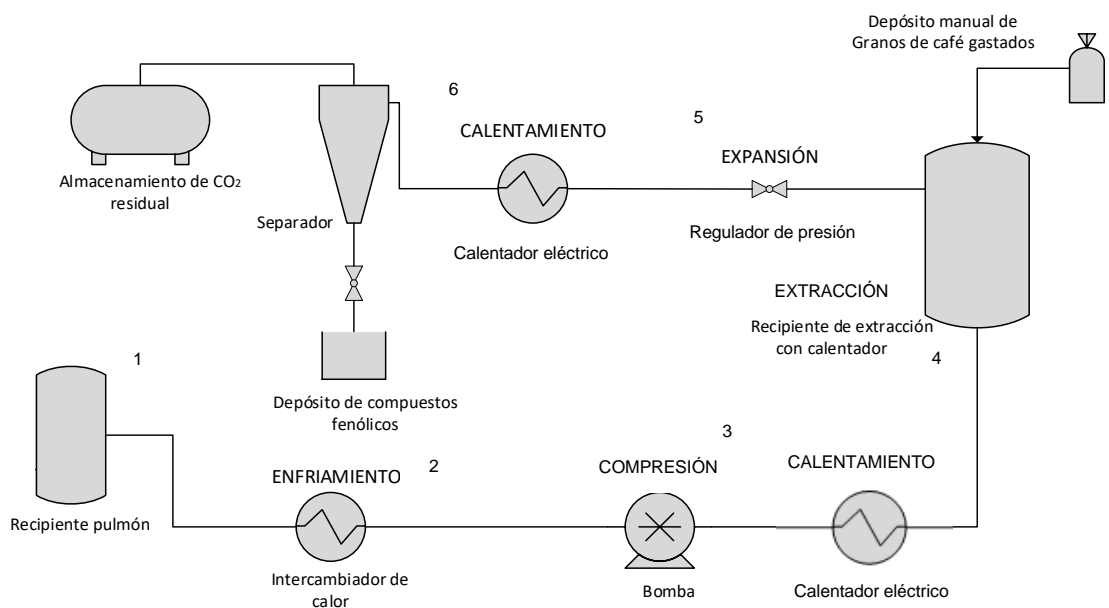
5.1.1 Condiciones termodinámicas de proceso de extracción

Para la selección de los equipos para la extracción de compuestos fenólicos de los granos de café gastados mediante CO₂ supercrítico se necesita conocer los estados termodinámicos con los que trabaja en cada etapa en base a las condiciones termodinámicas de las mejores condiciones de extracción, por lo que se ha utilizado los datos de temperatura y presión de la Tabla 1 como punto de partida del diseño de la Planta piloto.

En la Figura 7 se muestra nuestra propuesta de distribución de la planta de extracción de los compuestos fenólicos con operación batch:

Figura 7

Esquema de componentes de la planta piloto

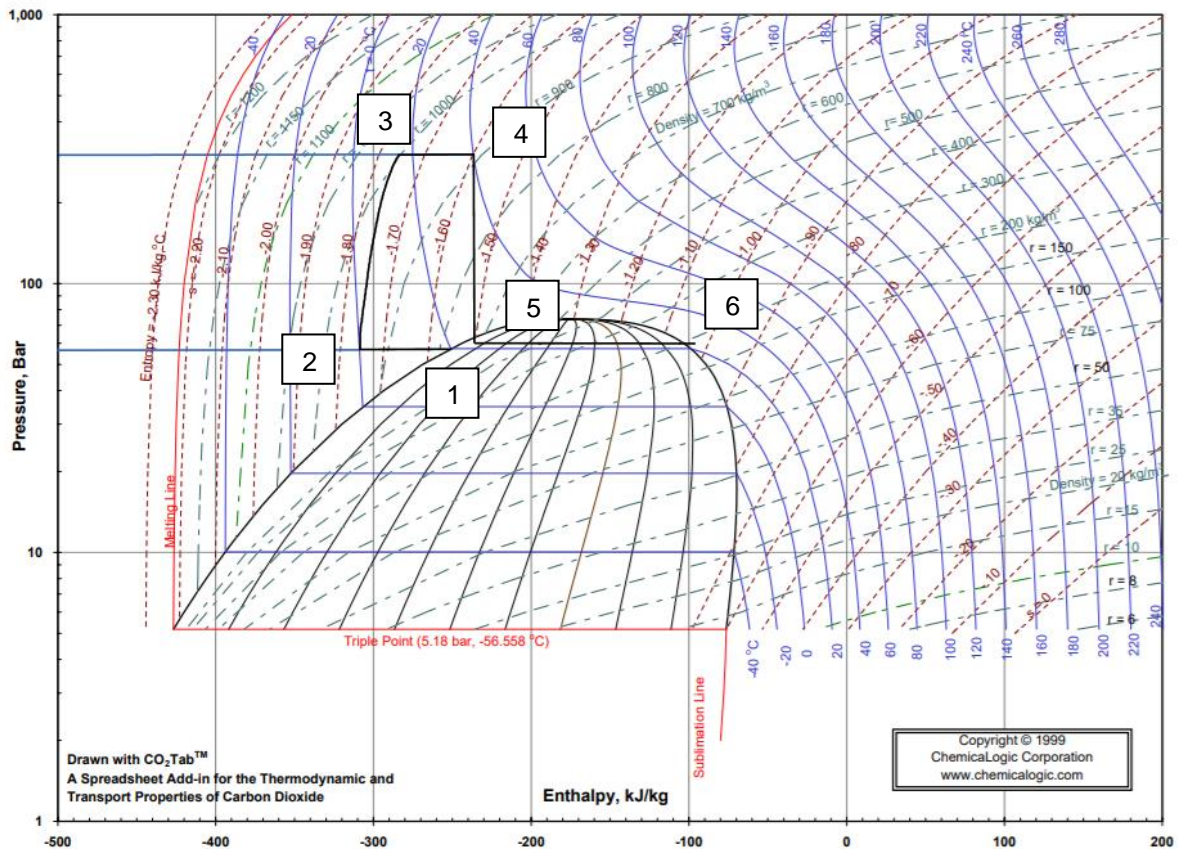


Fuente: Elaboración en base de Símbolos de Diagrama de Procesos

Los datos termodinámicos del proceso de extracción supercrítica se obtuvieron utilizando el diagrama de Presión - Entalpía del CO₂ que se muestra en la Figura 8.

Figura 8

Diagrama de Presión – Entalpía del CO₂



Fuente: Elaboración en base a ww.chemicallogic.com/Documents/co2_mollier_chart_met.pdf

Los datos termodinámicos obtenidos del Diagrama de Presión – Entalpía del CO₂ para el proceso de extracción supercrítica de compuestos fenólicos del SCG se resume en la Tabla 9 los estados termodinámicos:

Tabla 9*Estados termodinámicos del CO₂*

Estados	Temperatura (T, °C)	Presión (P, bar)	Entalpía (h, kJ/kg)	Densidad (kg/m ³)	Fase
1	20	57.37	-249	773.68	Líquido saturado
2	0	57.37	-305	946.24	Líquido subenfriado
3	17	300	-294	995.48	Líquido subenfriado
4	40	300	-238	909.89	Fluido supercrítico
5	21	60	-238	715.02	Mezcla líquido vapor
6	25	60	-95	190.61	Vapor sobrecalentado

Fuente: Elaborado en base a las etapas determinadas en el diagrama de *Mollier*

El CO₂ requerido se comercializa en cilindros en estado líquido, en condiciones de temperatura ambiente; es decir a 20°C y 57,37 bar. En ciertas condiciones, es posible extraer el CO₂ líquido para almacenarlo; los cilindros deben ser con sonda, los cuales son utilizados para mantener la forma líquida y el dispositivo de retirada (tanque pulmón) debe ser adecuado a dicha presión y diseñado para el CO₂ líquido.

Estado 1: En esta etapa el CO₂ se encuentra almacenado en el tanque pulmón a temperatura ambiente de 20°C y acondicionado una presión de 57.37 bar como líquido saturado.

Proceso 1-2: Mediante un intercambiador de calor se realiza un enfriamiento isobárico a la presión de almacenamiento del CO₂ en el tanque pulmón (57.37 bar) para asegurar que todo el solvente se encuentre como estado líquido subenfriado y así evitar la cavitación cuando ingrese a la bomba.

Estado 2: En esta segunda etapa el CO₂ se encuentra a una presión de 57.37 bar y 0°C como líquido subenfriado.

Proceso 2-3: En este proceso se aumenta la presión al CO₂, mediante una bomba se realiza una compresión isoentrópica hacia la presión supercrítica óptima para su ingreso al recipiente de extracción.

Estado 3: El CO₂ se encuentra a una presión de 300 bar y 17°C como líquido subenfriado.

Proceso 3-4: Se realiza el calentamiento para alcanzar la temperatura supercrítica óptima de forma isobárica a la presión supercrítica para su ingreso al recipiente de extracción.

Estado 4: El CO₂ se encuentra a una presión de 300 bar y 40°C como fluido supercrítico en el recipiente de extracción. En este estado se realiza la extracción de los compuestos fenólicos a partir de los granos de café gastados.

Proceso 4-5: Este proceso consta en la despresurización o expansión isoentálpica del CO₂ con la finalidad de que abandone el estado supercrítico para separarlo de los compuestos fenólicos.

Estado 5: El CO₂ se encuentra como mezcla líquido vapor a 60 bar y 21°C.

Proceso 5-6: Este proceso se basa en calentar el CO₂ isobáricamente hasta vapor sobrecalentado, es decir, estado gaseoso, ya que en este estado es menos denso, se reduce su densidad y tiene menor capacidad de disolvente.

Estado 6: En este estado el CO₂ se encuentra a 60 bar y 25°C como vapor sobrecalentado lo cual hará posible la precipitación de los componentes fenólicos.

Cálculo de la cantidad de SCG

De acuerdo con la tabla 1, se obtienen las condiciones de extracción óptimas para la extracción con fluido supercrítico, del autor Ortiz (2020), se sabe que la densidad aproximada del SCG es 380 kg/m³, además de la tabla 9 sabemos que el CO₂ dentro del recipiente tendrá una densidad de 909.89 kg/m³. Con estos datos se tendrá el consumo medio de nuestra materia prima por cada proceso de extracción.

$$V_R = V_{CO_2} + V_{SCG} \quad (1)$$

Según la relación de la tabla 1, se considera un consumo de 82.8kg de CO₂ por cada kg de SCG

$$V_R = \frac{m_{CO_2}}{\rho_{CO_2}} + \frac{m_{SCG}}{\rho_{SCG}}$$

$$V_R = \frac{82.8m_{SCG}}{\rho_{CO_2}} + \frac{m_{SCG}}{\rho_{SCG}}$$

Reemplazando se tiene

$$0.005 = \frac{82.8m_{SCG}}{909.89} + \frac{m_{SCG}}{380}$$

$$m_{SCG} = 0.053 \text{ kg}$$

$$m_{CO_2} = 4.39 \text{ kg}$$

Cálculo de la cantidad de compuestos fenólicos que se obtendrá del proceso de extracción

De acuerdo con la tabla 1, se sabe que el proceso tiene un rendimiento de extracción de 10.5%, por lo que se hará el cálculo de la cantidad de compuestos fenólicos a obtener por cada ciclo de operación.

$$m_{CF} = n_T * m_{SCG} \quad (2)$$

$$m_{CF} = 0.105 * 53g$$

$$m_{CF} = 5.565 g$$

La carga de la materia prima al recipiente de extracción se dará de forma manual al inicio de cada ciclo de operación.

5.1.2 Selección del equipo principal

Se realizaron los cálculos respectivos para encontrar las condiciones básicas que debe cumplir el recipiente, equipo principal para el diseño de la planta piloto para la extracción de compuestos fenólicos a partir de los granos de café gastados, generando así las condiciones necesarias como base para su fabricación.

Selección del Recipiente de extracción

El recipiente de extracción es un equipo de forma cilíndrica, vertical y de operación en batch en el cual se llevará a cabo la extracción de los compuestos fenólicos de los granos de café gastados con el CO₂ en estado supercrítico, es por ello por lo que al trabajar en alta presiones se debe

diseñar según la Norma ASME sección VIII, la cual cuenta con los procedimientos para tener en cuenta según estas tres divisiones:

- *La División 1:* Reglas básicas, recipientes sometidos a una presión interna o externa igual o mayor a 15psi (1bar) y menor o igual a 3 000psi (207bar).

- *La División 2:* Reglas alternativas, es para recipientes sometidos a una presión interna o externa mayor a 3 000psi (207bar) y menor o igual a 10 000psi (689 bar).

- *La División 3:* Brinda los reglamentos para recipientes sometidos a una presión interna o externa mayor a 10 000psi.

La posición de extractor es vertical y las condiciones de operación se toman del estado 4 según el diagrama de *Mollier* para el ciclo termodinámico de operación del CO₂, siendo los parámetros óptimos de extracción de 40°C y 300bar (4351.13psi).

Para la selección se emplearon las normas de construcción del código ASME sección VIII división 2 versión 2010 debido a que la presión de operación del recipiente de extracción es de 300bar.

Especificaciones técnicas:

Según Sovova & Petrova (2011), en escala de laboratorio el volumen típico de un recipiente de extracción es de 0.1 a 2dm³ y en escala Piloto es de 2 a 5dm³. Para nuestro diseño consideraremos el volumen del recipiente de extracción de 5dm³, es decir, 5L.

Con respecto al material, los autores Peters et al. (2003) recomiendan el uso del acero inoxidable tipo AISI 316, debido a que este acero inoxidable austenítico es el más resistente a la corrosión debido a que contiene de Cromo, Níquel y Molibdeno, este último elemento genera un mayor aumento en la resistencia a la corrosión y altas temperaturas, retrasando la formación de $Cr_{23}C_6$, y así evitar la pérdida de área resistiva por una disminución del espesor debido a las presiones altas. Como también, este tipo de acero presenta buena ductilidad y tenacidad.

El acero inoxidable AISI 316 resiste la corrosión a temperaturas máximas de $900^{\circ}C$ y la resistencia a la tracción en estado recocido es de aproximadamente 585MPa, pero el endurecimiento por deformación puede aumentar esto a 2000MPa (Peters et al.,2003).

Cálculo de altura y diámetro:

En base a la capacidad interna de 5L del recipiente de extracción, se procederá a determinar las medidas internas:

Dentro de los parámetros ASME VIII división 2, nos dice que el diámetro interno mínimo debe ser de 6pulg, es decir, 152 mm, por lo que consideraremos lo siguiente:

$$D_{in} = 155mm = 0.155m$$

$$V = A_{in} * H_{in} = \frac{\pi * D_{in}^2 * H_{in}}{4} \quad (3)$$

Donde:

D_{in} = diámetro interior del extractor, m

H_{in} = altura interna extractor, m

V = volumen del extractor, m³

π = número pi

Reemplazando se obtiene:

$$H_{in} = 0.265m$$

Con respecto a los esfuerzos:

A continuación, en la Figura 9 se muestran las propiedades mecánicas del AISI 316 según ASTM A240.

Figura 9

Propiedades mecánicas para el AISI 316

TABLE 2 Continued

UNS Designation	Type ^A	Tensile Strength, min		Yield Strength, ^B min		Elongation in 2 in. or 50 mm, min, %	Hardness, max ^C		Cold Bend ^D
		ksi	MPa	ksi	MPa		Brinell, HBW	Rockwell B	
Sheet and Strip		90	620	50	345	30	241	100	not required
Plate		85	585	40	275	30	241	100	not required
S30453	304LN	75	515	30	205	40	217	95	not required
S30500	305	70	485	25	170	40	183	88	not required
S30530	...	75	515	30	205	40	201	92	not required
S30600	...	78	540	35	240	40	...	...	...
S30601	...	78	540	37	255	30	...	...	not required
S30615	...	90	620	40	275	35	217	95	not required
S30815	...	87	600	45	310	40	217	95	...
S30908	309S	75	515	30	205	40	217	95	not required
S30909	309H ^F	75	515	30	205	40	217	95	not required
S30940	309Cb ^F	75	515	30	205	40	217	95	not required
S30941	309HCb ^F	75	515	30	205	40	217	95	not required
S31008	310S	75	515	30	205	40	217	95	not required
S31009	310H ^F	75	515	30	205	40	217	95	not required
S31040	310Cb ^F	75	515	30	205	40	217	95	not required
S31041	310HCb ^F	75	515	30	205	40	217	95	not required
S31050	310 MoLN ^F								
	t ≤ 0.25 in.	84	580	39	270	25	217	95	not required
	t > 0.25 in.	78	540	37	255	25	217	95	not required
S31060	...	87	600	41	280	40	217	95	not required
S31254									
Sheet and Strip		100	690	45	310	35	223	96	not required
Plate		95	655	45	310	35	223	96	not required
S31256	...	109	750	61	420	35	...	...	not required
S31277	...	112	770	59	390	40	...	...	not required
S31600	316	75	515	30	205	40	217	95	not required
S31603	316L	70	485	25	170	40	217	95	not required
S31609	316H	75	515	30	205	40	217	95	not required
S31635	316Ti ^F	75	515	30	205	40	217	95	not required
S31640	316Cb ^F	75	515	30	205	30	217	95	not required
S31651	316N	80	550	35	240	35	217	95	not required

ASTM A240/A240M - 12

Fuente: ASTM 240/A 240M

Las propiedades mecánicas para el AISI 316 de acuerdo con la Figura son:

Fuerza de tensión: $\sigma_u = 515MPa$

Resistencia a la deformación: $\sigma_F = 205MPa$

Además, el esfuerzo admisible del AISI 316 a una temperatura de 40°C para diseñar según el código ASME capítulo VIII división 2 es: $\sigma_{adm} = 138 MPa$, el cual no se debe sobrepasar en lugar alguno de la estructura.

Por temas de seguridad y propiedades del material encontrados la presión de diseño será 10% más a la presión óptima de extracción, es decir:

$$P_{diseño} = 1.1 * P_{extrac} \quad (4)$$

$$P_{diseño} = 330 \text{ bar} = 33MPa$$

Cálculo del espesor del cuerpo cilíndrico del extractor:

El espesor mínimo del recipiente de extracción se calculó de acuerdo con el código ASME capítulo VIII división 2:

$$t_{min} = \frac{D_{in}}{2} (e^{\frac{P_{diseño}}{\sigma_{adm} * E}} - 1) \quad (5)$$

Donde:

t_{min} = Espesor mínimo del cuerpo cilíndrico

D_{in} = Diámetro interno (m)

$P_{diseño}$ = presión de diseño (MPa)

σ_{adm} = Esfuerzo máximo admisible (MPa)

E = Eficiencia de junta soldada, se considera un valor de 0.85 (Quevedo, 2019)

Se determinó que el espesor mínimo debe ser:

$$t_{min} = 17mm = 0.017m$$

Por lo que seleccionamos el siguiente espesor:

$$t = 19mm = 0.019m$$

Se resume las especificaciones del recipiente de extracción:

Tabla 10

Resumen de especificaciones del Recipiente de extracción

Capacidad	D_{in} (mm)	Altura interna de la parte cilíndrica (mm)	Espesor de la parte cilíndrica (mm)	Presión máxima de trabajo (bar)	Presión de diseño (bar)	Temperatura de trabajo (°C)
5 L	155	265	19	300	330	40

Fuente: Elaborado a partir de los cálculos para la selección del recipiente de extracción

Cálculo de las cabezas en forma de elipse del recipiente de extracción

Para el cálculo de las cabezas del recipiente de extracción se considera según lo indicado en el código ASME sección división 2, el cual nos indica que la relación entre los ejes mayor y menor está en el siguiente rango:

$$1.7 \leq k \leq 2.2$$

Por lo que hemos considerado $k = 2$

$$h_{cabeza} = \frac{D_{in}}{2k} \tag{6}$$

$$h_{cabeza} = \frac{155}{4} = 38,7 \text{ mm} = 0.0387\text{m}$$

Para el cálculo del radio de la cabeza en forma de elipse

$$L_{cabeza} = D_{in}(0.44k + 0.02) \quad (7)$$

$$L_{cabeza} = 155(0.44(2) + 0.02) = 139.5\text{mm}$$

Asumimos que la presión admisible del recipiente es igual al de la cabeza elipsoide para evitar la rotura de este.

5.1.3 Selección de equipos secundarios

Tanque pulmón

El tanque pulmón es un equipo de forma cilíndrica y vertical que permitirá almacenar y mantener la alimentación de CO₂ líquido a la bomba, es decir, representa el Estado 01 del ciclo termodinámico, por lo que debe resistir una presión de 57.37bar y 20°C.

Con respecto al material, se selecciona acero inoxidable del tipo AISI 316 por sus propiedades ya mencionadas según Peters et al., 2003.

Con la finalidad de mantener la bomba alimentada, se determina que la capacidad másica del Tanque pulmón en el Estado 01 debe ser 50% adicional a la del Recipiente de extracción durante el Estado 04 del ciclo termodinámico, (Ochoa, 2017).

$$m_{tp} = 1.5 * m_{re} \quad (8)$$

Donde:

m_{tp} = Capacidad másica del Tanque pulmón

m_{re} = Capacidad másica del Recipiente de extracción

Se tiene que:

$$V_{tp} = \frac{m_{tp}}{\rho_1} = \frac{1.5*m_{re}}{\rho_1} = \frac{1.5*V_{re}*\rho_4}{\rho_1} \quad (9)$$

Donde:

V_{tp} = Volumen de Tanque pulmón en m^3

ρ_1 y ρ_4 = Densidades en el Estado 01 y 04 del ciclo termodinámico (Tabla 9)

V_{re} = Volumen de Recipiente de extracción, 5L= 0.005 m^3

Reemplazando se obtiene:

$$V_{tp} = 0.009m^3 = 9L$$

Debido a que la presión de trabajo en el Tanque pulmón es de 57.37bar se empleará el código ASME sección VIII división 1 para su selección.

Se tomó como diámetro mínimo según el código ASME sección VIII de 152mm, por lo que seleccionamos un diámetro interno D_{tp} de 153mm. Con estos datos es factible determinar las demás dimensiones aplicando la fórmula de volumen cilíndrico:

$$V_{tp} = \frac{\pi*D_{tp}^2*H_{tp}}{4} \quad (10)$$

Donde:

D_{tp} = Diámetro interno de Tanque pulmón, 153mm=0.153m

H_{tp} = Altura interna de Tanque pulmón

Reemplazando obtenemos la altura interna del cuerpo cilíndrico:

$$H_{tp} = 0.49m = 490mm$$

Para determinar el espesor mínimo de la parte cilíndrica se empleará la siguiente formula del código ASME sección VIII división 1:

$$t_{min} = \frac{D_{tp}}{2} * \frac{P_{diseño}}{\sigma_{adm} * E - 0.6P_{diseño}} \quad (11)$$

Donde:

t_{min} = espesor mínimo del cuerpo cilíndrico (m)

D_{tp} = Diámetro interno de Tanque pulmón (m)

$P_{diseño}$ = Presión de diseño (MPa)

σ_{adm} = Esfuerzo máximo admisible (MPa)

E = Eficiencia de junta soldada, se considera un valor de 0.85 (Quevedo, 2019).

Por un tema de seguridad, la presión de diseño será 10% mayor a la presión de operación en el Estado 01, esto se debe a las altas propiedades mecánicas ya mencionadas que resiste el acero AISI 316.

$$P_{diseño} = 1.1 * P_{operación} \quad (12)$$

$$P_{diseño} = 1.1 * 57.37bar = 63.11bar$$

Reemplazando:

$$t_{min} = \frac{0.153m}{2} * \frac{63.11bar}{138MPa * 0.85 - 0.6 * 63.11bar}$$

$$t_{min} = \frac{0.153m}{2} * \frac{63.11bar}{1380bar * 0.85 - 0.6 * 63.11bar}$$

Se obtiene el siguiente el espesor mínimo para el Tanque pulmón.

$$t_{min} = 0.0042m = 4.2mm$$

Por lo que se selecciona un espesor de 5mm para la parte cilíndrica del Tanque pulmón.

Para la cabeza del tanque se seleccionó de tipo elipsoidal con relación entre eje mayor y menor de 2:1. Se procede a determinar la altura de la cabeza:

$$H_{cab} = \frac{D_{tp}}{4} \tag{13}$$

Reemplazamos:

$$H_{cab} = \frac{0.153m}{4} = 0.038m = 38mm$$

Procedemos a determinar el espesor mínimo del cabezal $t_{mínc}$:

$$t_{mínc} = \frac{D_{tp}}{2} * \frac{P_{diseño}}{\sigma_{adm} * E - 0.1P_{diseño}} \tag{14}$$

$$t_{mínc} = \frac{0.153m}{2} * \frac{63.11bar}{1380bar * 0.85 - 0.1 * 63.11bar}$$

$$t_{mínc} = 0.0041m = 4.1m$$

Se selecciona un espesor de 5mm para el cabezal.

Tabla 11*Resumen de especificaciones del Tanque pulmón*

Capacidad	D_{in} (mm)	Altura interna de la parte cilíndrica (mm)	Espesor de la parte cilíndrica (mm)	Presión máxima de trabajo (bar)	Presión de diseño (bar)	Temperatura de trabajo (°C)
9L	153	490	5	57.37	63.11	20

Fuente: Elaborado a partir de los cálculos de la selección del Tanque pulmón

Selección y parámetros de operación del Intercambiador de calor para enfriamiento del CO₂ a la entrada de la bomba

Para asegurar que el CO₂ proveniente del Tanque pulmón se encuentre en estado líquido para su ingreso a la bomba, se realiza un enfriamiento isobárico de 20°C a 0°C mediante un intercambiador de calor.

Para la selección de este equipo se empleó el Anexo 5 Guía para la selección de un intercambiador de calor, teniendo como mejor opción un intercambiador de placas soldadas, ya que pueden soportar altas temperaturas y presiones de diseño extremadamente altas, por ejemplo, resisten 100bar. El tipo de flujo seleccionado es a contracorriente.

Balance térmico: Para el balance de calor se empleará la siguiente fórmula:

$$\dot{Q}_{12} = \dot{m}_{CO_2}(h_1 - h_2) \quad (15)$$

Donde:

\dot{m}_{CO_2} = flujo másico de CO₂ en kg/s

h_1 y h_2 = Entalpías de CO₂, según el ciclo termodinámico en kJ/kg (Tabla 9)

Se selecciona un caudal de CO₂ (\dot{V}_{CO_2}) de 5L/min, es decir el Recipiente de extracción se llenará en un minuto de operación.

$$\dot{V}_{CO_2} = 5 \frac{L}{min} * \frac{1m^3}{1000L} * \frac{1 min}{60s} = 8.33 * 10^{-5} \frac{m^3}{s}$$

Del Diagrama de *Mollier*, en el estado 2, donde se da el inicio de compresión con la bomba, se tiene que el CO₂ tiene una densidad (ρ_2) de 946.24kg/m³. Procedemos a calcular el flujo másico de CO₂ que debe enfriarse:

$$\dot{m}_{CO_2} = \dot{V}_{CO_2} * \rho_2 \tag{16}$$

$$\dot{m}_{CO_2} = 8.33 * 10^{-5} \frac{m^3}{s} * 946.24 \frac{kg}{m^3} = 0.078 \frac{kg}{s}$$

Una vez obtenido el flujo másico, se procede a determinar el flujo de calor que deberá ceder para reducir tu temperatura:

$$\dot{Q}_{12} = \dot{m}_{CO_2} (h_1 - h_2) \tag{17}$$

Los datos de h_1 y h_2 se detallaron en la Tabla 9. Se tiene el siguiente flujo de calor:

$$\dot{Q} = 4.37 \frac{kJ}{s}$$

El refrigerante que se empleará es el R-134a (Tetrafluoroetano), el cual es un material no corrosivo, y es compatible con el material utilizado a continuación, se determina el balance de calor para el refrigerante o fluido frío:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{R-134a} * (h_{R-134a_4} - h_{R134-a_1}) \tag{18}$$

Donde:

\dot{m}_{R-134a} = Flujo másico del refrigerante R-134a en kg/s

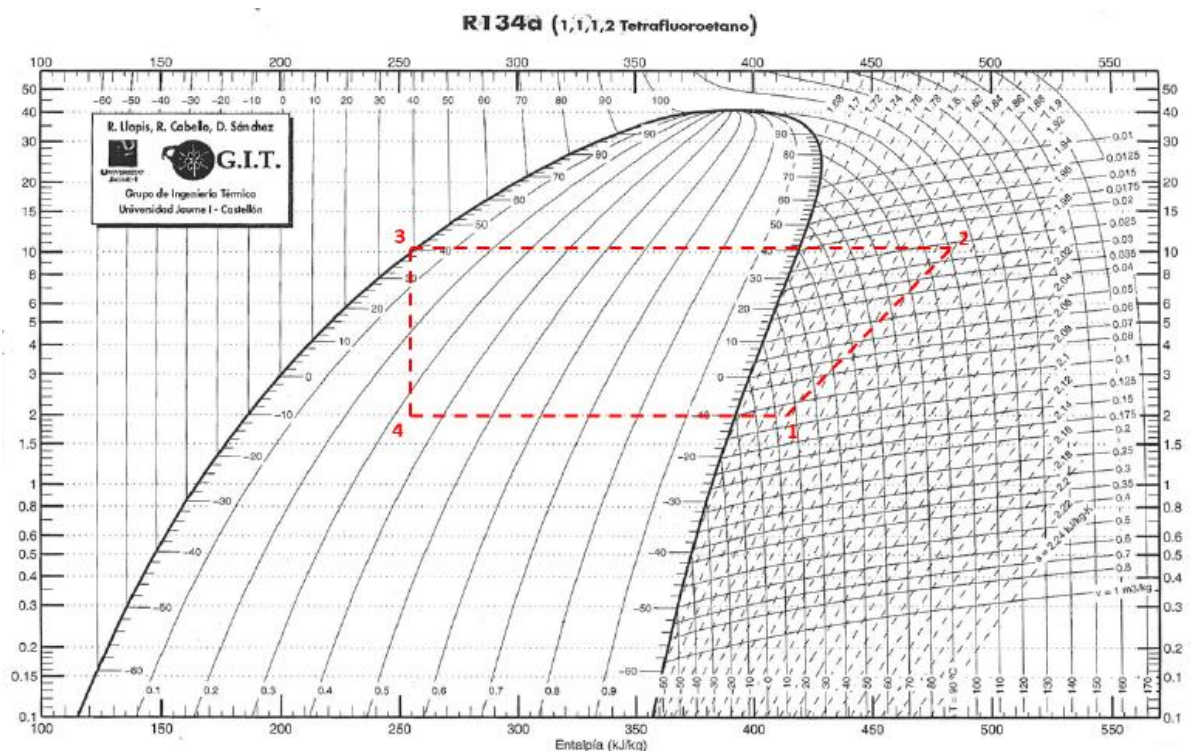
h_{R-134a_4} y h_{R134-a_1} = Entalpías de R-134a, según el ciclo termodinámico en kJ/kg (Tabla 12)

\dot{Q} = Flujo de calor en kJ/s

El ciclo termodinámico es el que sigue:

Figura 10

Ciclo termodinámico para el Refrigerante R-134a



Fuente: Ciclo de trabajo R134a para refrigeración, Ochoa, 2017

Los datos termodinámicos obtenidos del Diagrama de Presión – Entalpía del refrigerante R-134a se resume en la Tabla 12:

Tabla 12*Estados termodinámicos del refrigerante R-134a*

Estados	Temperatura (T, °C)	Presión (P, bar)	Entalpía (h, kJ/kg)	Fase
1	15	2.01	415	Vapor sobrecalentado
2	101	10.07	470	Vapor sobrecalentado
3	39.8	10.07	250	Líquido saturado
4	-10	2.01	250	0.337

Fuente: Elaborado en base de las etapas determinadas en el diagrama de *Mollier*

En un intercambiador de calor entre dos fluidos, el calor que un fluido cede, el otro lo absorbe, por ello el flujo de calor cedido por el CO₂ es el que absorberá el refrigerante R-134a, el cual permite el cálculo del flujo másico del refrigerante:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{R-134a} * (h_{R-134a4} - h_{R134-a1}) \quad (19)$$

$$\dot{m}_{R-134a} = \frac{4.368 \frac{kJ}{s}}{165 \frac{kJ}{kg}} = 0.026 \frac{kg}{s}$$

Para los siguientes cálculos se empleó la metodología de Kakac et al., 2012, la cual nos indica que el primer paso es determinar los parámetros de diseño y contar con especificaciones de las placas.

Se calcularon las temperaturas medias para encontrar las propiedades físicas de ambos fluidos:

$$T_m = \frac{T_i + T_o}{2} \quad (20)$$

Donde:

T_m = Temperatura media en °C

T_i = Temperatura del fluido a su ingreso en °C

T_o = Temperatura del fluido a su salida en °C

Temperatura media para CO₂ (fluido caliente):

$$T_{mCO_2} = \frac{T_{CO_2i} + T_{CO_2o}}{2} = \frac{20 + 0}{2}$$

$$T_{mCO_2} = 10^\circ C$$

Temperatura media para R-134a (fluido frío):

$$T_{mR-134a} = \frac{T_{R-134ai} + T_{R-134ao}}{2} = \frac{-10 + 15}{2}$$

$$T_{mR-134a} = 2.5^\circ C$$

Luego se procede a obtener las propiedades físicas, tanto del fluido caliente y fluido frío a las temperaturas medias halladas:

Tabla 13

Propiedades físicas del CO₂ y R134a en intercambiador de calor

Propiedad	Fluido caliente	Fluido frío	Unidad
	CO ₂	R-134a	
Temperatura media (T_m)	10	2.5	°C
Densidad	870	1286.45	Kg/m ³

Fuente: Elaborado a partir de los cálculos de las condiciones del Intercambiador de Calor

Seguido, determinamos la Diferencia de temperatura media logarítmica LMTD (ΔT_m):

$$LMTD = \Delta T_m = \frac{(T_{CO_2i} - T_{R-134a_o}) - (T_{CO_2_o} - T_{R-134a_i})}{\ln\left(\frac{(T_{CO_2i} - T_{R-134a_o})}{(T_{CO_2_o} - T_{R-134a_i})}\right)} \quad (21)$$

Reemplazando los valores, se obtiene:

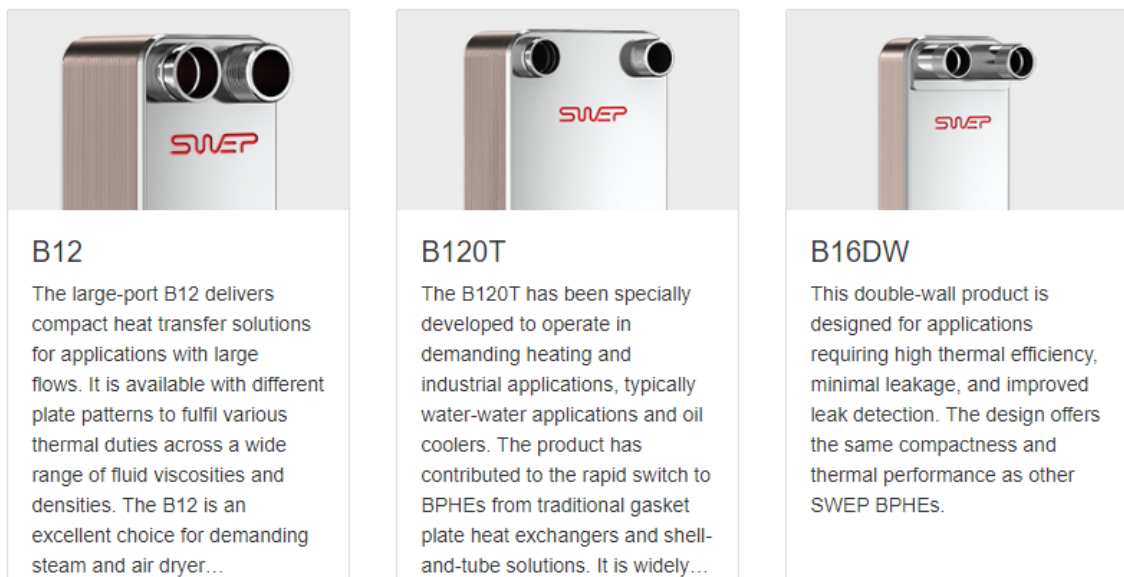
$$LMTD = \Delta T_m = 7.21^\circ C$$

Calculándose así las condiciones de operación para el intercambiador de calor de placas soldadas.

Se selecciona al fabricante SWEP que ofrece intercambiadores de placas soldadas de acero inoxidable AISI 316 para CO₂ y con presiones altas de trabajo, se muestra a continuación las opciones:

Figura 11

Modelos de intercambiadores de calor de fabricante SWEP



Fuente: www.swep.net/products/?range=co2&q=&pressure-class=h

Se selecciona el modelo B12 ya que es un intercambiador de calor compacto que toleran hasta 60bar en su gama D, Ochoa (2017). El cual también ofrece la guía de selección de acuerdo con los parámetros de operación encontrados.

Selección de la bomba para presurizar el CO₂

Se utilizará la bomba como compresor del CO₂ con la finalidad de convertir el solvente desde el estado líquido hasta descargarlo como fluido supercrítico al recipiente de extracción, la cual corresponde el paso del estado 2 a 3.

Para la selección de la bomba se hizo sobre la base de las condiciones del servicio, teniendo como mejor opción una bomba reciprocante de pistón tríplex. Por lo que se seleccionará la bomba 781KM de la marca CAT PUMPS, que es uno de los modelos más pequeños, diseñados para trabajar con CO₂ líquido y permite trabajar a presiones de entradas altas, según podemos ver en la Figura 12.

Figura 12

Bombas industriales para aplicaciones de CO₂ líquido

Model	Manifold Material	Flow*				Pressure*	
		(gpm)	(lpm)	(kg/hr)	(lbs/hr)	(psi)	(bar)
784KM.CO2	316 SS	0.34	1.3	81	189	5000	345
30.CO2	Brass	0.68	2.6	162	378	2200	152
301.CO2	316 SS	0.68	2.6	162	378	2150	148
781KM.CO2	316 SS	0.82	3.1	196	456	5000	345
351.CO2	316 SS	1.22	4.6	295	649	1500	103
5CP2921	316 SS	1.7	6.5	406	945	2500	172
310.CO2	Brass	1.75	6.7	418	973	2200	152
1560M.CO2	Brass	2.5	9.5	624	1372	4000	276
3507CM.CO2	NAB	3.5	14.4	890	1958	5000	345
3801KM.CO2	316 SS	3.5	14.4	836	1946	5000	345
1051CM.CO2	316 SS	4.0	15.2	955	2224	2200	152
1050M.CO2	Brass	4.0	15.2	955	2224	2200	152
1530RSCM.CO2	Brass	5.0	19.0	1194	2780	1800	124
6801KM.CO2	316 SS	6.5	24.7	1676	3687	7000	483
1540ECM.CO2	Brass	7.0	26.6	1670	3674	1200	83
6811KM.CO2	316 SS	7.2	27.4	1719	4003	5000	345
2831KM.CO2	316 SS	10.0	38.0	2388	5560	1200	83
3520CM.CO2	Brass	11.4	43.3	2722	6338	2000	138
6821KM.CO2	316 SS	16.0	60.8	3821	8896	3000	207
3535CM.CO2	Brass	19.4	73.7	4633	10786	1200	83
3831KM.CO2	316 SS	19.4	73.7	4633	10786	1200	83
6841KM.CO2	316 SS	30.0	114	7164	16680	2000	138
6861KM.CO2	316 SS	50.0	228	11940	27800	1200	83

* Flow and pressure may vary based on inlet/temp. conditions. Custom flows and pressures available upon request.

Fuente: Cat Pumps

Selección y parámetros de calentador para llegar a la temperatura de extracción

Para calentar el CO₂ a la temperatura de extracción, es decir, de 17°C a 40°C, se empleará un calentador a energía eléctrica (Ochoa, 2017).

El flujo de diseño de este intercambiador será también de 5L/min y a una presión de 300bar.

Procedemos a calcular el flujo de calor requerido:

$$\dot{Q}_{34} = m_{CO_2}(h_4 - h_3) \quad (22)$$

Donde:

Q_{34} = Flujo de calor en kJ/s del estado 3 al 4.

\dot{m}_{CO_2} = flujo másico de CO₂ en kg/s

h_3 y h_4 = Entalpías de CO₂, según el ciclo termodinámico en kJ/kg (Tabla 9)

Calculamos la temperatura media del CO₂ para encontrar la densidad en el diagrama de Mollier del CO₂:

$$T_{m_{CO_2_{34}}} = \frac{17 + 40}{2} = 28.5^\circ C$$

Por lo que:

$$\rho_{34} = 952.685 \text{ kg/m}^3$$

Luego, calculamos el flujo calorífico:

$$\dot{m}_{CO_2_{34}} = V_{CO_2} * \rho_{34}$$

$$\dot{Q}_{34} = \dot{m}_{CO_2} (h_4 - h_3)$$

$$\dot{Q}_{34} = V_{CO_2} * \rho_{34} (h_4 - h_3)$$

$$\dot{Q}_{34} = 8.33 * 10^{-5} \frac{m^3}{s} * 952.685 \frac{kg}{m^3} (-238 + 294) kJ/kg$$

$$\dot{Q}_{34} = \frac{4.44 kJ}{s} = 4.44 kW$$

Tabla 14*Propiedades físicas del CO₂ en el calentador eléctrico*

Propiedad	Fluido CO ₂	Unidad
Temperatura media (T_m)	28.5	°C
Densidad	952.685	Kg/m ³

Fuente: Elaborado a partir de los cálculos de las condiciones del calentador eléctrico

La selección del calentador eléctrico se realizó en base al fabricante CAS Aluminium Solutions ya que cuentan con estos equipos que trabajan a altas presiones, el cual consiste en una bobina eléctrica como fuente de calor y el CO₂ fluiría a través de un serpentín de material AISI 316L. Para nuestro diseño, el fabricante ofrece estos equipos de acuerdo a presión de trabajo del fluido a ser calentado, potencia requerida y temperatura. A continuación, se muestra las opciones:

Figura 13

Modelos de calentadores eléctricos de CAS Aluminum Solutions

MODEL	POWER RANGE	MAX OPERATING TEMPERATURES	TUBE SPECS	STANDARD NO. OF TUBES	MAX PRESSURE (standard 316 SS)	ENCLOSURE OPTIONS
CAST-X 500	300 - 1500 Watts	No Enclosure: 392°F (200°C) NEMA 1 250°F (121°C) NEMA 4 250°F (121°C) NEMA 7 392°F (200°C)	OD: .250" (1/4") (6.3 mm) Wall: .035" (.89 mm)	1	5100 psi (351 bar)	No Enclosure NEMA 1 NEMA 4 NEMA 7
CAST-X 1000	750 - 3000 Watts	No Enclosure: 662°F (350°C) NEMA 1: 608°F (320°C) with thermostat: 250°F (121°C) NEMA 4: 482°F (250°C) with thermostat: 250°F (121°C)	OD: .313" (5/16") (7.9 mm) Wall: .020" (1.7 mm)	1	2100 psi (144 bar)	No Enclosure NEMA 1 NEMA 4
CAST-X 2000	1 - 6 Kw	NEMA 1: 482°F (250°C) with standoff: 662°F (350°C) with t-stat: 250°F (121°C) NEMA 4: 350°F (175°C) with standoff: 662°F (350°C) NEMA 7: 482°F (250°C)	OD: .50" (1/2") (12.7 mm) Wall: .065" (1.7 mm)	1	5100 psi (351 bar)	NEMA 1 NEMA 4 NEMA 7 Standard or Standoff Design
CAST-X 2500	2.4 - 15 kW	NEMA 1: 662°F (350°C) NEMA 4: 572°F (300°C) NEMA 7: 482°F (250°C) ATEX: 482°F (250°C)	OD: .625" (5/8") (15.9 mm) Wall: .065" (1.7 mm)	2	4000 psi (275 bar)	NEMA 1 NEMA 4 NEMA 7 ATEX
CAST-X 3000	2.6 - 27 kW	NEMA 4: 572°F (300°C) NEMA 7 / ATEX: 482°F (250°C)	OD: .750" (3/4") (19.1 mm) Wall: .065" (1.7 mm)	2	3300 psi (228 bar)	NEMA 4 NEMA 7/ATEX
CAST-X 4000	6.7 - 60.3 kW	NEMA 4: 572°F (300°C) NEMA 7 / ATEX: 662°F (350°C)	OD: 1.0" (25.4 mm) Wall: .083" (2.1 mm)	2	3100 psi (214 bar)	NEMA 4 NEMA 7/ATEX
UNIVERSAL SOLVENT HEATER	6 - 8 kW	392°F (200°C)	<u>Solvent Tube:</u> OD: .750" (3/4") (19.1 mm) Wall: .065" (1.7 mm) <u>Cooling Tube:</u> OD: .250" (1/4") (6.3 mm) Wall: .035" (0.9 mm)	1 Solvent Tube 1 Cooling Tube	3300 psi (228 bar)	NEMA 7

Fuente: CAST-X Circulation Heaters, Summary Sheet

El modelo elegido es el CAST-X-2000 ya que se adecua a nuestra potencia eléctrica requerida, presión de trabajo de 300bar y temperatura de 17°C a 40°C.

Selección del regulador de presión

El proceso 4-5 del Diagrama de Mollier del CO₂ consta en la despresurización o expansión isoentálpica del CO₂ con la finalidad de que abandone el estado supercrítico para separarlo de los compuestos fenólicos. Para llevar al CO₂ que se encuentra a 300bar y 40°C a 60bar se emplea un regulador de

contrapresión, se selecciona el modelo 26-1700 del fabricante TESCO, el cual es capaz de controlar una presión máxima de entrada de 689bar, temperatura de funcionamiento de -40°C a 74°C y material acero inoxidable AISI316 para aplicaciones de gas o líquidos según especificación.

Figura 14

Regulador contrapresión modelo 26-1700 marca TESCO

26-1700 SERIES

Regulators - Relief / Backpressure D26170543X012

Specifications
For other materials or modifications, please consult TESCO.

OPERATING PARAMETERS
Pressure rating per criteria of ANSI/ASME B31.3

Maximum Inlet Pressure 10,000 psig / 689 bar
Controlled Pressure Ranges 5-500, 5-800, 10-1500, 15-2500, 25-4000, 50-6000, and 200-10,000 psig 0.35-34.5, 0.35-55.2, 0.69-103, 1.03-172, 1.72-276, 3.45-414, and 13.8-689 bar
Design Proof Pressure 150% maximum rated
Leakage Bubble-tight
Operating Temperature -40°F to 165°F / -40°C to 74°C
Flow Capacity C _v = 0.10 (26-17X1 through 26-17X4) C _v = 0.14 (26-17X5 through 26-17X7)
Maximum Operating Torque 40 in-lbs / 4.5 N·m



TESCOM 26-1700 Series regulator controls pressures up to 15,000 psig / 1034 bar and is suitable for gas or liquid service.

Fuente: <https://www.emerson.com/documents/automation/catalog-series-26-1700-control-pressure-regulator-tescom-en-5322158.pdf>

Selección del calentador a la salida de la extracción

El proceso 5-6 del Diagrama de Mollier se basa en calentar el CO₂ isobáricamente hasta vapor sobrecalentado, es decir, estado gaseoso, ya que en este estado es menos denso, se reduce su densidad y tiene menor capacidad de disolvente para completar la separación de los componentes

fenólicos. La presión de trabajo es de 60bar y se basa en subir la temperatura de 21°C a 25°C mediante un calentador eléctrico.

Procedemos a determinar el flujo de calor necesario:

$$\dot{Q}_{56} = \dot{m}_{CO_2}(h_6 - h_5) \quad (23)$$

Donde:

\dot{Q}_{56} = Flujo de calor en kJ/s del estado 5 al 6

\dot{m}_{CO_2} = flujo másico de CO₂ en kg/s

h_5 y h_6 = Entalpías de CO₂, según el ciclo termodinámico en kJ/kg (Tabla 9)

$$\dot{Q}_{56} = V_{CO_2} * \rho_{56}(h_6 - h_5)$$

Donde, la densidad ρ_{56} a la temperatura media de 23°C:

$$\rho_{56} = 452.815 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{Q}_{56} = 8.33 * 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 452.815 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (-95 + 238) \text{kJ/kg}$$

$$\dot{Q}_{56} = \frac{5.39 \text{kJ}}{\text{s}} = 5.39 \text{kW}$$

La selección del calentador eléctrico se realizó igualmente en base al fabricante CAS Aluminium Solutions, seleccionando el modelo el CAST-X-2000 ya que se adecua a nuestra potencia eléctrica requerida, presión de trabajo de 60bar y temperatura de 21°C a 25°C (ver Figura 13).

5.2 Resultados inferenciales

Debido a que nuestra investigación es de tipo predictiva basado en un diseño teórico, solo se tiene en cuenta resultados descriptivos.

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados.

6.1.1 Contrastación de hipótesis específica

Hipótesis específica 1

Hipótesis Alternativa H_1 : La temperatura y presión como parámetros de operación permite la extracción de compuestos fenólicos a partir de los granos de café gastados usando CO_2 como fluido supercrítico.

Hipótesis Nula H_0 : No es posible la extracción de compuestos fenólicos a partir de los granos de café gastados usando CO_2 como fluido supercrítico teniendo como parámetros de operación la temperatura y presión.

Se acepta la hipótesis alterna, como se demuestra en la Tabla 9 *Estados termodinámicos* y Figura 8 *Diagrama de Presión – Entalpía del CO_2* , se logró determinar el ciclo termodinámico y las etapas del proceso de extracción debido al acondicionamiento de los parámetros de presión y temperatura.

Hipótesis específica 2

Hipótesis Alternativa H_2 : Los criterios para la selección del equipo principal para la extracción de compuestos fenólicos a partir de los granos de café

gastados usando CO₂ como fluido supercrítico son la presión, temperatura, cantidad de materia prima, rendimiento y balance de materia.

Hipótesis Nula H₀: No son criterios para la selección del equipo principal para la extracción de compuestos fenólicos a partir de los granos de café gastados usando CO₂ como fluido supercrítico, la presión, temperatura, cantidad de materia prima, rendimiento y balance de materia.

Se acepta la hipótesis alterna, como se demuestra en la Tabla 10, se evidencia que la selección del equipo principal Recipiente de extracción es posible con los parámetros de presión, temperatura, cantidad de materia prima, rendimiento y balance de materia. Se puede apreciar que se seleccionó el tipo de material, capacidad, diámetro interno, altura interna, espesor de la parte cilíndrica, presión máxima de trabajo, presión de diseño y temperatura de trabajo.

6.1.2 Contrastación de hipótesis general

Hipótesis Alterna H₁: El diseño de una planta piloto para la extracción de compuestos fenólicos a partir de los granos de café gastados usando CO₂ como fluido supercrítico es posible determinando los parámetros de operación y equipo principal.

Hipótesis Nula H₀: No es posible el diseño de una planta piloto para la extracción de compuestos fenólicos a partir de los granos de café gastados usando CO₂ como fluido supercrítico determinando los parámetros de operación y equipo principal.

Se acepta la hipótesis alterna, como se demuestra en los resultados descriptivos se evidencia que el diseño de una planta piloto para la extracción de compuestos fenólicos a partir de los granos de café gastados usando CO₂ como fluido supercrítico es posible determinando los parámetros de operación de presión y temperatura como también determinando el equipo principal. Además, se seleccionaron equipos secundarios tales como el Tanque pulmón, un Intercambiador de placas soldadas, una bomba de tipo reciprocante, calentadores eléctricos y un regulador de presión.

6.2 Contratación de los resultados con otros estudios similares.

Los resultados obtenidos en nuestro trabajo de investigación para la obtención de compuestos fenólicos a partir de residuos de café gastados usando CO₂ como fluido supercrítico teniendo en cuenta los parámetros óptimos de extracción de 40 °C y 300 *bar*, para la determinación de los estados termodinámicos del proceso de extracción, condiciones de operación y la selección del equipo principal y secundarios demuestra que la ejecución de este es factible.

Otra investigación similar como la de Quevedo (2019), quien diseñó la planta piloto para la extracción de aceite esencial de la cáscara de limón, determino los parámetros óptimos del proceso de extracción $T = 45\text{ °C}$ y $P = 200\text{ bar}$ y los estados termodinámicos del proceso de extracción el diseño de los equipos principales del proceso a partir de volumen estándar de 5L, en

donde se demuestra la viabilidad del diseño de una planta piloto para otra materia prima.

Asimismo, otra investigación parecida es la de Vivar (2013), quien realiza el diseño de una planta piloto para la extracción de oleorresina de páprika usando el mismo solvente de nuestro estudio como fluido supercrítico, determina los parámetros óptimos del proceso de extracción $T = 55\text{ }^\circ\text{C}$ y $P = 400\text{ bar}$ y los estados termodinámicos del proceso y la selección de los equipos del proceso a partir de un volumen de recipiente estándar, en donde se pueda apreciar la factibilidad del diseño.

6.3 Responsabilidad ética de acuerdo con los reglamentos vigentes

Durante el desarrollo del trabajo de investigación, los autores de la investigación se responsabilizan por la información emitida en el presente trabajo de tesis, de acuerdo con el Reglamento del Código de Ética de la investigación de la Universidad Nacional del Callao, según Resolución de Consejo Universitario No 260-2019-CU.

VII. CONCLUSIONES

- a) Se diseñó una planta piloto para la extracción de compuestos fenólicos a partir de residuos de café usando CO₂ como fluido supercrítico, a partir de un volumen estándar, considerando un volumen de recipiente de 5L, lo que permitió estimar una producción de 5.565g de compuestos fenólicos, utilizando como materia prima 53g de granos de café gastados y 4.39 kg de CO₂, mediante un proceso de operación batch.
- b) Se determinó los parámetros de operación para que el fluido supercrítico CO₂ pueda realizar el proceso de extracción de los compuestos fenólicos a partir de los granos de café gastados en un proceso termodinámico de 6 etapas siendo los parámetros de temperatura y presión de 20°C y 57.37bar; 0°C y 57.37bar, 17°C y 300bar; 40°C y 300bar; 21°C y 60 bar; 25°C y 60 bar.
- c) Se ha realizado la selección del equipo principal de la planta piloto, siendo este el Recipiente de extracción, capaz de trabajar a las condiciones de operación de $T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ y $P = 300 \text{ bar}$ necesarias para lograr la extracción de los compuestos fenólicos. Está diseñado para una capacidad de 5L, con un diámetro interno de 155 mm, altura interna de 265 mm, un espesor de cubierta de 15 mm y que el material adecuado es de tipo acero inoxidable del tipo AISI 316. Además, se determinó y seleccionó equipos secundarios (Tanque pulmón, Intercambiador de calor de placas soldadas Bomba de tipo reciprocante, Calentadores eléctricos y Regulador de presión) y sus condiciones de operación.

VIII. RECOMENDACIONES

- a) Realizar la ingeniería de detalle para la construcción de la planta piloto tomando como base el diseño conceptual con la finalidad del aprendizaje y difusión del proceso de extracción mediante fluido supercrítico.
- b) Realizar la estimación de costos, la comparación y análisis con las operaciones tradicionales de extracción y el tiempo de recuperación de la inversión para la viabilidad económica del diseño de la planta.
- c) Realizar la caracterización de los residuos de café incluyendo el análisis de la porosidad y determinar la influencia en el proceso de extracción de los compuestos fenólicos.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, K. S., Gonçalves, R. T., Maraschin, M., Ribeiro-do-Valle, R. M., Martinez, J., & Ferreira, S. R. (2012). Supercritical fluid extraction from spent coffee grounds and coffee husks: Antioxidant activity and effect of operational variables on extract composition. *Talanta*, 544-552. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2011.11.031>
- Anzueto, F., Baumann, T., Graziosi, G., Piccin, C., Sondahl, M. R., & van der Vossen, H. (2005). *Espresso Coffee: The Science of Quality- The plant*. (A. Illy, & R. Viani, Edits.) Amsterdam: Elsevier Academic Press. DOI: 10.13140 / RG.2.1.2059.6645t
- ASME. (2010). *VIII Division 1. Rules for construction of pressure vessels. Basic rules*. New York: ASME.
- ASME. (2010). *VIII Division 2. Rules for cconstruction of pressure vessels. Alternative rules*. New York: ASME.
- Cuellar, R. (2017). *Diseño de la automatización para un Planta piloto de Extracción por fluido supercrítico utilizando CO₂ como solvente*. Lima. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/8438>
- Diaz R, M., & Gonzales V, L. (2017). *Fenólicos a partir de residuos de café: Optimización del proceso de extracción*. Trujillo: Revista de Investigación Altoandina. <http://dx.doi.org/10.18271/ria.2017.315>
- Franca, A. S., & Oliveira, L. S. (2019). *Coffee*. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814138-0.00017-4>

- Gavilan, N. (2016). "Efecto de presión y temperatura en extracción por CO₂-supercrítico y etanol en capsaicinoides de venas de ají panca (*Capsicum chinense*)". Junín.
<http://hdl.handle.net/20.500.12894/4119>
- Kakac, S., Liu, H., & Pramuanjaroenkij, A. (2012). *Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal design*. Florida: CRC Press.
- Kavalcik, A., Obruca, S., & Marova, I. (2018). *Valorization of Spent Coffee Grounds: A review*. Czech Republic: Food and Bioproducts Processing.
- McNutt, J., & He, Q. (. (2018). Spent coffee grounds: A review on current utilization. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*.
<https://doi.org/10.1016/j.jiec.2018.11.054>
- Monente, C., Bravo, J., Vitas, A., Arbillaga, L., De Peña, M. P., & Cid, C. (2015). *Coffee and spent coffee extracts protect against cell mutagens and inhibit growth of food-borne pathogen microorganisms*. Pamplona.
<https://doi.org/10.1016/j.jff.2014.12.006>
- Moreno, D. (2017). *Evaluación del efecto de la presión y temperaturas en la extracción con CO₂ supercrítico, de Glucosinolatos de Mashua chispeada (*Tropaeolum tuberosum*)*. Junín.
<http://hdl.handle.net/20.500.12894/4122>
- Ochoa, J. (2017). *Diseño de una Planta piloto de extracción bio-botánica utilizando dióxido de carbono supercrítico*. Lima.
<http://hdl.handle.net/20.500.12404/8502>

- Ortiz, S. (2020). *Evaluación de una propuesta para la obtención de cafeína partiendo de residuos de café generados por la industria cafetera*. Bogotá D.C: Universidad de América.
<https://hdl.handle.net/20.500.11839/7785>
- Peters, M., Timmerhaus, K., & West, R. (2003). *Plant Design and Economics for Chemical engineers* (Quinta edición ed.). New York: McGraw-Hill.
- Quevedo, C. (2019). *Diseño de una planta piloto de extracción de aceite esencial de limón usando CO₂ como fluido supercrítico*. Piura: Universidad Nacional de Piura.
<http://repositorio.unp.edu.pe/handle/UNP/1591>
- Ribeiro, H., Marto, J., Raposo, S., Agapito, M., Isaac, V., Chiari, B., . . . Simonoes, P. (2013). *From coffee industry waste materials to skin friendly*. Lisboa.
DOI: 10.1002 / ejlt.201200239
- Ricardo M. Couto, J. F. (2009). Supercritical fluid extraction of lipids from spent coffee grounds. *The Journal of Supercritical Fluids*.
<https://doi.org/10.1016/j.supflu.2009.09.009>
- Sovová, H., & Stateva, R. (2011). *Supercritical extraction from vegetable materials*. Institute of Chemical Process Fundamentals, Institute of Chemical Engineering, Praga.
DOI: 10.1515 / REVCE.2011.002
- Torres (2020). *Obtención de componentes bioactivos de residuos de la industria cafetera mediante disolventes supramoleculares*. Córdoba.
<http://hdl.handle.net/10396/19733>
- Towler, G., & Sinnott, R. (2009). *Diseño en ingeniería química*. Oxford: Elseiver.

Villada, H., Carrera, J., & Velasco, R. (2007). *Aplicaciones de los Fluidos Supercríticos*.

Vivar (2013). *Diseño de una planta piloto de extracción de oleorresina de páprika usando CO2 como fluido supercrítico*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.

<http://hdl.handle.net/20.500.12404/5060>

Yang, C.-C., Hung, C.-F., & Bing-Huei, C. (2017). *Preparation of coffee oil-algae oil-based nanoemulsions and the study of their inhibition effect on UVA-induced skin damage in mice and melanoma cell growth*. Int J

Nanomedicine.

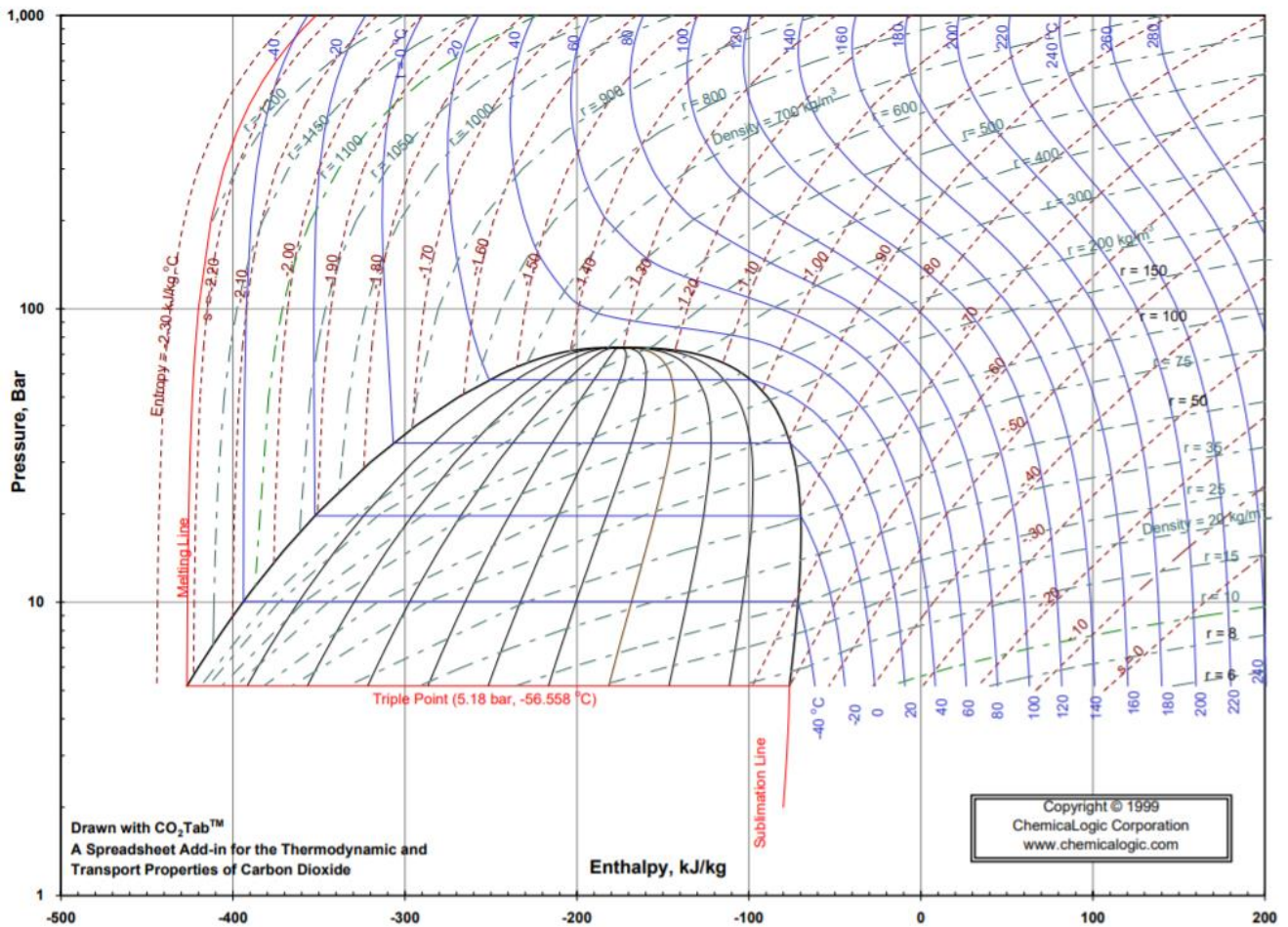
DOI: 10.2147 / IJN.S144705

ANEXOS

ANEXO 1: DISEÑO DE PLANTA PILOTO PARA LA EXTRACCIÓN DE COMPUESTOS FENÓLICOS A PARTIR DE RESIDUOS DE CAFÉ USANDO CO₂ COMO FLUIDO SUPERCRÍTICO

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADOR	MÉTODOS
<p>General ¿De qué manera se puede diseñar una planta piloto para la extracción de compuestos fenólicos a partir de residuos de café usando CO₂ como fluido supercrítico?</p>	<p>General Diseñar una planta piloto para la extracción de compuestos fenólicos a partir de los granos de café gastados usando CO₂ como fluido supercrítico</p>	<p>General El diseño de una planta piloto para la extracción de compuestos fenólicos a partir de los granos de café gastados usando CO₂ como fluido supercrítico es posible determinando los parámetros de operación y equipo principal.</p>	<p>Dependientes Y = Diseño de la planta piloto para la extracción de compuestos fenólicos a partir de los granos de café gastados usando CO₂ como fluido supercrítico</p>	<p>Parámetros de operación Equipo extracción/Equipo principal</p>	<p>°C bar kg/h L m</p>	<p>Cuantitativo</p>
<p>Específico ¿Cuáles son los parámetros de operación para la extracción de compuestos fenólicos a partir de los granos de café gastados usando CO₂ como fluido supercrítico?</p>	<p>Específico Determinar los parámetros de operación para la extracción de compuestos fenólicos a partir de los granos de café gastados usando CO₂ como fluido supercrítico</p>	<p>Específico La temperatura y presión como parámetros de operación permite la extracción de compuestos fenólicos a partir de los granos de café gastados usando CO₂ como fluido supercrítico.</p>	<p>Independientes X₁ = Parámetros de operación para la extracción de compuestos fenólicos a partir de los granos de café gastados usando CO₂ como fluido supercrítico</p>	<p>Temperatura (T) Presión (P) Flujo (F)</p>	<p>°C Bar Kg/h</p>	<p>Cuantitativo: Cálculos de las condiciones termodinámicas del proceso de extracción</p>
<p>¿Cuáles son los criterios para la selección del equipo principal para la extracción de compuestos fenólicos a partir de los granos de café gastados usando CO₂ como fluido supercrítico?</p>	<p>Seleccionar el equipo principal para la extracción de compuestos fenólicos a partir de los granos de café gastados usando CO₂ como fluido supercrítico.</p>	<p>Los criterios para la selección del equipo principal para la extracción de compuestos fenólicos a partir de los granos de café gastados usando CO₂ como fluido supercrítico son la presión, temperatura, cantidad de materia prima, rendimiento y balance de materia.</p>	<p>X₂= Selección del equipo principal de la planta piloto para la extracción de compuestos fenólicos a partir de los granos de café gastados usando CO₂ como fluido supercrítico.</p>	<p>Diámetro Altura Volumen</p>	<p>m L</p>	<p>Cuantitativo: Cálculo de balance de materia</p>

ANEXO 2: DIOXIDO DE CARBONO: DIAGRAMA DE PRESIÓN - DIAGRAMA DE ENTALPÍA



Fuente: http://www.chemicallogic.com/Documents/co2_mollier_chart_met.pdf

ANEXO 3: ESPECIFICACIÓN ESTÁNDAR PARA PLACAS, LÁMINAS Y TIRAS DE ACERO INOXIDABLE AL CROMO Y CROMO-NÍQUEL PARA RECIPIENTES A PRESIÓN Y PARA APLICACIONES GENERALES

TABLE 2 Mechanical Test Requirements

UNS Designation	Type ^A	Tensile Strength, min		Yield Strength, ^B min		Elongation in 2 in. or 50 mm, min, %	Hardness, max ^C		Cold Bend ^D	
		ksi	MPa	ksi	MPa		Brinell	Rockwell B		
Austenitic (Chromium-Nickel) (Chromium-Manganese-Nickel)										
N08020	...	80	550	35	240	30 ^F	217	95	not required	
N08367	...	100	690	45	310	30	...	100	not required	
Sheet and Strip		95	655	45	310	30	241	...	not required	
Plate		80	550	35	240	30	192	90	not required	
N08700	...	75	520	30 ^G	205 ^G	30 ^H	...	...	not required
N08800	800 ^F	65	450	25 ^G	170 ^G	30	...	...	not required
N08810	800H ^F	65	450	25	170	30	...	...	not required
N08811	...	71	490	31	220	35	...	90	not required	
N08904	904L ^F	94	650	43	295	35	...	...	not required
N08926	...	75	515	38	260	40	217	95	...	
S20100	201-1 ^I	95	655	45	310	40	241	100	...	
S20100	201-2 ^I	95	655	38	260	40	217	95	not required	
S20103	201L ^F	95	655	45	310	45	241	100	not required	
S20153	201LN ^F	125	860	50	345	40	255	25 ^J	not required	
S20161	...	90	620	38	260	40	241	...	...
S20200	202	95	655	48	330	35	241	100	not required	
S20400	...	105	725	60	415	30	241	100	not required	
S20910	XM-19 ^K	100	690	55	380	35	241	100	not required	
Sheet and Strip		100	690	60	415	40	241	100	not required	
Plate		90	620	50	345	40	241	100	not required	
S21600	XM-17 ^J	100	690	60	415	40	241	100	not required	
Sheet and Strip		90	620	50	345	35	241	100	not required	
Plate		100	690	60	415	40	241	100	not required	
S21603	XM-18 ^K	100	690	60	415	40	241	100	not required	
Sheet and Strip		90	620	50	345	40	241	100	not required	
Plate		95	655	50	345	35	241	100	not required	
S21800	...	100	690	60	415	40	241	100	not required	
S24000	XM-29 ^K	100	690	55	380	40	241	100	not required	
Sheet and Strip		75	515	30	205	40	217	95	not required	
Plate		80	550	32	220	45	241	100	not required	
S30100	301	80	550	35	240	45	241	100	not required	
S30103	301L ^F	75	515	30	205	40	201	92	not required	
S30153	301LN ^F	75	515	30	205	40	201	92	not required	
S30200	302	75	515	30	205	40	201	92	not required	
S30400	304	70	485	25	170	40	201	92	not required	
S30403	304L	75	515	30	205	40	201	92	not required	
S30409	304H	87	600	42	290	40	217	95	not required	
S30415	...	80	550	35	240	30	217	95	not required	
S30451	304N	80	550	35	240	30	217	95	not required	
S30452	XM-21 ^K	90	620	50	345	30	241	100	not required	
Sheet and Strip		85	585	40	275	30	241	100	not required	
Plate		75	515	30	205	40	217	95	not required	
S30453	304LN	70	485	25	170	40	183	88	not required	
S30500	305	78	540	35	240	40	...	...	...
S30600	...	78	540	37	255	30	...	...	not required
S30601	...	90	620	40	275	35	217	95	not required	
S30615	...	87	600	45	310	40	217	95	...	
S30815	...	75	515	30	205	40	217	95	not required	
S30908	309S	75	515	30	205	40	217	95	not required	
S30909	309H ^F	75	515	30	205	40	217	95	not required	
S30940	309Cb ^F	75	515	30	205	40	217	95	not required	

ASTM A 240/A 240M - 05a

Fuente: ASTM 240/A 240M

TABLE 2 Continued

UNS Designation	Type ^A	Tensile Strength, min		Yield Strength, ^B min		Elongation in 2 in. or 50 mm, min, %	Hardness, max ^C		Cold Bend ^D	
		ksi	MPa	ksi	MPa		Brinell	Rockwell B		
S30941	309HCB ^F	75	515	30	205	40	217	95	not required	
S31008	310S	75	515	30	205	40	217	95	not required	
S31009	310H ^F	75	515	30	205	40	217	95	not required	
S31040	310Cb ^F	75	515	30	205	40	217	95	not required	
S31041	310HCB ^F	75	515	30	205	40	217	95	not required	
S31050	310 MoLN ^F									
	t ≤ 0.25 in.	84	580	39	270	25	217	95	not required	
	t > 0.25 in.	78	540	37	255	25	217	95	not required	
S31060	...	87	600	41	280	40	217	95	not required	
S31254	Sheet and Strip	100	690	45	310	35	223	96	not required	
	Plate	95	655	45	310	35	223	96	not required	
S31266	...	109	750	61	420	35	...	...	not required
S31277	...	112	770	52	360	40	...	...	not required
S31600	316	75	515	30	205	40	217	95	not required	
S31603	316L	70	485	25	170	40	217	95	not required	
S31609	316H	75	515	30	205	40	217	95	not required	
S31635	316Ti ^F	75	515	30	205	40	217	95	not required	
S31640	316Cb ^F	75	515	30	205	40	217	95	not required	
S31651	316N	80	550	35	240	35	217	95	not required	
S31653	316LN	75	515	30	205	40	217	95	not required	
S31700	317	75	515	30	205	35	217	95	not required	
S31703	317L	75	515	30	205	40	217	95	not required	
S31725	317LM ^F	75	515	30	205	40	217	95	not required	
S31726	317LMN ^F	80	550	35	240	40	223	96	not required	
S31727	...	80	550	35	240	35	217	95	not required	
S31753	317LN	80	550	35	240	40	217	95	not required	
S32050	...	98	675	48	330	40	250	...	not required	
S32053	...	93	640	43	295	40	217	96	not required	
S32100	321	75	515	30	205	40	217	95	not required	
S32109	321H	75	515	30	205	40	217	95	not required	
S32615 ^I	...	80	550	32	220	25	...	...	not required
S32654	...	109	750	62	430	40	250	...	not required	
S33228	...	73	500	27	185	30	217	...	not required	
S33400	334 ^F	70	485	25	170	30	...	92	not required	
S34565	...	115	795	60	415	35	241	100	not required	
S34700	347	75	515	30	205	40	201	92	not required	
S34709	347H	75	515	30	205	40	201	92	not required	
S34800	348	75	515	30	205	40	201	92	not required	
S34809	348H	75	515	30	205	40	201	92	not required	
S35045	...	70	485	25	170	35	...	...	not required
S35135	...	...	...	...	...	...	...	...	not required
	Sheet and Strip	80	550	30	205	30	...	...	not required
	Plate	75	515	30	205	30	...	...	not required
S35315	...	94	650	39	270	40	217	95	not required	
S38100	XM-15 ^K	75	515	30	205	40	217	95	not required	
S38815	...	78	540	37	255	30	...	...	not required
Duplex (Austenitic-Ferritic)										
S31200	...	100	690	65	450	25	293	31 ^J	not required	
S31260	...	100	690	70	485	20	290	...	...
S31803	...	90	620	65	450	25	293	31 ^J	not required	
S32001	...	90	620	65	450	25	...	25 ^J	not required	
S32003	...	90	620	65	450	25	293	31 ^J	not required	

TABLE 2 Continued

UNS Designation	Type ^A	Tensile Strength, min		Yield Strength, ^B min		Elongation in 2 in. or 50 mm, min, %	Hardness, max ^C		Cold Bend ^D	
		ksi	MPa	ksi	MPa		Brinell	Rockwell B		
S32101	...									
	t ≤ 0.187 in. [5.00 mm]	101	700	77	530	30	290	...	not required	
	t > 0.187 in. [5.00 mm]	94	650	65	450	30	290	...	not required	
S32205	2205 ^F	95	655	65	450	25	293	31 ^J	not required	
S32304	2304 ^F	87	600	58	400	25	290	32 ^J	not required	
S32506	...	90	620	65	450	18	302	32 ^J	not required	
S32520	...	112	770	80	550	25	310	...	not required	
S32550	255 ^F	110	760	80	550	15	302	32 ^J	not required	
S32750	2507 ^F	116	795	80	550	15	310	32 ^J	not required	
S32760	...	108	750	80	550	25	270	...	not required	
S32900	329	90	620	70	485	15	269	28 ^J	not required	
S32906	...									
	t < 0.04 in. [1.0 mm]	116	800	94	650	25.0	310	32 ^J	not required	
	t ≥ 0.04 in. [1.0 mm]	109	750	80	550	25.0	310	32 ^J	not required	
S32950 ^M	...	100	690	70	485	15	293	32 ^J	not required	
S39274 ^H	...	116	800	80	550	15	310	32 ^J	not required	
Ferritic or Martensitic (Chromium)										
S32803	...	87	600	72	500	16	241	100	not required	
S40500	405	60	415	25	170	20	179	88	180	
S40900 ^N	409 ^N									
S40910	...	55	380	25	170	20	179	88	180	
S40920	...	55	390	25	170	20	179	88	180	
S40930	...	55	380	25	170	20	179	88	180	
S40945	...	55	380	30	205	22	...	80	180	
S40975	...	60	415	40	275	20	197	92	180	
S40977	...	65	450	41	280	18	180	88	not required	
S41000	410	65	450	30	205	20	217	96	180	
S41003	...	66	455	40	275	18	223	20 ^J	not required	
S41008	410S	60	415	30	205	22 ^D	183	89	180	
S41045	...	55	380	30	205	22	...	80	180	
S41050	...	60	415	30	205	22	183	89	180	
S41500	...	115	795	90	620	15	302	32 ^J	not required	
S42035	...	80	550	55	380	16	180	88	not required	
S42900	429 ^F	65	450	30	205	22 ^D	183	89	180	
S43000	430	65	450	30	205	22 ^D	183	89	180	
S43035	439	60	415	30	205	22	183	89	180	
S43400	434	65	450	35	240	22	...	89	180	
S43600	436	65	450	35	240	22	...	89	180	
S43932	...	60	415	30	205	22	183	89	180	
S43940	...	62	430	36	250	18	180	88	not required	

Fuente: ASTM 240/A 240M

A 240/A 240M - 05a

A 240/A 240M - 05a

TABLE 2 Continued

UNS Designation	Type ^A	Tensile Strength, min		Yield Strength, ^B min		Elongation in 2 in. or 50 mm, min, %	Hardness, max ^C		Cold Bend ^{D,E}
		ksi	MPa	ksi	MPa		Brinell	Rockwell B	
S44400	...	60	415	40	275	20	217	96	180
S44500	...	62	427	30	205	22	...	83	180
S44626	XM-33 ^K	68	470	45	310	20	217	96	180
S44627	XM-27 ^K	65	450	40	275	22	187	90	180
S44635	...	90	620	75	515	20	269	28 ^F	180
S44660	...	85	585	65	450	18	241	100	180
S44700	...	80	550	60	415	20	223	20 ^F	180
S44735	...	80	550	60	415	18	255	25 ^F	180
S44800	...	80	550	60	415	20	223	20 ^F	180
S46800	...	60	415	30	205	22	...	90	180

10

^A Unless otherwise indicated, a grade designation originally assigned by the American Iron and Steel Institute (AISI).
^B Yield strength shall be determined by the offset method at 0.2% in accordance with Test Methods and Definitions A 370. Unless otherwise specified (see Specification A 480/A 480M, paragraph 4.1.11, Ordering Information), an alternative method of determining yield strength may be based on total extension under load of 0.5%.
^C Either Brinell or Rockwell B Hardness is permissible.
^D Bend tests are not required for chromium steels (ferritic or martensitic) thicker than 1 in. [25 mm] or for any austenitic or duplex (austenitic-ferritic) stainless steels regardless of thickness.
^E Elongation for thickness, less than 0.015 in. (0.38 mm) shall be 20% minimum, in 1 in. (25.4 mm).
^F UNS number was editorially corrected.
^G Common name, not a trademark, widely used, not associated with any one producer.
^H Yield strength requirements shall not apply to material under 0.020 in [0.50 mm] in thickness.
^I Not applicable for thicknesses under 0.010 in. [0.25 mm].
^J Type 201 is generally produced with a chemical composition balanced for rich side (Type 201-1) or lean side (Type 201-2) austenite stability depending on the properties required for specific applications.
^K Rockwell C scale.
^L Naming system developed and applied by ASTM.
^M For S32615, the grain size as determined in accordance with the Test Methods E 112, Comparison Method, Plate II, shall be No. 3 or finer.
^N Prior to Specification A 240 – 89b, the tensile value for S32950 was 90 ksi.
^O S40900 (Type 409) has been replaced by S40910, S40920, and S40930. Unless otherwise specified in the ordering information, an order specifying S40900 or Type 409 shall be satisfied by any one of S40910, S40920, or S40930 at the option of the seller. Material meeting the requirements of S40910, S40920, or S40930, may at the option of the manufacturer be certified as S40900.
^P Material 0.050 in (1.27 mm) and under in thickness shall have a minimum elongation of 20%.

ASTM A 240/A 240M – 05a

Fuente: ASTM 240/A 240M

ANEXO 4: FICHA TECNICA DEL METAL AISI 316



ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO AL Cr-Ni-Mo ACX 240	
DESIGNACIÓN EN	DESIGNACIÓN ASTM
1.4401	316
1.4404	316L
X2CrNiMo17-12-2	S31603

DESCRIPCIÓN Los aceros inoxidable austeníticos del grupo Cr-Ni-Mo contienen Mo para incrementar la resistencia a la corrosión por picaduras. Los del tipo L (bajo contenido en C) tienen, además, menor susceptibilidad a la corrosión intergranular, porque se evita la precipitación de carburos de Cr en aplicaciones que impliquen su uso a temperaturas de sensibilización, como soldaduras.

COMPOSICIÓN QUÍMICA	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
	≤0,030	≤0,75	≤2,00	≤0,040	≤0,030	16,00-18,00	10,00-12,00	2,00-2,50

APLICACIONES

- Industria química y petroquímica
- Industria alimentaria, farmacéutica y textil
- Adornos arquitectónicos
- Aplicaciones con soldadura
- Tubos y calderería
- Cisternas de vehículos

CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS EN ESTADO DE RECOCIDO		
$R_{p0,2}$	>	240 N/mm ²
R_m	540 - 620	N/mm ²
Alargamiento	>	45%
Dureza	<	200 HB

PROPIEDADES FÍSICAS A 20°C presenta una densidad de 8 kg/dm³ y un calor específico de 500 J/kg·K

	20°C	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C
Módulo de elasticidad (GPa)	200	194	186	179	172	165
Coefficiente medio dilatación térmica entre 20°C (10 ⁻⁶ × K ⁻¹) y	-	16	16,5	17	17,5	18
Conductividad térmica (W/m·K)	15	16	17,5	19	21	22,5
Resistividad eléctrica (Ω·mm ² /m)	0,75	0,82	0,95	1,05	1,12	1,19

SOLDADURA Los consumibles recomendados son los siguientes:

Electrodos revestidos	Alambres y varillas	Electrodos huecos
E 19 12 3 L	G 19 12 3 L (GMAW) W 19 12 3 L (GTAW)	T 19 12 3 L
ER 316L (Si)	P 19 12 3 L (PAW) S 19 12 3 L (SAW)	ER 316L (Si)
ER 317L (Si)	ER 316 (Si) ER 317 (Si)	ER 317L (Si)

CORROSIÓN BAJO TENSIONES La corrosión bajo tensiones puede ocurrir en los aceros inoxidable austeníticos, cuando están sometidos a esfuerzos de tracción en medios con iones cloruros y temperaturas superiores a 60°C.

Fuente: www.acerinox.com/es/productos/tipos-de-acero/EN-1.4404---AISI-316L-AISI-316L-00001/



RESISTENCIA A LA CORROSIÓN	<p>Los aceros inoxidable austeníticos de la familia Cr-Ni-Mo, presentan mejores propiedades de resistencia a la corrosión generalizada y atmosférica que los aceros inoxidable Cr-Ni.</p> <p>Presentan una velocidad de corrosión inferior a 0,10 mm/año cuando están en contacto con los siguientes medios:</p> <ul style="list-style-type: none">- Ácido fosfórico al 20% en ebullición.- Ácido sulfúrico al 20% a temperatura ambiente.- Ácido tartárico al 60% a 80°C.- Ácido acético al 50% en ebullición.- Ácido fórmico al 100% a 60°C.- Cerveza.- Leche.- Ácido oleico al 100% a 180°C.- Gasolina.
CORROSIÓN POR PICADURAS E INTERSTICIAL	<p>El acero ACX 240 es más resistente a la corrosión por picaduras y a la corrosión intersticial que el ACX 120. Los inoxidable de la familia Cr-Ni se pueden emplear en medios que contengan hasta 200 ppm de iones cloruros mientras que los de la familia Cr-Ni-Mo pueden estar en contacto con soluciones de hasta 1000 ppm.</p>
CORROSIÓN INTERGRANULAR	<p>En aplicaciones que conlleven un uso continuado en el rango de temperaturas de 450 a 850°C, u operaciones de soldadura con riesgo de sensibilización, se recomienda usar este tipo de acero (aleaciones de bajo C) para así minimizar el riesgo de corrosión intergranular.</p>
RESISTENCIA A LA OXIDACIÓN EN CALIENTE	<p>La máxima temperatura de servicio para estos tipos de aceros en aplicaciones continuas es de 920°C. Para ciclos térmicos intermitentes, la máxima temperatura de servicio es de 870°C.</p>
MANTENIMIENTO SUPERFICIAL	<p>Es imprescindible realizar periódicamente unas adecuadas prácticas de limpieza para conservar las superficies de forma indefinida y obtener las mejores prestaciones del acero inoxidable.</p> <p>Para la correcta limpieza, se recomienda el empleo de agua y jabones de tipo neutro, aplicados con una bayeta o cepillo que no arañe al inoxidable. Finalizar siempre la operación con un buen enjuagado con agua, para conseguir la completa eliminación del producto limpiador empleado.</p> <p>Se deben evitar los productos clorados. En caso de que sea imprescindible su uso, el contacto ha de ser mínimo y tiene que ir seguido por un abundante enjuagado con agua.</p>
ESPECIFICACIONES	<p>Los aceros inoxidable austeníticos del grupo Cr-Ni-Mo están incluidos en las principales normas internacionales.</p> <p>Pueden ser suministrados de acuerdo a los requerimientos de las normas EN, ASTM, ASME, AMS, QQS, MILS.</p> <p>Los inoxidable del grupo Cr-Ni-Mo están homologados según:</p> <ul style="list-style-type: none">- PED (Pressure Equipment Directive), DGR L 97/23/EG de acuerdo con EN 10028-7 y AD2000 Merkblatt W2 y W10.- Lloyd's Register of Shipping. <p>Cumplen con los requisitos de las directivas europeas de:</p> <ul style="list-style-type: none">- Industria alimentaria, RE 1935/2004.- Cromo hexavalente, ROHS.- Aparatos eléctricos, ROHS.

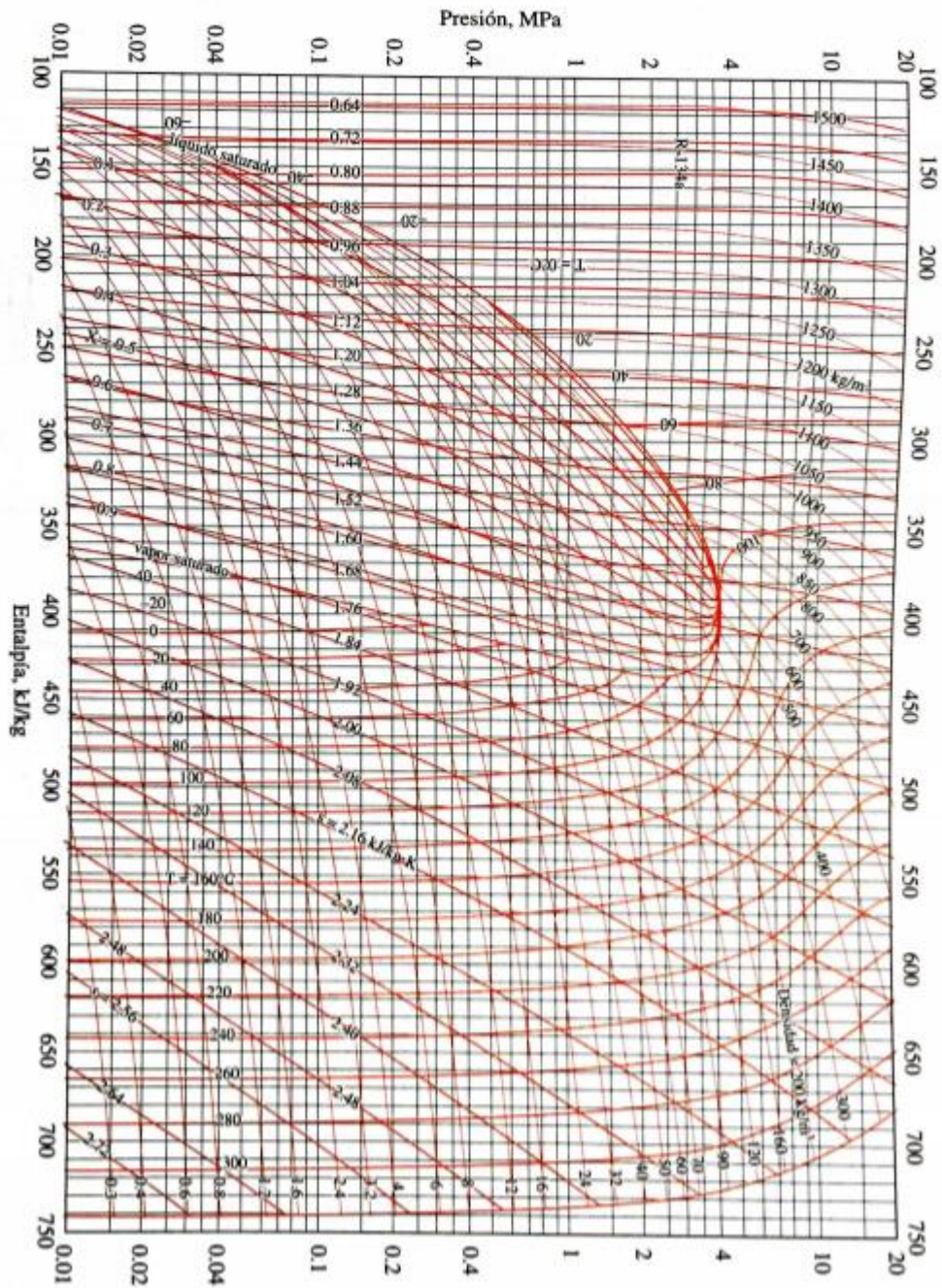
Fuente: www.acerinox.com/es/productos/tipos-de-acero/EN-1.4404---AISI-316L-AISI-316L-00001/

ANEXO 5: GUÍA PARA LA SELECCIÓN DE UN INTERCAMBIADOR

APLICACIÓN	OBSERVACIONES
Fluidos de baja viscosidad ($\mu < 10$ cp)	El intercambiador de placas requiere pequeñas áreas de transferencia. Para fluidos no corrosivos a altas temperaturas o altas presiones, usar intercambiadores tubulares
Líquidos de baja viscosidad o vapores	Para fluidos no corrosivos, usar intercambiadores tubulares de acero al carbono. Para cargas corrosivas, para mantener la higiene de los fluidos y para vapor a baja presión; usar intercambiadores de placas. Para grandes cantidades de vapor, usar intercambiadores de espiral
Fluidos de viscosidad media (109 – 100 cp)	Con iguales fluidos en ambos lados, usar el intercambiador de placas. Si las empaquetaduras causan problemas o la cantidad de sólidos es elevada, usar un intercambiador de espiral.
Fluidos con alta viscosidad ($\mu > 100$ cp)	Se aprovecha la configuración de las placas para proporcionar un flujo turbulento. En algunos casos se han usado placas para viscosidades sobre los 5 000 cp. Para viscosidades extremas es preferido el intercambiador de espiral.
Fluidos sucios (con alta tendencia a formar incrustaciones)	Puede usarse el intercambiador de placas o el de espiral. Por su fácil acceso a la limpieza es preferible el intercambiador de placas.
Suspensiones y pulpas	Recomendable el de espiral (usado en algunos casos para corrientes con mas de 50% de sólidos) y en ciertos casos el intercambiador de placas.
Líquidos sensibles al calor	El intercambiador de placas es el mejor y en ciertos casos el de espiral
Enfriamiento o calentamiento de aire	Intercambiador de superficie extendida
Gases o aire a presión	Con ciertas limitaciones puede usarse el intercambiador de placas, de otro modo debe seleccionarse un intercambiador tubular (con superficie extendida en el lado del gas)
Condensación	Para cargas no corrosivas, seleccionar un intercambiador tubular de acero al carbono. Para cargas corrosivas un intercambiador de espiral. Para ciertos casos como el requerimiento de condiciones higiénicas, puede considerarse el intercambiador de placas.
Alta presión (sobre 35 atm.) o altas temperaturas (sobre 500 C)	Usar intercambiador tubular
Fluidos extremadamente corrosivos	Usar intercambiador de grafito

Fuente: Moncada (2011)

ANEXO 6: R134a: DIAGRAMA DE PRESIÓN - DIAGRAMA DE ENTALPÍA



Fuente: <http://ambiente.usach.cl/jromero/imagenes/R134a%20Diagrama%20P-h%20-%202003-07-2014%208-20.pdf>