

PLANTA DE PRODUCCIÓN DE ÁCIDO CÍTRICO

Trabajo de fin de grado
Febrero 2026



Autores

Noel Martínez Netto
Julen Porro Fernández
Alma Pérez Parrado
Daniel Pérez Gámiz
Yennifer Xia Chen

Tutora

Meilyn González Cortés

PLANTA DE PRODUCCIÓN DE ÁCIDO CÍTRICO

Trabajo de fin de grado
Febrero 2026



Autores

Noel Martínez Netto
Julen Porro Fernández
Alma Pérez Parrado
Daniel Pérez Gámiz
Yennifer Xia Chen

Tutora

Meilyn González Cortés

TABLA DE CONTENIDO

1. Especificaciones	2
1.1. Definición del proyecto	2
1.1.1. Bases del proyecto	2
1.1.2. Marco del proyecto	2
1.1.3. Localización del proyecto.....	3
1.2. Características de los reactivos y productos	5
1.2.1. Reactivos	5
1.2.2. Productos	11
1.3. Descripción general del proceso de producción	13
1.3.1. Upstream.....	13
1.3.2. Downstream.....	16
1.4. Diagrama de bloques	18
1.5. Diagrama de flujo	19
1.6. Tabla informativa del proceso	22
1.6.1. Etapas, corrientes de entrada y salida y condiciones.....	22
1.7. Balance de materia.....	28
1.8. Definición de las áreas y construcción de la planta.....	29
1.8.1. Almacenaje de materias primas (A-100).....	29
1.8.2. Pretratamiento medio cultivo (A-200).....	30
1.8.3. Fermentación y separación del micelio (A-300)	30
1.8.4. Recuperación ácido cítrico y yeso por precipitación (A-400).....	30
1.8.5. Empaquetado y almacenaje (A-500)	31
1.8.6. Servicios (A-600)	31
1.8.7. Sala de control y laboratorios (A-700)	34
1.8.8. Oficinas y zona de trabajadores (A-800).....	35
1.8.9. Taller de mantenimiento (A-900)	35
1.8.10. Zona de tratamiento de residuos sólidos, líquidos y gaseosos (A-1000) ...	36
1.9. Apéndice.....	37
1.9.1. Apéndice 1	37
1.10. Bibliografía.....	39

1. ESPECIFICACIONES

1.1. Definición del proyecto

En este proyecto se estudiará el diseño conceptual, práctico y técnico de Citrox una planta de producción de ácido cítrico anhidro. Se recogen el objeto del trabajo, contextualización y su conjunto de condiciones que determinan el diseño e implantación.

En un primer lugar, se recogen las bases del proyecto, así como la descripción de este, el marco de trabajo y la funcionalidad y operación de la planta.

En segundo lugar, la descripción del proceso de producción, las características de los reactivos y productos tanto finales como intermedios, las etapas involucradas en la producción del producto final presentando el diagrama de flujo, de bloques y el balance de materia con su comprobación.

Por último, las especificaciones y necesidades de la planta, así como la construcción general y su funcionalidad. Con todo esto, se observará el funcionamiento y la viabilidad de una planta de estas características.

1.1.1. Bases del proyecto

El objetivo principal del proyecto es el diseño de una planta de producción para la obtención de 8,000 toneladas anuales de ácido cítrico anhidro a partir de la fermentación de melazas, con un enfoque en la seguridad de operación, sostenibilidad ambiental y eficiencia energética.

El producto final será presentado en sacos de 20 kg o *big bags* de 1,000 kg para su envío a granel.

Se han considerado condiciones de trabajo continuas durante 250 días al año operando en diferentes turnos, con 115 días destinados a paradas de mantenimiento y paradas programadas de planta.

1.1.2. Marco del proyecto

Para poder abordar el proyecto desde todos los ámbitos el diseño de la planta tiene que constar de los siguientes requisitos:

- Diseño de recepción de materias primas y carga de camiones con producto final.
- Diseño de los tanques auxiliares de almacenamiento de materias primas y almacén de producto final.
- Diseño del *upstream*; pretratamiento y acondicionamiento del medio de cultivo para crear el inóculo de fermentación. Diseño del proceso de fermentación y posterior separación del micelio con la materia orgánica restante del licor de fermentación.
- Diseño del *downstream*; recuperación del ácido cítrico en el licor de fermentación a través de la precipitación química con cal y ácido sulfúrico. Diseño de la cristalización y secado para el posterior empaque y almacenaje del producto final acabado.
- Diseño de los servicios auxiliares tales como sistemas de agua caliente, agua fría, vapor y aire.

- Diseño de la sala de control y laboratorios de calidad útiles para el correcto monitoreo y supervisión del proceso.
- Diseño de oficinas de personal autorizado y zona de trabajadores tales como vestuarios, comedor y zona de descanso.
- Diseño del taller de mantenimiento para asegurar siempre el correcto funcionamiento de los elementos de la planta
- Diseño de la zona de tratamiento de residuos sólidos, líquidos y gaseosos.

Estos límites establecidos garantizarán una visión global de los aspectos para tener en cuenta para poder poner en funcionamiento la planta.

1.1.3. Localización del proyecto

El diseño y desarrollo de la planta química se llevará a cabo en el polígono industrial ficticio “Satèl·lits” ubicado en la localidad de Lèrida.

El proyecto se tendrá que adaptar a la normativa urbanística del municipio en lo referente a las normas viales y vecinales, altura de edificios, ocupación de parcela y edificabilidad. Además, se tendrá que adaptar a la normativa sectorial de aplicación en lo referente a la seguridad, medio ambiente y protección contra incendios.

1.1.3.1. Parámetros de edificación, servicios disponibles y plano de la parcela

En la Tabla 1.1 se muestran los parámetros de edificación que ha de cumplir Citrox según la normativa urbanística.

Tabla 1.1 – Parámetros de edificación de la parcela

Edificabilidad	1.5 m ² techo/m ² suelo
Ocupación máxima de parcela	0.75
Ocupación mínima de parcela	20% de la superficie de ocupación máxima
Retranqueos	5 m a viales y vecinos
Altura máxima	16 m y 3 plantas excepto en producción justificando la necesidad por el proceso
Altura mínima	4 m y 1 planta
Aparcamientos	1 plaza/150 m ² construidos
Distancia entre edificios	1/3 del edificio más alto con un mínimo de 5 m

Por otro lado, en la Tabla 1.2 se muestran los servicios de la planta de Citrox los cuales son los disponibles de la red local.

Tabla 1.2 – Parámetros de los servicios disponibles

Energía eléctrica	Conexión desde la línea de 20 kV a pie de parcela, hay que prever una estación transformadora (espacio ya delimitado al plano)
Gas natural	Conexión a pie de parcela a media presión (1.5 kg/cm ²)
Agua de incendios	La máxima presión es de 4 kg/cm ² , hay que diseñar una estación de bombeo y reserva de agua
Agua de red	Acometida a pie de parcela a 4 kg/cm ² con un diámetro de 200 mm
Terreno	Resistencia del terreno de 2 kg/cm ² a 1.5 m de profundidad sobre gravas

En el **Capítulo 10. Planos** se muestran los planos del área superficial que dispone Citrox para la elaboración de la planta.

1.1.3.2. Accesibilidad a la planta

La comunicación a la planta es algo esencial. Una correcta comunicación de la planta con el exterior facilita la recepción de materias y la distribución del producto final. Es por ello, que conocer las vías de transporte más cercanas a la planta supone algo vital a la hora del diseño.

Las vías de transporte cercanas a la planta son:

- Comunicación por carretera.
- Comunicación marítima.
- Comunicación aérea.

Comunicación por carretera

Por Lérida pasan las principales autopistas y autovías españolas como la A-2 y la AP-2 las cuales ofrecen conectividad con gran parte de la península. Por rutas alternativas, la conectividad con el resto de los países de la Unión Europea está garantizada pasando por el Pirineo francés.

Comunicación marítima

Lérida tiene conectividad cercana con el puerto de Barcelona el cual da hacia el mar Mediterráneo. Este es un mar con una gran cantidad de rutas marítimas que conectan toda Europa con el resto del mundo. Entre las principales se encuentran la conexión Europa-América por el corredor Atlántico a través de la salida por el estrecho de Gibraltar y Europa-Asia por el corredor Índico-Mediterráneo por el canal de Suez.

Comunicación aérea

Lérida tiene aeropuerto cercano llamado “Aeroport Lleida-Alguaire” el cual tiene la opción de reservar espacio aéreo bajo demanda. Si este no estuviese disponible las siguientes opciones serían los aeropuertos de Andorra llamado “Aeroport de Andorra-La

Seu” o el de Barcelona llamado “Aeroport Josep Tarradellas”, el más grande de las opciones.

1.2. Características de los reactivos y productos

1.2.1. Reactivos

1.2.1.1. Melaza de remolacha

La melaza es un subproducto de la industria azucarera el cual se obtiene de las diferentes cristalizaciones que sufren los jugos de una planta azucarera. Es un líquido oscuro y denso compuesto principalmente por agua, sacarosa y en menor medida otros compuestos.

Gracias a los nutrientes que contiene la melaza de remolacha y su alto contenido de sacarosa (50%), el cultivo de microorganismos se ve favorecido y por tanto la reacción de fermentación se convierte en la mejor opción para producir ácido cítrico. [1]

Existen muchas variedades de melaza de remolacha en el mercado las cuales se diferencian por su composición típica en humedad, azúcares y metales traza que contengan. [1] [2] [3]

La Tabla 1.3 muestra la composición de una melaza de remolacha típica del mercado para su uso industrial la cual se usará también para la simulación del proceso.

Tabla 1.3 – Composición típica de la melaza de remolacha

Parámetro	%
Humedad	34.475
Cenizas	6.000
Glucosa	50.000
Azúcares no fermentables	5.000
Impurezas aniónicas	1.500
Impurezas catiónicas	3.000
Metales traza	
Hierro	0.020
Manganeso	0.005
Total	100.000

Esta es la melaza de remolacha que se usa para el diseño de la planta dejando para futuro la búsqueda de una melaza que se adapte mejor a los objetivos de la planta mediante proveedores autorizados.

1.2.1.2. *Aspergillus niger* H915-1

Aspergillus niger es un hongo filamentoso el cual tiene la capacidad de generar grandes cantidades de ácido cítrico a partir de materia prima barata como la melaza de remolacha rica en azúcares como la sacarosa [1].

Se utilizará para el proceso de fermentación ya que es el microorganismo más estudiado y el cual da una mayor productividad para el proceso de producción de ácido cítrico. Este hongo alcanza grandes rendimientos y menos subproductos indeseables en la producción de ácido cítrico a comparación de otros microorganismos como bacterias o levaduras [4].

Para el diseño de este proyecto se utiliza una cepa de uso industrial *A. niger* H915-1, la cual es proporcionada por la empresa Jiangsu Guoxin Union Energy Co, (Yixing, Jiangsu Province, China) ya que aporta rendimiento mínimo alto ($Y_{P/S} = \frac{157}{160} \approx 0.98$ g ácido cítrico por gramo de azúcar) todo y que la simulación del proceso arroja un rendimiento algo inferior [5] [6].

Existen diversas cepas de *Aspergillus niger* las cuales se pueden modificar genéticamente para obtener mejoras en los rendimientos bajo condiciones específicas de nutrientes y medios de cultivo. Se deja al personal de I+D referido en el **Capítulo 9. Operación de la planta** la futura búsqueda o modificación, a través de biotecnología, de una cepa que se ajuste mejor a los objetivos de Citrox.

1.2.1.3. Nutrientes

A pesar de que la melaza de remolacha es rica en nutrientes, se tendrá que añadir un aporte de estos para que durante la fermentación estos no sean un limitante del crecimiento del hongo. Los nutrientes compondrán una mezcla de potasio, sodio, magnesio, cobre, zinc y hierro. [3] Sus concentraciones se ajustan a futuro según los datos que aporten los muestreos del crecimiento microbiano.

1.2.1.4. Ferrocianuro potásico trihidratado ($K_4[Fe(CN_6)] \cdot 3H_2O$)

El ferrocianuro potásico trihidratado ($K_4[Fe(CN_6)] \cdot 3H_2O$), [7] es una sal inorgánica de coordinación, formada por la interacción iónica entre cuatro iones potasio y el ion hexacianoferrato (II).

A temperatura ambiente se presenta como un sólido cristalino de color amarillo claro y sin olor perceptible. Está catalogado como una sustancia peligrosa para el medioambiente, pero no presenta toxicidad ni corrosividad. Este compuesto será utilizado por su capacidad de formar complejos insolubles que permiten precipitar y eliminar impurezas metálicas presentes en la melaza las cuales dificultan la fermentación.

En la Tabla 1.4 se muestran propiedades químicas básicas del compuesto:

Tabla 1.4 - Propiedades químicas del ferrocianuro potásico trihidratado

Fórmula	$K_4[Fe(CN_6)] \cdot 3H_2O$
Peso molecular (g/mol)	442.40
Punto fusión (°C)	70
pH	9.5 (en solución acuosa: 100g/l, 25°C)
Densidad (g/cm ³)	1.85 (a 20°C)
Pictogramas de peligrosidad	No tiene

1.2.1.5. Ácido clorhídrico 7% (HCl)

El ácido clorhídrico (HCl), es la solución acuosa altamente corrosiva del gas cloruro de hidrógeno. Se clasifica como un ácido fuerte inorgánico que se disocia completamente en disolución [8]. Para la planta se ha decidido almacenar el ácido clorhídrico al 37% [9] y luego diluirla en planta debido al gran volumen requerido por batch, lo que hace que almacenarlo diluido sea inviable.

A temperatura ambiente, se presenta en estado líquido, es fumante y emite vapores corrosivos con un olor picante, siendo típicamente incoloro o con un ligero tinte amarillo debido a impurezas. En el proceso de desmineralización para la purificación de la melaza, se utiliza como el agente regenerante de la resina catiónica, restaurando su capacidad de intercambio iónico mediante el desplazamiento de cationes.

En la Tabla 1.5 se muestran propiedades químicas básicas del compuesto:

Tabla 1.5 - Propiedades químicas del ácido clorhídrico 7%

Fórmula	HCl (7%)
Peso molecular (g/mol)	36.46
Punto fusión (°C)	100
pH	<1 (a 20°C)
Densidad (g/cm ³)	1.1 (a 20°C)
Pictogramas de peligrosidad	

En la Tabla 1.6 se muestran propiedades químicas del compuesto al 37%:

Tabla 1.6 - Propiedades químicas del ácido clorhídrico 37%

Fórmula	HCl (37%)
Peso molecular (g/mol)	36.45
Punto fusión (°C)	-30
pH	<1 (a 20°C)
Densidad (g/cm ³)	1.19 (a 20°C)
Pictogramas de peligrosidad	

1.2.1.6. Sosa cáustica 4% (NaOH)

El hidróxido de sodio, comúnmente conocido como sosa cáustica (NaOH), es un sólido blanco que se emplea industrialmente en disolución acuosa concentrada por su fácil manejo. Es altamente soluble en agua y su reacción es exotérmica. Químicamente, es un compuesto corrosivo que reacciona con metales y tejidos. Además, es higroscópico y reacciona con el dióxido de carbono del aire [10]. Para la planta se ha decidido almacenar

la sosa cáustica al 50% [11] y luego diluirla en planta debido al gran volumen requerido por batch.

Se utiliza para regenerar la resina aniónica débil de la columna de intercambio iónico para desmetalización en la purificación de la melaza.

En la Tabla 1.7 se muestran propiedades químicas básicas del compuesto al 4%:

Tabla 1.7 - Propiedades químicas de la sosa cáustica 4%

Fórmula	NaOH (4%)
Peso molecular (g/mol)	40.00
Punto fusión (°C)	100
pH	>13 (a 20°C)
Densidad (g/cm ³)	1.04 (a 20°C)
Pictogramas de peligrosidad	

En la Tabla 1.8 se muestran propiedades químicas básicas del compuesto al 50%:

Tabla 1.8 - Propiedades químicas de la sosa cáustica 50%

Fórmula	NaOH (50%)
Peso molecular (g/mol)	40.00
Punto fusión (°C)	10
pH	14
Densidad (g/cm ³)	1.53 (a 20°C)
Pictogramas de peligrosidad	

1.2.1.7. Ácido sulfúrico 10% (H₂SO₄)

El ácido sulfúrico es un compuesto químico extremadamente corrosivo con una apariencia líquida aceitosa incoloro e inodoro en condiciones normales [12].

Se utiliza en el proceso de recuperación del ácido cítrico después de la fermentación. Este, reacciona con el citrato cálcico para dar el ácido cítrico y el yeso. Para la planta se ha decidido almacenar el ácido sulfúrico al 98% [13] y luego diluirlo en planta debido al gran volumen requerido por batch.

En la Tabla 1.9 se muestran propiedades químicas básicas del compuesto al 10%:

Tabla 1.9 – Propiedades químicas del ácido sulfúrico 10%

Fórmula	H ₂ SO ₄ (10%)
Peso molecular (g/mol)	98.08
Punto fusión (°C)	100
pH	<3 (a 20°C)
Densidad (g/cm ³)	1.06 (a 20°C)
Pictogramas de peligrosidad	

En la Tabla 1.10 se muestran las propiedades químicas básicas del compuesto al 98%:

Tabla 1.10 – Propiedades químicas del ácido sulfúrico 98%

Fórmula	H ₂ SO ₄ (98%)
Peso molecular (g/mol)	98.08
Punto fusión (°C)	-20
pH	<0.3 (a 25°C)
Densidad (g/cm ³)	1.84 (a 20°C)
Pictogramas de peligrosidad	

1.2.1.8. Cal 33% (Ca(OH)₂)

La cal es un material químico y natural que se obtiene a partir de la piedra caliza, una roca rica en carbonato de calcio (CaCO₃). La cal existe en diferentes formas. La cal hidratada (33%) se utiliza industrialmente para reacciones de precipitación [14].

Se utiliza en Citrox para precipitar el citrato disuelto después de la fermentación. Este, reacciona con la cal formando citrato cálcico que precipita atrapando el citrato para después ser tratado y convertido en ácido cítrico.

En la Tabla 1.11 se muestran propiedades químicas básicas del compuesto:

Tabla 1.11 – Propiedades químicas de la cal 33%

Fórmula	Ca(OH) ₂ (33%)
Peso molecular (g/mol)	74.09
Punto fusión (°C)	100
pH	12.45 (a 20°C)
Densidad (g/cm ³)	2.20 (a 20°C)

Pictogramas de peligrosidad



1.2.1.9. Resina aniónica de base débil (AmberLite™ FPA66 UPS)

La resina AmberLite™ FPA66 UPS [15] es una resina de intercambio aniónico de base fuerte, macroporosa, de tamaño de partícula uniforme, para su uso en la desmineralización de jarabes de baja conductividad. La matriz macroporosa proporciona una excelente resistencia mecánica y una alta capacidad de operación.

Con la ayuda de esta resina se pueden reducir significativamente las composiciones de los aniones presentes en la melaza. La regeneración se lleva a cabo mediante solución de NaOH 4%

En la Tabla 1.12 se muestran propiedades químicas básicas del compuesto:

Tabla 1.12 - Propiedades químicas de la resina AmberLite™ FPA66 UPS

Tamaño de partícula promedio (µm)	550±50
Capacidad total de intercambio	>1.6 eq/L
Densidad de partícula (g/mL)	1.04
Temperatura máxima de operación (°C)	60
Rango de pH	0-7

1.2.1.10. Resina catiónica de base fuerte (AmberLite™ FPC88 H)

La resina AmberLite™ FPC88 H [16] es una resina catiónica de base fuerte. Esta, es selectiva a cationes indeseados presentes en la composición de la melaza. Es específica para siropes y melazas de grado alimentario, ideal para el caso.

Con la ayuda de esta resina se pueden reducir significativamente las composiciones de los cationes bivalentes de la melaza. La regeneración se lleva a cabo mediante solución de HCl al 7%.

En la Tabla 1.13 se muestran propiedades químicas básicas del compuesto:

Tabla 1.13 - Propiedades químicas de la resina AmberLite™ FPC88 H

Tamaño de partícula promedio (µm)	300 - 1200
Capacidad total de intercambio	>1.7 eq/L
Densidad de partícula (g/mL)	1.20
Temperatura máxima de operación (°C)	92
Rango de pH	0-14

1.2.1.11. Carbon activado (SGL 8x30)

El carbón activado SGL 8x30 es un carbón activado granular diseñado para decolorar soluciones orgánicas y purificarlas. Está diseñado para entregar unas características de adsorción óptimas y poca resistencia a líquidos con altas viscosidades. [17] [18]

En la Tabla 1.14 se muestran propiedades químicas básicas del compuesto:

Tabla 1.14 – Propiedades químicas del carbón activado SGL 8x30

Tamaño de partícula promedio (mm)	1.5 - 1.7
Rango de pH	7.0 - 8.5
Temperatura (°C)	60 - 85
Granulometría	8x30

1.2.2. Productos

1.2.2.1. Yeso

El yeso es el subproducto de la planta de Citrox. Es un mineral compuesto principalmente por sulfato de calcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Tiene un aspecto sólido de color blanco y de grano fino. Se utiliza para diferentes aplicaciones como la construcción, la ortopedia o la decoración.

En este caso se obtiene como producto de la reacción de acidificación del citrato cálcico con el ácido sulfúrico que da lugar al ácido cítrico puro y al sulfato cálcico, este yeso.

En la Tabla 1.15 se muestran propiedades químicas básicas del compuesto:

Tabla 1.15 – Propiedades químicas del yeso

Fórmula química	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Masa molar (g/mol)	172.17
pH	6.0 – 7.0 (prácticamente neutro)
Densidad (g/cm ³)	2.3 – 2.4
Solubilidad en agua (20 °C)	2.0–2.5 g/L (baja solubilidad)

1.2.2.2. Ácido cítrico

El ácido cítrico es el producto objetivo de la planta de Citrox. Es un ácido orgánico tricarboxílico, presente principalmente en frutas cítricas, con múltiples aplicaciones en la industria alimentaria y farmacéutica. Se presenta generalmente como un polvo cristalino blanco o incoloro. Puede existir de forma anhidra (sin agua, como es el caso) o monohidrato (con una molécula de agua por cada molécula de ácido cítrico). Es altamente soluble en agua y en soluciones alcohólicas. Además, puede actuar como ácido débil ya que puede liberar protones.

Tiene diversos usos y aplicaciones en diferentes campos: el alimentario (usado como saborizante o acidificante), el farmacéutico (usado en la formulación de medicamentos y suplementos) y en la limpieza (usado en productos como detergentes).

En cuanto a la seguridad, puede causar irritación en la piel y ojos. Por ello, se recomienda el uso de guantes y gafas durante su manipulación. Además, debe almacenarse en un lugar fresco y seco, en envases cerrados herméticamente a temperaturas de entre 15°C y 25°C. [19]

En la Tabla 1.16 se muestran características básicas del compuesto

Tabla 1.16 – Propiedades químicas del ácido cítrico

Fórmula	C ₆ H ₈ O ₇
Peso molecular (g/mol)	192.1
Punto fusión (°C)	153
pH	1.6 - 1.8 (100 g/L a 20°C)
Densidad (g/cm ³)	1.67 (a 20°C)
Pictogramas de peligrosidad	

1.3. Descripción general del proceso de producción

El proceso en su conjunto se puede dividir en dos secciones:

- *Upstream*: Entrada y pretratamiento de la melaza, pre-fermentación e inoculación y por último la fermentación.
- *Downstream*: Recuperación del ácido cítrico por precipitación química, cristalización, secado y empaçado de producto final.

A continuación, se detallan ambas secciones con sus respectivas etapas.

1.3.1. *Upstream*

El upstream, o purificación del ácido cítrico, se lleva a cabo en una operación combinada en continuo y en discontinuo. Las primeras operaciones de dilución y precipitación se llevan a cabo en discontinuo mientras que las etapas de filtración, adsorción con carbón activado e intercambio iónico se llevan a cabo en continuo. Por otro lado, la fermentación opera en discontinuo. Para asegurar la continuidad del proceso, se trabaja con siete fermentadores distintos desfasados 23.3 h que permiten la obtención de producto final en continuo. El proceso se encuentra detallado en el **Capítulo 8. Puesta en marcha**.

1.3.1.1. *Almacenamiento*

En los tanques de almacenamiento se recepciona la melaza y se mantiene a 35°C para evitar el apelmazamiento y mejorar su manejo por las tuberías de la planta. Al salir del almacenamiento, se calienta a 50°C y se dirige a la siguiente etapa.

1.3.1.2. *Pretratamiento de la melaza*

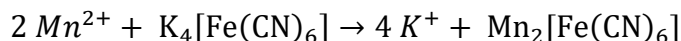
La melaza proveniente del almacenamiento de materias primas se diluye con agua desionizada a 50°C en un tanque de dilución para disminuir su contenido de azúcares de un 50% a un 20%, ideal para servir de medio de cultivo en la fermentación y dar en la simulación del proceso con SuperPro®Designer un alto rendimiento de ácido cítrico.

$$Y_{P/S} = \frac{170.01}{216.34} \approx 0.79 \text{ gramos de ácido cítrico por gramo de glucosa [5] [6].}$$

Para que se consiga este alto rendimiento, la melaza necesita estar lo más limpia posible; las siguientes etapas se encargan de ello.

1.3.1.3. *Precipitación*

Uno de los metales traza presentes en la melaza que mayores problemas presenta en la fermentación es el manganeso (Mn^{2+}). En esta etapa, se reducen estos metales a partir de una precipitación metálica siguiendo la reacción:



La melaza diluida se calienta a 90°C en un intercambiador de calor y entra en el reactor de precipitación donde se le adiciona el ferrocianuro potásico ($K_4[Fe(CN)_6]$) manteniendo un nivel de pH 4.5 durante 15 min. Una vez acabado el tiempo, el manganeso indeseado precipita reduciendo así su concentración. No obstante, sigue sin ser suficiente esta reducción y etapas posteriores de intercambio iónico se encargan de conseguirlo. [20]

Se extraen los precipitados utilizando un filtro de placas y marcos.

1.3.1.4. Decoloración (GAC)

Una vez la melaza ha reducido su concentración de azúcares y manganeso se pasa por columnas de decoloración con carbón activado para reducir el color y compuestos orgánicos que pueden afectar a la fermentación [21].

La regeneración del carbón activado se hace primero por lavado químico (con HCl 5%) [22], seguido de un enjuagado con agua para volver a un pH neutro y, finalmente, la reactivación térmica (en un horno pirolítico entre 600-900°C) [23], [24]. Al cabo de 4-6 regeneraciones el carbón activado debe ser sustituido, ya que va perdiendo efectividad en cada ciclo.

1.3.1.5. Intercambio iónico

Esta última etapa de la purificación se encarga de hacer un último barrido de metales y disminuir aún más su concentración evitando así problemas de inhibición en la fermentación.

Se utilizan dos columnas de intercambio iónico [25]. Una contiene una resina catiónica fuerte o quelante, que retiene cationes metálicos como el manganeso (Mn^{2+}), el hierro (Fe^{3+}) y el potasio (K^{+}), entre otros. El manganeso debe mantenerse por debajo de 5 ppb [4], ya que es el metal que más problemas de inhibición en el desarrollo de los microorganismos causa. Este metal hace que la digestión del hongo se vea afectada y se detenga haciendo que la producción de producto final se vea inhibida.

La segunda columna es aniónica y retiene aniones no deseados como sulfatos, cloruros o fosfatos. Estos, no son tan críticos en el desarrollo de los microorganismos, pero igualmente se necesita disminuir sus concentraciones para que se dé el rendimiento mencionado anteriormente.

Ambas columnas utilizan las resinas mencionadas en los apartados anteriores, donde se explica la información de los reactivos del proceso.

1.3.1.6. Esterilización

En este punto del proceso, la melaza diluida para el medio de fermentación ya está tratada y va a parar a un pasteurizador en el cual se aumenta la temperatura de esta a unos 140°C durante 480 minutos [3] con el fin de esterilizarla antes de entrar en el fermentador.

Una parte de esta melaza tratada va directamente a la fermentación para formar el medio de cultivo. La otra parte se diluye con agua esterilizada para disminuir su concentración de azúcares al 10% [3] y se lleva a un tanque pre-fermentador donde se prepara el inóculo de fermentación el cual se añade al medio de cultivo posteriormente para así iniciar la fermentación.

1.3.1.7. Nutrientes

La fermentación necesita nutrientes y fuente de nitrógeno para que el hongo pueda trabajar y dar la mayor productividad. Por ello, se inyectan a la fermentación los nutrientes mencionados en el apartado de reactivos y la fuente de nitrógeno. Esta fuente de nitrógeno entra con una relación C/N de 0.08% en peso [6].

1.3.1.8. Inóculo

El volumen de inóculo ha de representar el 10% del volumen de trabajo del fermentador donde se va a inocular [3].

Este volumen de inóculo ha de contener entre 5.5 y 25 millones de esporas por litro para poder inocular el fermentador y se mantiene a un pH de 4.5 con agitación y temperatura de 35°C hasta que se consuma el azúcar disponible [3].

En esta etapa se deja cultivar la cepa de *A. niger* H915-1 durante 24 horas [5] hasta alcanzar los valores óptimos de esporas para poder inocular el fermentador. El inóculo se prepara antes de cada *batch* para así aprovechar el tiempo de las fermentaciones al máximo.

1.3.1.9. Fermentación

A esta etapa llegan dos corrientes principales:

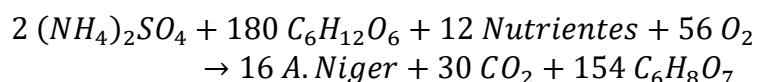
- Melaza tratada del *upstream* con azúcares al 20% y nitrógeno total al 0.08%.
- Inóculo del pre-fermentador con azúcares al 10% y nitrógeno total al 0.2%.

Estas dos corrientes se mezclan dentro del fermentador principal con condiciones de agitación, control de temperatura a 35°C estables, pH inicial de 4.5 ± 0.2 , control al final de la fermentación con un pH 2.5 ± 0.2 (justo el momento donde el pH inhibe el crecimiento del hongo) y aireación de 0.3 volúmenes de aire por volumen de solución y por minuto (vvm) [5] [6].

Se usará la tecnología de fermentación sumergida en tanque agitado y aireado ya que industrialmente es la más utilizada debido a su buen funcionamiento, el aumento en el rendimiento y menos riesgo de contaminación. La aireación ayuda a la agitación ya que remueve el medio y además dota al hongo del oxígeno necesario para llevar a cabo la digestión y expulsar el ácido cítrico. [4]

En esta etapa, existe el riesgo de un espumado excesivo debido al metabolismo del hongo que tiene que ser controlado por agentes químicos antiespumantes [4]. Para ello, se usa polioxipropilenglicol (PPG 2000 – 4000) ya que es compatible con el proceso, con el hongo y además tiene baja persistencia. Se dosifica a 5 – 10 ppm iniciales y se monitoriza con una sonda de espuma por si hiciese falta más antiespumante [26].

Pasadas 120 horas se obtiene una productividad de 1700 g de citrato por litro de caldo de fermentación. Este caldo de fermentación aún no contiene el ácido cítrico, sino que contiene el ion disuelto de este mismo, el citrato ($C_6H_5O_7^{3-}$), el cual se tiene que tratar para conseguir el producto deseado. La reacción [6] en el fermentador sigue la siguiente expresión:



Con una entalpía de reacción de -2990 kcal/kg [6].

1.3.2. Downstream

El downstream, o recuperación del ácido cítrico, se lleva a cabo en continuo sin pausas garantizando cada día la salida de producto final listo para entregar a cliente.

1.3.2.1. Separación del micelio

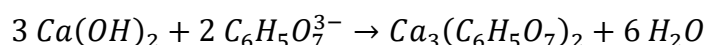
El caldo de fermentación proveniente de la fermentación contendrá un alto porcentaje de biomasa (*A. niger* y sólidos finos generados durante la fermentación) que se tendrán que separar antes de continuar con la purificación del caldo.

Esto se hace mediante un filtro rotatorio al vacío con un medio filtrante sintético de propileno de un tamaño de poro entre 10 – 20 μm con un porcentaje de líquido retenido sobre sólidos secos (LOD) del 30% [6]. El efluente de biomasa podrá ser valorizado como fuente de biocombustible [4].

A su vez, el caldo clarificado llega de la fermentación a un $\text{pH } 2.5 \pm 0.2$. Se tiene que ajustar el pH a valores de 1.5 - 2.0 con ácido diluido ya que no ha de superar el valor de la primera constante de disociación ácida (pK_{a1}) el cual es de 3.1 aproximadamente y a su vez controlar la temperatura en valores de 25-35°C [27].

1.3.2.2. Precipitación

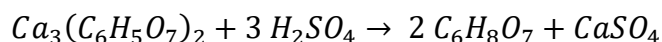
En esta etapa se utiliza cal lechada al 33% ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) para precipitar el citrato que sale de la fermentación como citrato cálcico siguiendo la reacción [6]:



Esto hace que la cal lechada y el citrato formen citrato cálcico el cual es filtrado a posterior con un filtro rotatorio al vacío como el anteriormente mencionado. En esta filtración se desecha el efluente acuoso y el citrato cálcico pasa a la etapa de acidificación.

1.3.2.3. Acidificación

En esta etapa el citrato cálcico reacciona con el ácido sulfúrico al 10% para formar yeso y ácido cítrico, el cual pasa por cristalización y secado para obtener el producto final, ácido cítrico anhidro. A continuación, se muestra la reacción [6] que tiene lugar,



Esto hace que se forme el ácido cítrico y el yeso el cual es filtrado a posterior para su purificación. Con un filtro rotatorio al vacío como el anterior mencionado, se filtra el yeso y el ácido cítrico pasa a la etapa de cristalización y evaporación.

Esta tecnología hace que se forme la misma cantidad de yeso que de producto final. El yeso filtrado se trata para eliminar el ácido traza que pueda tener y la humedad obteniendo así un subproducto de calidad [4].

1.3.2.4. Evaporación y cristalización

Seguidamente, se concentra el caldo purificado de ácido cítrico mediante evaporación controlada del agua hasta alcanzar la sobresaturación necesaria para inducir la cristalización del ácido cítrico monohidratado, forma intermedia estable que posteriormente se deshidrata a ácido cítrico anhidro durante el secado final.

La evaporación se realiza normalmente bajo presión reducida para evitar degradación térmica del ácido a temperatura de 60 °C [4].

Seguidamente el caldo concentrado se enfría de forma gradual desde una temperatura de 60°C a una de 15°C y presión baja típica de 0.1 – 0.5 atm para evitar degradación, promoviendo la cristalización del monohidratado [28]. Con un filtro rotatorio al vacío como el anterior mencionado, se filtra el residuo acuoso con metales traza y restos de componentes no cristalizables permitiendo que el ácido cítrico monohidratado pase a la etapa de secado para la obtención del ácido cítrico anhidro.

1.3.2.5. Secado

Por último, se seca el ácido cítrico monohidratado en un secador de tambor rotatorio a temperaturas de 60 – 80°C para disminuir la humedad por debajo del 1% y así obtener el producto final listo para empacar [4].

1.3.2.6. Empacado y almacenaje

Después de la etapa de secado, el ácido cítrico pasa a una empacadora donde el producto se introduce en sacos de 1000 kg, se sellan y se almacenan en un lugar seco hasta que llegue el momento de entregarlos al cliente.

A su vez, se empaca el yeso purificado en una empacadora donde el producto se introduce en sacos de 1000 kg, se sellan y se almacenan en un lugar seco hasta que llegue el momento de entregarlos al cliente.

1.4. Diagrama de bloques

El diagrama de bloques muestra una idea general del proceso. Se muestra en la Figura 1.1:

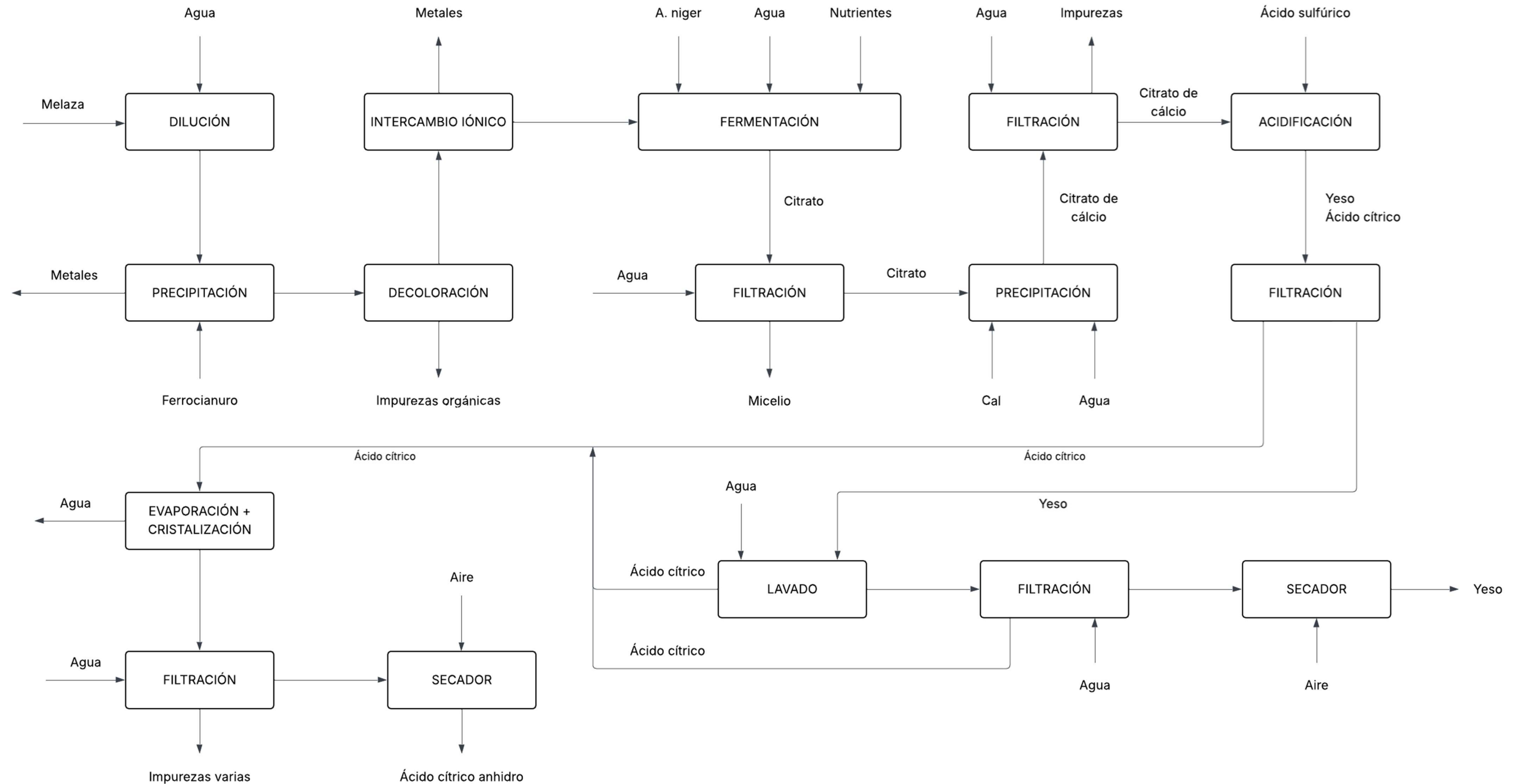
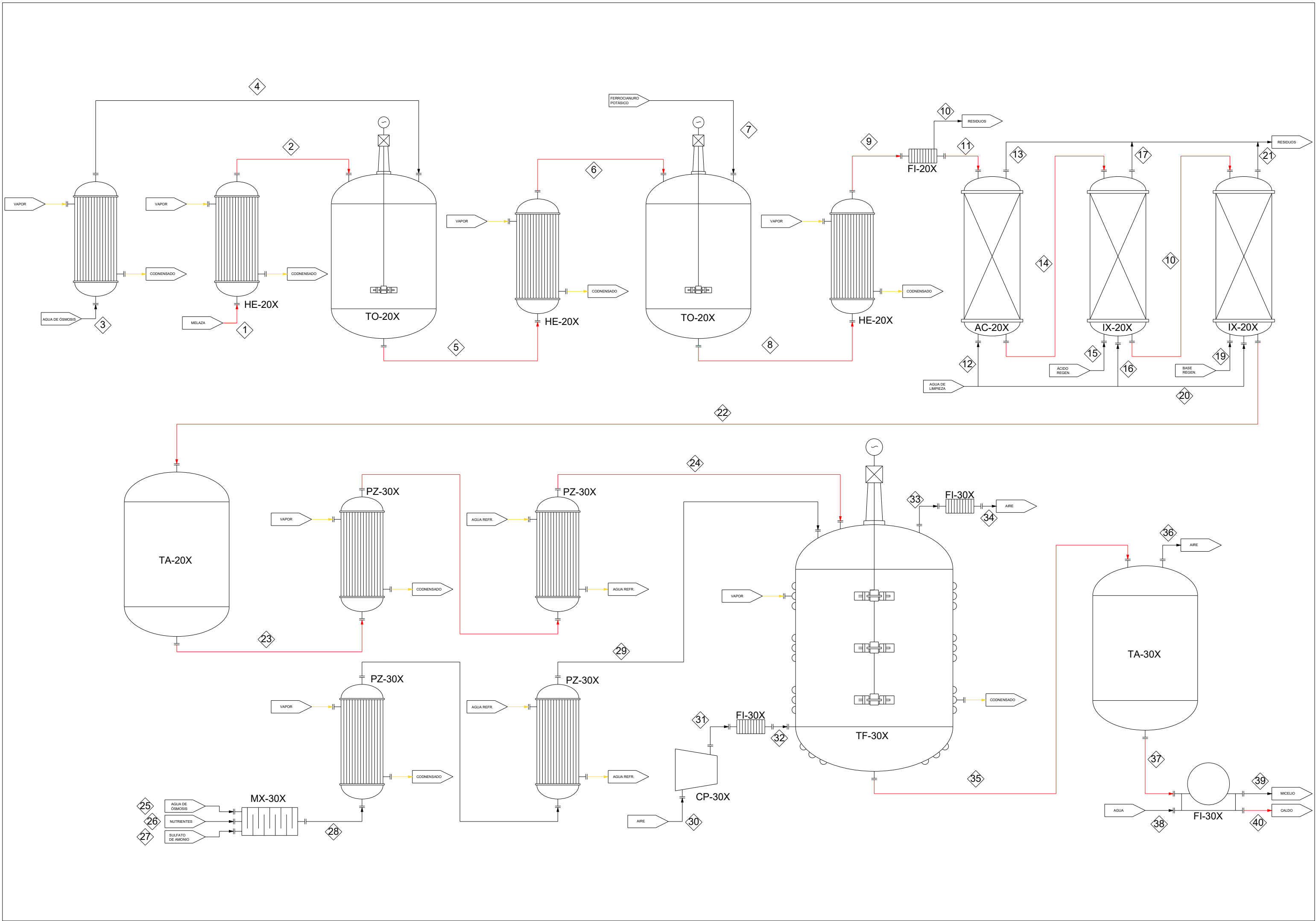
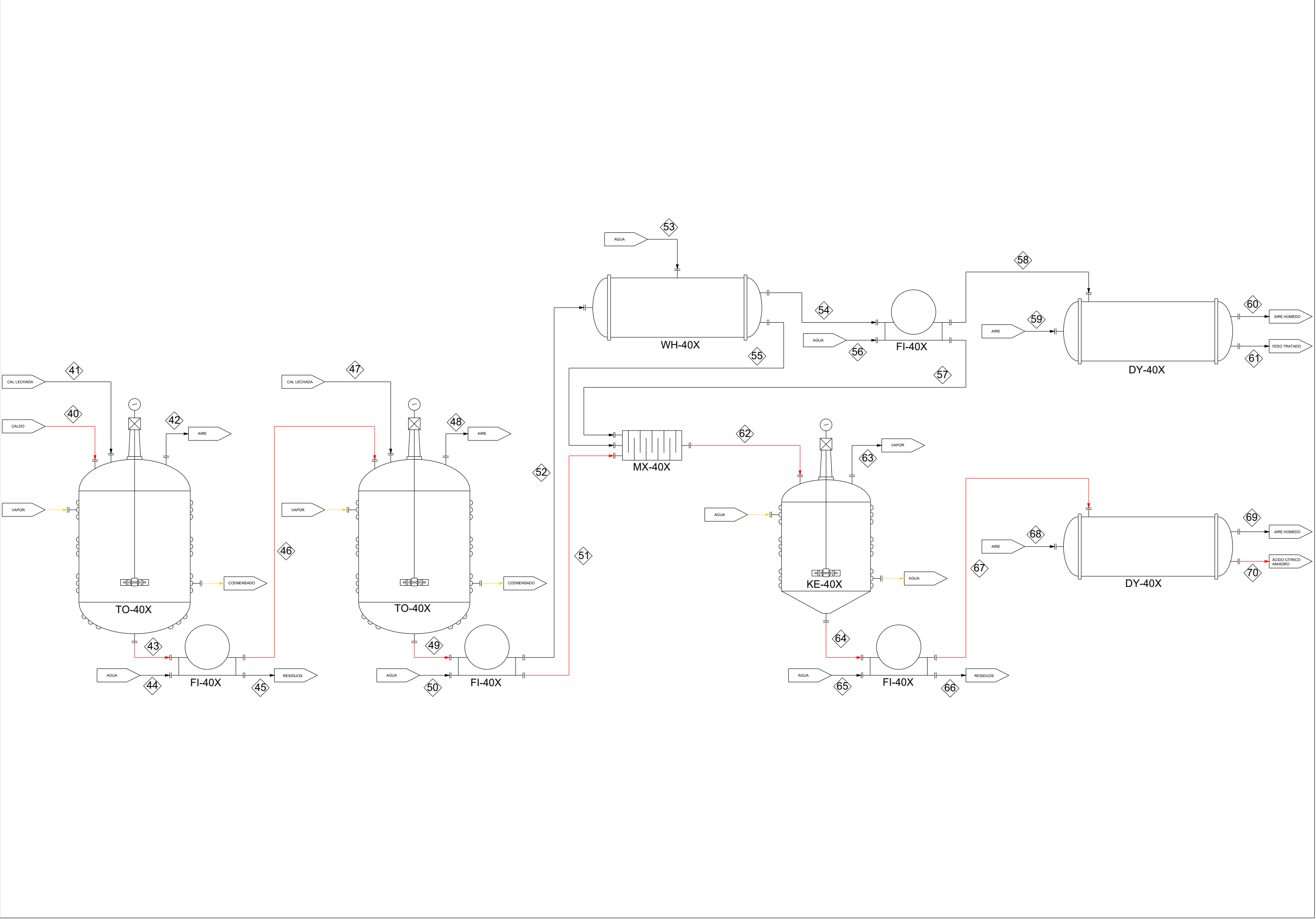


Figura 1.1 – Diagrama de bloques de Citrox

1.5. Diagrama de flujo

A diferencia del diagrama de bloques anterior, el diagrama de flujo muestra una idea detallada del proceso. En las siguientes dos páginas se muestran estos diagramas. Con ellos se puede simular el proceso mediante programas preparados para esta clase de simulaciones como es el caso de SuperPro®Designer, utilizado para este trabajo. [29]







1.6. Tabla informativa del proceso

1.6.1. Etapas, corrientes de entrada y salida y condiciones

A continuación, se muestran las Tabla 1.17, Tabla 1.18, Tabla 1.19, Tabla 1.20, Tabla 1.21 y Tabla 1.22 las cuales se obtienen de la simulación del proceso mediante el simulador SuperPro®Designer.

Tabla 1.17 – Tabla de caudales del proceso en la planta Citrox

Time Ref: Batch		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Total Mass Flow	MT	83.00	83.00	124.23	124.23	207.23	207.23	0.02	207.25	207.25	7.21	200.05	35.73	40.17
Temperature	°C	35.00	50.00	25.00	50.00	50.00	90.00	25.00	90.00	30.00	30.00	30.00	25.00	25.60
Pressure	bar	1.01	1.01	1.01	1.01	1.10	1.10	1.01	1.23	1.23	3.90	1.01	1.01	1.01
Total Enthalpy	kW-h	2493.76	3559.16	3625.37	7230.18	10787.46	19417.64	0.05	19412.71	6485.60	243.19	6242.40	1042.66	1197.82
Heat Capacity	kcal/kg-°C	0.737	0.737	1.000	0.999	0.894	0.899	0.087	0.899	0.894	0.964	0.892	1.000	1.000
Total Contents	mass %	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
Anionic Impurities		1.500	1.500	0.000	0.000	0.601	0.601	0.000	0.601	0.601	0.189	0.616	0.000	0.920
Ashes		6.000	6.000	0.000	0.000	2.403	2.403	0.000	2.403	2.403	69.116	0.000	0.000	0.000
Cationic Impurities		3.000	3.000	0.000	0.000	1.202	1.202	0.000	1.201	1.201	0.377	1.231	0.000	2.453
Fe		0.020	0.020	0.000	0.000	0.008	0.008	0.000	0.008	0.008	0.003	0.008	0.000	0.016
Glucose		50.000	50.000	0.000	0.000	20.026	20.026	0.000	20.024	20.024	6.285	20.519	0.000	0.000
K		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.003	0.001	0.003	0.000	0.000
Manganese Ferri		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007	0.007	0.195	0.000	0.000	0.000
Mn		0.005	0.005	0.000	0.000	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
NFS		5.000	5.000	0.000	0.000	2.003	2.003	0.000	2.002	2.002	0.629	2.052	0.000	7.664
Potassium ferri		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	100.000	0.002	0.002	0.059	0.000	0.000	0.000
Water		34.475	34.475	100.000	100.000	73.756	73.756	0.000	73.749	73.749	23.148	75.572	100.000	88.948



Planta de producción de ácido cítrico
Capítulo 1. Especificaciones

Tabla 1.18 – Tabla de caudales del proceso en la planta Citrox

Time Ref: Batch		14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Total Mass Flow	MT	195.61	107.17	48.54	156.46	194.86	98.69	44.62	143.95	194.21	194.21	194.21	11.96	0.47
Temperature	°C	30.00	25.00	25.00	25.00	30.00	25.00	25.00	25.00	30.00	30.00	35.00	25.00	25.00
Pressure	bar	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.03	1.03	1.01	1.01
Total Enthalpy	kW-h	6087.24	1507.18	2833.18	4366.28	6061.32	2824.46	1302.12	4149.20	6038.69	6038.35	7040.98	349.12	4.60
Heat Capacity	kcal/kg-°C	0.889	0.964	1.000	0.988	0.889	0.981	1.000	0.987	0.889	0.889	0.888	1.000	0.340
Total Contents	mass %	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
Amm. Sulfate		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	100.000
Anionic Impurities		0.441	0.000	0.000	0.000	0.442	0.000	0.000	0.449	0.111	0.111	0.111	0.000	0.000
Cationic Impurities		0.755	0.000	0.000	0.488	0.379	0.000	0.000	0.000	0.380	0.380	0.380	0.000	0.000
Fe		0.005	0.000	0.000	0.005	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000
Glucose		20.984	0.000	0.000	0.000	21.065	0.000	0.000	0.000	21.135	21.135	21.135	0.000	0.000
HCl(aq)		0.000	7.000	0.000	4.795	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
K		0.003	0.000	0.000	0.001	0.002	0.000	0.000	0.000	0.002	0.002	0.002	0.000	0.000
NaOH		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	4.000	0.000	2.742	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
NFS		0.525	0.000	0.000	0.000	0.527	0.000	0.000	0.000	0.528	0.528	0.528	0.000	0.000
Water		77.287	93.000	100.000	94.727	77.584	96.000	100.000	96.809	77.842	77.842	77.842	100.000	0.000



Planta de producción de ácido cítrico
Capítulo 1. Especificaciones

Tabla 1.19 – Tabla de caudales del proceso en la planta Citrox

Time Ref: Batch		27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37
Total Mass Flow	MT	3.11	15.54	15.54	562.99	562.99	562.99	557.50	557.50	215.62	0.00	215.62
Temperature	°C	25.00	25.00	35.00	25.00	40.00	40.00	20.00	20.00	35.00	25.00	35.00
Pressure	bar	1.01	1.01	1.01	1.01	3.01	3.01	1.01	1.01	0.10	1.01	1.01
Total Enthalpy	kW-h	8.12	361.84	505.87	3958.39	6334.95	6334.95	3135.60	3135.60	7808.80	0.00	7808.80
Heat Capacity	kcal/kg-°C	0.090	0.799	0.797	0.242	0.242	0.242	0.242	0.242	0.887	0.000	0.887
Total Contents	mass %	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	0.000	100.000
A. Niger		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.675	0.000	1.675
Amm. Sulfate		0.000	3.000	3.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007	0.000	0.007
Anionic Impurities		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.100	0.000	0.100
Carb. Dioxide		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.215	1.215	0.000	0.000	0.000
Cationic Impurities		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.343	0.000	0.343
Citric Acid		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	16.124	0.000	16.124
Fe		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001
Glucose		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.190	0.000	0.190
K		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.002
N2		0.000	0.000	0.000	76.712	76.712	76.712	77.525	77.525	0.000	0.000	0.000
NFS		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.476	0.000	0.476
Nutrients		100.000	20.000	20.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.185	0.000	0.185
O2		0.000	0.000	0.000	23.288	23.288	23.288	21.260	21.260	0.000	0.000	0.000
Water		0.000	77.000	77.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	80.897	0.000	80.897



Planta de producción de ácido cítrico
Capítulo 1. Especificaciones

Tabla 1.20 – Tabla de caudales del proceso en la planta Citrox

Time Ref: Batch		38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Total Mass Flow	MT	2.93	5.07	213.48	63.67	0.00	277.15	28.38	242.59	62.94	268.61	0.00	331.52	29.47
Temperature	°C	25.00	29.70	34.90	25.00	25.00	50.00	25.00	49.00	31.40	25.00	25.00	35.00	25.00
Pressure	bar	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
Total Enthalpy	kW-h	85.48	95.29	7799.07	1418.81	0.00	13826.60	828.26	13718.59	936.27	7319.24	0.00	11338.07	859.99
Heat Capacity	kcal/kg-°C	1.000	0.543	0.897	0.764	0.000	0.856	1.000	0.990	0.406	0.934	0.000	0.838	1.000
Total Contents	mass %	100.000	100.000	100.000	100.000	0.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	0.000	100.000	100.000
A. Niger		0.000	71.211	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Amm. Sulfate		0.000	0.000	0.007	0.000	0.000	0.005	0.000	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Anionic Impurit		0.000	0.000	0.101	0.000	0.000	0.078	0.000	0.089	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca(OH)2		0.000	0.000	0.000	33.000	0.000	0.361	0.000	0.413	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Calcium Citrate		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	16.191	0.000	0.370	69.870	0.000	0.000	0.066	0.000
Cationic Ipurit		0.000	0.000	0.346	0.000	0.000	0.267	0.000	0.305	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Citric Acid		0.000	0.000	16.286	0.000	0.000	0.063	0.000	0.072	0.000	0.000	0.000	10.175	0.000
Fe		0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Glucose		0.000	0.000	0.192	0.000	0.000	0.148	0.000	0.169	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Gypsum		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	10.804	0.000
H2SO4		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	10.000	0.000	0.312	0.000
K		0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.002	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
NFS		0.000	0.000	0.481	0.000	0.000	0.370	0.000	0.423	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Nutrients		0.000	0.000	0.187	0.000	0.000	0.144	0.000	0.164	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Water		100.000	28.789	82.398	67.000	0.000	82.371	100.000	97.988	30.130	90.000	0.000	78.643	100.000



Planta de producción de ácido cítrico
Capítulo 1. Especificaciones

Tabla 1.21 – Tabla de caudales del proceso en la planta Citrox

Time Ref: Batch		51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
Total Mass Flow	MT	311.88	49.11	0.01	48.80	0.33	25.54	31.80	42.54	292.08	300.24	34.37	344.00	153.61
Temperature	°C	34.50	27.00	25.00	27.00	26.90	25.00	25.90	25.60	25.00	80.00	30.00	33.60	100.00
Pressure	bar	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
Total Enthalpy	kW-h	11616.90	581.16	0.44	577.38	4.22	745.19	961.97	360.60	2053.61	12596.41	136.73	12583.08	114809.61
Heat Capacity	kcal/kg-°C	0.926	0.376	1.000	0.376	0.408	1.000	1.000	0.284	0.242	0.249	0.114	0.932	0.454
Total Contents	mass %	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
Calcium Citrate		0.071	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.064	0.000
Citric Acid		10.708	0.687	0.000	0.035	96.844	0.000	0.053	0.000	0.000	0.000	0.000	9.806	0.000
Gypsum		0.574	69.280	0.000	69.729	0.000	0.000	0.000	79.995	0.000	0.000	99.000	0.521	0.000
H2SO4		0.331	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.300	0.000
N2		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	76.712	74.626	0.000	0.000	0.000
O2		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	23.288	22.655	0.000	0.000	0.000
Water		88.316	30.033	100.000	30.237	3.156	100.000	99.947	20.005	0.000	2.720	1.000	89.310	100.000

Tabla 1.22 – Tabla de caudales del proceso en la planta Citrox

Time Ref: Batch		64	65	66	67	68	69	70
Total Mass Flow	MT	190.39	20.80	165.03	46.16	897.58	911.18	32.56
Temperature	°C	15.00	25.00	15.40	23.20	25.00	110.00	110.00
Pressure	bar	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
Total Enthalpy	kW-h	2763.37	606.88	2915.76	454.49	6310.88	38067.51	408.66
Heat Capacity	kcal/kg-°C	0.830	1.000	0.982	0.364	0.242	0.247	0.098
Total Contents	mass %	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
CA crystal		17.363	0.000	0.401	70.184	0.000	0.000	99.497
Calcium Citrate		0.116	0.000	0.133	0.000	0.000	0.000	0.000
Citric Acid		0.354	0.000	0.409	0.000	0.000	0.000	0.000
Gypsum		0.941	0.000	1.085	0.000	0.000	0.000	0.000
H2SO4		0.543	0.000	0.626	0.000	0.000	0.000	0.000
N2		0.000	0.000	0.000	0.000	76.712	75.567	0.000
O2		0.000	0.000	0.000	0.000	23.288	22.941	0.000
Water		80.684	100.000	97.346	29.816	0.000	1.493	0.503

1.7. Balance de materia

A partir de las siguientes tablas (Tabla 1.17, Tabla 1.18, Tabla 1.19, Tabla 1.20, Tabla 1.21 y la Tabla 1.22), se pueden conocer las corrientes de salida y de entrada del sistema (véase, Apéndice 1), y con ello plantear el balance másico (en toneladas / batch) del sistema como la suma de los caudales másicos de entrada al sistema igual a los caudales másicos de salida del sistema. Como entradas al sistema están las corrientes: 1, 3, 7, 12, 15, 16, 19, 20, 25, 26, 27, 30, 38, 41, 44, 47, 50, 53, 56, 59, 65 y 68. Como salidas del sistema están las corrientes: 10, 13, 17, 21, 34, 36, 39, 42, 45, 48, 60, 61, 63, 66, 69 y 70

Aplicando,

$$\text{Entrada} = \text{Salida} \quad [MT/ \text{Batch}]$$

$$2749.61 \approx 2749.95 \quad [MT/ \text{Batch}]$$

Se puede observar un ligero desbalance de 34.1 kg/batch los cuales representan un 0.01% de error. Esto se puede atribuir al propio método de cálculo iterativo del programa de simulación utilizado para este proyecto, SuperPro®Designer, debido a la gran cantidad de materia que ha de calcular por batch. Por ello, se considera un error despreciable y se aceptan los datos de la simulación como datos válidos para el proyecto.

1.8. Definición de las áreas y construcción de la planta

En la Tabla 1.23 se muestran las áreas propuestas para el proyecto de Citrox junto con la nomenclatura a seguir.

Tabla 1.23 – Nomenclatura de las áreas de trabajo de Citrox

Área	Nomenclatura
Almacenaje de materias primas	A-100
Pretratamiento del medio de cultivo	A-200
Fermentación y separación del micelio	A-300
Recuperación del ácido cítrico por precipitación y tratamiento del yeso	A-400
Empaquetado y almacenaje	A-500
Servicios	A-600
Sala de control y laboratorios	A-700
Oficinas y zona de trabajadores	A-800
Taller de mantenimiento	A-900
Zona de tratamiento de residuos sólidos, líquidos y gaseosos	A-1000

A continuación, se definen las características y los usos de estas áreas.

1.8.1. Almacenaje de materias primas (A-100)

El área A-100 está destinada al almacenamiento y conservación de las materias primas utilizadas en la producción de ácido cítrico. Su función es garantizar la disponibilidad continua y el control de calidad de los materiales que alimentan las etapas posteriores del proceso: el pretratamiento del medio de cultivo (A-200).

En esta zona, se concentran las existencias de melaza, los ácidos clorhídrico y sulfúrico, nutrientes y otros reactivos auxiliares que se mantienen bajo condiciones adecuadas de temperatura, ventilación y seguridad. La distribución interna del área separa claramente los productos líquidos de los sólidos, permitiendo una manipulación diferenciada y reduciendo los riesgos de contaminación o incompatibilidad entre materiales.

La ubicación del área A-100 se ha previsto próxima al pretratamiento del medio de cultivo (A-200), de forma que se minimicen los recorridos de bombeo y trasiego. Asimismo, se mantiene conectada con el sistema de drenaje y contención de efluentes que desemboca en la zona de tratamiento de aguas (A-1000), lo que facilita una gestión segura ante posibles vertidos. El control de acceso se limita al personal autorizado, y el entorno se ha concebido para facilitar tanto las operaciones rutinarias como las labores de inspección y mantenimiento.

1.8.2. Pretratamiento medio cultivo (A-200)

El área A-200 se encarga de la preparación y acondicionamiento del medio de cultivo que será empleado en la fermentación. Su función principal es garantizar que el sustrato que alimenta los fermentadores posea la composición, pureza y condiciones de esterilidad necesarias para favorecer el desarrollo del microorganismo y mantener la estabilidad del proceso biotecnológico.

En esta zona se reciben las materias primas procedentes del área de almacenaje (A-100), que son mezcladas y tratadas hasta obtener un medio homogéneo y apto para la fermentación. El conjunto de operaciones que se realizan en el área A-200 asegura la eliminación de impurezas, el ajuste de la composición química y la esterilización del medio antes de su envío a los reactores. Para ello, la sección dispone de instalaciones de mezcla, tratamiento y almacenamiento intermedio, manteniendo un entorno cerrado y controlado que minimiza el riesgo de contaminación.

Por razones de eficiencia y seguridad, el área A-200 se encuentra adyacente al bloque de fermentación (A-300), lo que permite reducir pérdidas térmicas y simplificar la conexión entre ambas etapas. Asimismo, se mantiene integrada con el sistema de drenaje y aguas industriales del área A-1000, que recoge los efluentes generados durante las operaciones de limpieza y mantenimiento.

1.8.3. Fermentación y separación del micelio (A-300)

El área A-300 constituye el núcleo biotecnológico del complejo productivo, donde tiene lugar la conversión de los azúcares de la melaza en ácido cítrico. Esta zona integra tanto la fase de fermentación como la posterior separación del micelio, que permite obtener un caldo clarificado para su purificación en la etapa siguiente.

La instalación cuenta con siete fermentadores de operación discontinua, que trabajan de forma secuencial con un desfase temporal entre cada arranque. Este esquema permite mantener una alimentación continua hacia las etapas de recuperación, asegurando un flujo estable de producto sin interrupciones. Los equipos principales se agrupan en una misma nave, con zonas diferenciadas para los reactores y para la separación del micelio, lo que facilita las operaciones y el mantenimiento.

Por su carácter biotecnológico, el área requiere condiciones de asepsia, control ambiental y facilidad de limpieza, con acceso restringido únicamente a personal autorizado. Su ubicación contigua al pretratamiento del medio (A-200) reduce los recorridos de alimentación y minimiza riesgos de contaminación, mientras que la proximidad con la etapa de recuperación (A-400) permite el traslado rápido del caldo clarificado. El diseño contempla además un sistema de ventilación controlada y drenajes conectados al tratamiento de aguas del área A-1000, integrando así esta sección en la red de servicios generales de la planta.

1.8.4. Recuperación ácido cítrico y yeso por precipitación (A-400)

El área A-400 está destinada a la recuperación y purificación del ácido cítrico contenido en el licor procedente de la fermentación a parte del tratamiento del yeso para valorizarlo como subproducto. En esta sección se separa y concentra el producto principal mediante precipitación con cal y ácido sulfúrico.

La zona opera de manera continua gracias al desfase de producción entre fermentadores, recibiendo un flujo constante de licor clarificado desde el área A-300. En ella, el ácido cítrico se recupera y se obtiene una solución purificada concentrada y cristalizada. La disposición interna incluye el tanque de precipitación con cal y el tratamiento posterior del yeso, el tanque de precipitación con ácido sulfúrico, el cristizador del ácido cítrico y los secadores rotatorios del ácido cítrico y del yeso, todo ello bajo condiciones controladas de temperatura y seguridad.

Por su naturaleza, esta área se sitúa en continuidad directa con la fermentación (A-300), permitiendo el tratamiento inmediato del licor sin almacenamiento intermedio. A su vez, se conecta con el sistema de aguas industriales y de tratamiento de efluentes del área A-1000, encargado de gestionar las corrientes de residuo. El entorno se mantiene cerrado y ventilado, con acceso restringido al personal operativo y preparado para garantizar limpieza y seguridad durante las operaciones.

1.8.5. Empaquetado y almacenaje (A-500)

El área A-500 se destina al acondicionamiento final, envasado y almacenamiento del ácido cítrico anhidro obtenido tras el secado. Su función es preservar la calidad del producto en cuanto a pureza, humedad y granulometría, asegurando su trazabilidad y adecuación para los distintos usos industriales, alimentarios o farmacéuticos previstos.

El producto llega en forma de cristales finos o polvo seco y se somete a operaciones de clasificación y empaquetado en un ambiente controlado. El envasado se realiza en formatos adaptados a las necesidades logísticas y comerciales, garantizando el sellado hermético y la protección frente a la humedad ambiental. Una vez acondicionado, el producto se traslada al almacén de producto acabado, donde se mantiene en condiciones estables de temperatura y baja humedad para evitar su rehidratación o apelmazamiento.

El área se ha diseñado para mantener una atmósfera limpia y seca, con ventilación y filtración adecuadas, reduciendo al mínimo la presencia de polvo en suspensión. La distribución interna diferencia las zonas de envasado, almacenamiento conforme y no conforme, así como los pasillos de circulación para facilitar la manipulación y el control de inventario.

Esta zona se dispone próxima a los accesos logísticos de la planta para facilitar la expedición y distribución del producto final. En conjunto, esta zona constituye la etapa final del proceso productivo, asegurando que el ácido cítrico anhidro y el yeso lleguen al mercado en condiciones óptimas de calidad, seguridad y presentación.

1.8.6. Servicios (A-600)

El área A-600 agrupa las instalaciones de servicios auxiliares que permiten el funcionamiento continuo y seguro de todas las unidades de proceso y apoyo de la planta. En esta zona se reciben los suministros procedentes de las acometidas del polígono industrial —electricidad, gas natural, agua y alcantarillado— y se transforman en las utilidades necesarias para la operación: vapor, aire comprimido, aire estéril, refrigeración, agua de servicio y red contra incendios. Su función es garantizar la disponibilidad, estabilidad y calidad de estos servicios, asegurando así la eficiencia energética y la fiabilidad del conjunto industrial.

A partir de las conexiones externas, el área A-600 distribuye los servicios por toda la planta mediante una red de conducciones y bandejas que alimentan cada sección de proceso. En ella se integran sistemas de generación de vapor y aire comprimido, circuitos de refrigeración, una estación transformadora eléctrica y el conjunto de bombeo de agua de incendios. Estas instalaciones se diseñan como una infraestructura común que da soporte tanto a las áreas de producción (A-100 a A-500) como a las zonas de control, laboratorio y mantenimiento.

Por su naturaleza, el área se sitúa en el perímetro de la parcela, próxima a los puntos de acometida de gas y electricidad, lo que facilita las conexiones con las redes externas y reduce pérdidas energéticas. Los equipos que generan calor o ruido, como calderas y compresores, se alojan en un edificio técnico ventilado y aislado acústicamente, con espacio suficiente para mantenimiento y ampliaciones futuras. Desde esta zona parten las redes principales de vapor, agua y aire, que discurren por pasarelas superiores identificadas por color y sentido de flujo, enlazando con los colectores de retorno y drenaje del área de tratamiento de aguas (A-1000).

1.8.6.1. Agua de proceso y de servicios

El suministro de agua constituye un servicio fundamental para el funcionamiento de la planta, empleándose tanto en operaciones de proceso como en tareas de limpieza y mantenimiento. El agua procede de la red municipal y se almacena en depósitos propios antes de someterse a un tratamiento interno de filtración, ablandamiento y desmineralización, que permite alcanzar la calidad requerida para su uso en la preparación de medios, lavado de equipos y regeneración de resinas. Desde la estación de tratamiento, ubicada en el área de servicios, se distribuye mediante redes diferenciadas de agua de proceso y de servicios. El agua de proceso se utiliza en las etapas productivas y de limpieza, mientras que el agua de servicios se destina a refrigeración, lavado general y usos auxiliares. Para las actividades analíticas y de control, el laboratorio dispone de equipos locales de destilación o esterilización que proporcionan agua de mayor pureza. Este sistema asegura un suministro continuo y de calidad adecuada a todas las áreas de la instalación.

1.8.6.2. Vapor de planta y agua caliente

El sistema de vapor constituye la fuente principal de energía térmica de la instalación y se utiliza tanto en operaciones de calentamiento como en la esterilización de equipos y líneas. El vapor saturado se genera internamente en una caldera alimentada con gas natural procedente de la red general, situada en el área de servicios, y se distribuye a las distintas áreas mediante una red aislada. A partir del vapor se obtiene también agua caliente en circuito cerrado, destinada a limpiezas CIP, precalentamientos de soluciones y otros usos auxiliares. Este servicio resulta esencial para la preparación de medios de cultivo, los procesos de esterilización in situ (SIP), las etapas de evaporación y cristalización, así como para la generación de aire caliente en el secado final. El sistema térmico se diseña para garantizar un suministro estable y eficiente durante toda la operación de la planta.

1.8.6.3. Aire estéril de proceso (aireación)

El aire estéril constituye un servicio esencial en las etapas de cultivo y fermentación, donde se requiere un aporte continuo de oxígeno bajo condiciones controladas. Este aire se genera internamente mediante compresores situados en el área de servicios y se somete a un proceso de filtración y esterilización antes de su distribución a los fermentadores. El sistema incluye prefiltros, filtros absolutos y una etapa de esterilización por vapor que garantiza la ausencia de contaminantes microbiológicos. El aire estéril se utiliza en la preparación de inóculos, en la fermentación principal y en el mantenimiento de líneas estériles asociadas al proceso. El servicio debe asegurar un caudal constante y una pureza elevada durante toda la operación de la planta, siendo uno de los suministros críticos para la producción de ácido cítrico.

1.8.6.4. Aire comprimido de instrumentación y servicios

El aire comprimido se genera internamente mediante compresores ubicados en el área de servicios y constituye un suministro básico para el funcionamiento de la instrumentación neumática y diversas operaciones auxiliares. Tras su compresión, el aire se seca y filtra antes de distribuirse a las distintas áreas de la planta mediante una red general. Este servicio alimenta válvulas, actuadores y equipos de control automático, además de emplearse en operaciones de limpieza neumática y en talleres de mantenimiento. Su fiabilidad es fundamental para garantizar el correcto funcionamiento del sistema de control de proceso y la operatividad de los equipos auxiliares en todas las áreas de la instalación.

1.8.6.5. Refrigeración / agua de refrigeración

El sistema de refrigeración proporciona el caudal de agua fría necesario para mantener las condiciones térmicas adecuadas en los equipos y procesos de la planta. El agua de refrigeración circula en circuito cerrado y se enfría en una torre de refrigeración situada en el área de servicios. Desde allí se distribuye a los intercambiadores de calor asociados a los fermentadores, a los condensadores de vacío y a los equipos de enfriamiento del licor antes de la cristalización. Este servicio permite retirar el calor metabólico generado durante la fermentación y controlar la temperatura en las operaciones de concentración y acabado del producto. El sistema se diseña para garantizar un funcionamiento continuo y eficiente, evitando pérdidas de agua y minimizando el consumo energético.

1.8.6.6. Energía eléctrica y centro de transformación

La energía eléctrica de la planta procede de la red pública de media tensión y se transforma internamente en el área de servicios mediante un centro de transformación que alimenta todos los equipos de baja tensión. Desde esta instalación se distribuye la electricidad a los motores, bombas, compresores, sistemas de control e iluminación de todas las áreas de proceso y servicios auxiliares. El sistema se diseña para garantizar un suministro estable y seguro, incluyendo protecciones automáticas y cuadros de distribución sectorizados. Además, se prevé la instalación de un grupo electrógeno de emergencia que permite mantener en funcionamiento los equipos esenciales durante posibles interrupciones del suministro.

1.8.6.7. Sistemas CIP/SIP

Los sistemas CIP (Cleaning In Place) y SIP (Sterilization In Place) garantizan la limpieza y esterilización de los equipos y líneas de proceso sin necesidad de desmontarlos, asegurando las condiciones de asepsia requeridas en la producción. Estos servicios utilizan soluciones de limpieza, agua caliente y vapor de planta, y se controlan de forma automática mediante secuencias programadas que permiten eliminar residuos orgánicos y contaminantes microbiológicos. Los circuitos CIP/SIP abastecen los fermentadores, tanques de medio, columnas de adsorción, membranas y demás equipos en contacto con el producto. Las instalaciones principales se ubican en el área de servicios, desde donde se distribuyen las líneas de retorno y alimentación hacia cada zona de proceso.

1.8.6.8. Red de protección contra incendios

La red de protección contra incendios constituye un sistema esencial de seguridad en la planta. Se alimenta desde la red general de agua mediante un depósito de almacenamiento y un conjunto de bombas ubicadas en el área de servicios. Desde este punto se distribuye a toda la instalación mediante una red anillada que abastece hidrantes exteriores, bocas de incendio equipadas, rociadores automáticos y sistemas de detección en las zonas de mayor riesgo. El diseño de la red cumple con los requisitos establecidos en el Reglamento de Instalaciones de Protección Contra Incendios (RD 513/2017) y garantiza un caudal y presión suficientes en caso de emergencia. Este servicio protege especialmente las áreas de almacenamiento de materias primas, envasado y secado, donde el riesgo de incendio es más elevado.

1.8.6.9. Suministro de gas natural (combustible)

El gas natural constituye la principal fuente de energía para la generación de vapor y agua caliente en la planta. El suministro procede de la red general de gas de la zona industrial y se conecta a la sala de calderas mediante una acometida con sistema de regulación y medición. Desde esta instalación, el gas se distribuye a los equipos consumidores, principalmente la caldera de vapor y, en caso de existir, el grupo electrógeno de emergencia. La red de gas natural se diseña conforme a la normativa vigente en materia de instalaciones térmicas y de seguridad, incorporando válvulas de corte y dispositivos de protección que aseguran un funcionamiento fiable y seguro en todo momento.

1.8.7. Sala de control y laboratorios (A-700)

El área A-700 concentra las instalaciones de supervisión y soporte técnico de la planta. En esta zona se ubican la sala de control central, desde donde se monitoriza el funcionamiento de todos los equipos y sistemas, y los laboratorios de ensayo y desarrollo, donde se realizan actividades de análisis, verificación y apoyo a la operación. Su función es garantizar la estabilidad del proceso, la seguridad operativa y el control técnico de los productos y corrientes de trabajo.

La sala de control constituye el punto neurálgico del seguimiento de la planta. Es un espacio cerrado y climatizado, aislado del resto de áreas, donde el personal de operación dispone de los sistemas de supervisión en tiempo real, comunicación con las distintas unidades y registro automático de datos. Desde aquí se pueden visualizar las condiciones de trabajo de los fermentadores, los balances energéticos o las variables de los equipos

principales, permitiendo la coordinación general de la producción. El acceso está restringido y su diseño favorece la concentración y el trabajo continuo de los operarios, en un entorno similar a un despacho técnico pero preparado para situaciones de control permanente.

En una zona adyacente se encuentra el laboratorio técnico, concebido como un espacio polivalente para realizar análisis de materias primas, corrientes intermedias o producto final, así como estudios de desarrollo o seguimiento microbiológico. Esta instalación sirve de apoyo al proceso, proporcionando información experimental o de control que complementa los datos obtenidos en línea. Su distribución interna incluye áreas diferenciadas de análisis químico y microbiológico, con ventilación independiente y acceso controlado.

El conjunto se sitúa en una posición central dentro de la planta, próximo a las áreas administrativas (A-800) y con comunicación directa con las zonas de proceso. Este emplazamiento permite un contacto ágil entre el personal de producción y el técnico, sin interferir en las operaciones industriales. En su conjunto, el área A-700 actúa como centro de coordinación, control y apoyo técnico, integrando en un mismo bloque la supervisión de la planta, la gestión de datos de operación y las actividades analíticas necesarias para el buen funcionamiento del proceso y la calidad del producto.

1.8.8. Oficinas y zona de trabajadores (A-800)

El área A-800 se destina a las dependencias administrativas y de personal que permiten la gestión diaria y el soporte operativo de la planta. En esta zona se concentran las actividades de coordinación técnica, administración y planificación, junto con los espacios dedicados al bienestar del personal que trabaja en las áreas de proceso.

El bloque combina oficinas, despachos y salas de reunión para el personal administrativo y técnico, con vestuarios, servicios higiénicos y una pequeña zona de comedor o descanso para los operarios. Su diseño busca ofrecer un entorno funcional, seguro y cómodo, que facilite tanto el trabajo de gestión como la transición del personal entre las zonas de producción y los espacios comunes.

Por razones de accesibilidad y seguridad, el edificio se sitúa cerca del acceso principal de la parcela, con entrada independiente para el personal administrativo y conexión controlada con las áreas industriales. Los vestuarios y zonas de descanso se ubican hacia el lado más próximo a las áreas de proceso, permitiendo un recorrido fluido del personal entre los distintos sectores de la planta. La disposición del conjunto favorece la iluminación natural, la ventilación y el confort térmico, integrando las condiciones necesarias para un entorno laboral adecuado.

1.8.9. Taller de mantenimiento (A-900)

El área A-900 se destina a las actividades de mantenimiento preventivo y correctivo de los equipos de proceso, servicios y apoyo de la planta. Su finalidad es disponer de un espacio preparado para el almacenamiento de herramientas, repuestos y materiales técnicos, así como para la realización de pequeñas reparaciones y ajustes mecánicos, eléctricos o de instrumentación, garantizando la rápida respuesta ante incidencias o paradas programadas.

El taller cuenta con una zona de trabajo cubierta que permite efectuar tareas básicas de reparación y montaje en condiciones seguras y controladas. En su interior se disponen áreas para almacenamiento de componentes de recambio y utillaje, puntos de conexión eléctrica y de aire comprimido, y sistemas de izado para el manejo de piezas de mayor tamaño. Además, se reserva un pequeño espacio para el acopio de lubricantes, disolventes y otros productos auxiliares, manteniendo siempre las medidas de seguridad correspondientes.

Por razones logísticas y de servicio, el área A-900 se ubica en la zona perimetral de la parcela, próxima al área de servicios (A-600) y con fácil acceso al conjunto de la planta. Esta ubicación facilita la entrada de vehículos de mantenimiento, la movilización de equipos y la coordinación con los sistemas de suministro y energía. El recinto cuenta con ventilación natural y elementos de protección contra incendios, garantizando condiciones de trabajo seguras.

1.8.10. Zona de tratamiento de residuos sólidos, líquidos y gaseosos (A-1000)

El área A-1000 se destina a la gestión y tratamiento de los residuos y efluentes generados en las distintas etapas del proceso productivo. Su objetivo es garantizar el cumplimiento de la normativa medioambiental vigente y minimizar el impacto sobre el entorno, integrando en un mismo espacio las operaciones destinadas al manejo de residuos sólidos, líquidos y gaseosos. Esta zona constituye un elemento esencial para el funcionamiento sostenible de la planta y para el cierre del ciclo de materia y energía del conjunto industrial.

En esta área se reciben y tratan los residuos procedentes de todo el complejo, diferenciando su tratamiento según su naturaleza. Los residuos sólidos, como la biomasa fúngica, las resinas agotadas o los lodos de filtración, se manipulan y almacenan en condiciones controladas hasta su valorización o retirada por gestor autorizado. Las corrientes líquidas, originadas principalmente por lavados, purgas y regeneraciones, se canalizan hacia un sistema de tratamiento fisicoquímico y biológico que permite ajustar el pH, eliminar sólidos y reducir la carga orgánica antes del vertido al alcantarillado del polígono industrial. Por su parte, las emisiones gaseosas —procedentes de fermentación, secado o calderas— se filtran y depuran para eliminar partículas y compuestos volátiles, garantizando que las descargas atmosféricas cumplan con los límites establecidos.

El emplazamiento de esta área se ha previsto en la zona más baja del terreno, lo que facilita el drenaje por gravedad de las aguas residuales y la recogida de efluentes desde las distintas unidades de proceso. Todas las superficies de trabajo son impermeables y cuentan con sistemas de contención para evitar fugas o infiltraciones al subsuelo. El recinto dispone de ventilación controlada, extracción localizada y espacios cubiertos para la manipulación y carga de residuos, asegurando la protección ambiental y la seguridad de los operarios.

1.9. Apéndice

1.9.1. Apéndice 1

Descripción de los componentes por corrientes, Tabla 1.24:

Tabla 1.24 – Descripción de las corrientes del proceso

Corriente	Descripción
1	Entrada de la melaza desde el tanque de almacenamiento
2	Salida de la melaza caliente del intercambiador y entrada en el tanque de disolución
3	Entrada de agua al intercambiador de calor
4	Salida de agua caliente del intercambiador y entrada al tanque de disolución de melaza
5	Salida del tanque de disolución de melaza
6	Entrada de la melaza diluida a 90 grados al tanque de precipitación con ferrocianuro
7	Entrada de ferrocianuro en el tanque de precipitación
8	Salida del tanque de precipitación con ferrocianuro
9	Entrada al filtro de placas y marcos para eliminar el precipitado
10	Salida de los metales precipitados en la desmetalización
11	Entrada a la columna de carbón activo
12	Entrada de agua a la columna de carbón activo
13	Salida de impurezas iónicas y NFS de la columna de carbón activo
14	Salida de la columna de carbón activo y entrada en la columna de intercambio catiónico
15	Entrada de ácido clorhídrico en la columna de intercambio catiónico
16	Entrada de agua en la columna de intercambio catiónico
17	Salida de ácido clorhídrico e impurezas catiónicas de la columna de intercambio catiónico
18	Salida de la columna de intercambio catiónico y entrada en la columna de intercambio aniónico
19	Entrada del hidróxido de sodio en la columna de intercambio aniónico
20	Entrada de agua en la columna de intercambio aniónico
21	Salida de hidróxido de sodio e impurezas aniónicas de la columna de intercambio aniónico
22	Salida de la columna de intercambio aniónico y entrada en el tanque pulmón
23	Salida del tanque pulmón y entrada en el pasteurizador
24	Salida del pasteurizador y entrada en el fermentador
25	Entrada de agua en el mixer
26	Entrada de sulfato de amonio en el mixer
27	Entrada de nutrientes en el mixer
28	Salida del mixer y entrada en el pasteurizador
29	Salida del pasteurizador y entrada en el fermentador
30	Entrada de aire en el compresor
31	Salida de aire del compresor y entrada en el filtro de aire
32	Salida del filtro de aire y entrada en el fermentador
33	Salida de aire del fermentador y entrada en el filtro de aire
34	Salida del filtro de aire del fermentador al exterior
35	Salida del fermentador y entrada al tanque de almacenamiento de caldo de fermentación
36	Salida de aire del tanque de almacenamiento de caldo de fermentación

37	Salida del tanque de almacenamiento de caldo de fermentación y entrada en el filtro rotatorio para eliminar el micelio
38	Entrada de agua en el filtro rotatorio
39	Salida de micelio del filtro rotatorio
40	Salida del filtro rotatorio y entrada en el tanque de precipitación con cal
41	Entrada de cal en el tanque de precipitación
42	Salida de aire del tanque de precipitación
43	Salida del tanque de precipitación y entrada en el filtro rotatorio
44	Entrada de agua en el filtro rotatorio
45	Salida de precipitado en el filtro rotatorio
46	Salida del filtro rotatorio y entrada en el tanque de precipitación con ácido sulfúrico
47	Entrada de ácido sulfúrico al tanque de precipitación
48	Salida de aire del tanque de precipitación
49	Salida del tanque de precipitación con ácido sulfúrico
50	Entrada de agua al filtro rotatorio
51	Salida de ácido cítrico de la purificación
52	Salida del yeso precipitado
53	Entrada de agua en el lavador de yeso
54	Salida de yeso del lavador
55	Recirculación de ácido cítrico recuperado del yeso
56	Entrada de agua en el filtro rotatorio
57	Recirculación de ácido cítrico recuperado del yeso
58	Salida de yeso húmedo
59	Entrada de aire al secador de yeso
60	Salida de aire húmedo del secador de yeso
61	Salida de yeso industrial como subproducto
62	Entrada de ácido cítrico al cristalizador
63	Salida de agua del cristalizador
64	Salida de ácido cítrico cristalizado
65	Entrada de agua en el filtro rotatorio
66	Salida de agua e impurezas del proceso del filtro rotatorio
67	Salida de ácido cítrico del filtro rotatorio
68	Entrada de aire en el secador de ácido cítrico
69	Salida de aire húmedo del secador de ácido cítrico
70	Ácido cítrico anhidro como producto principal

1.10. Bibliografía

- [1] Á. G. Garcinuño, «Estudio de viabilidad de una planta de producción de ácido cítrico por fermentación,» 2015. [En línea]. Available: <https://produccioncientifica.usal.es/documentos/5e6433402999527e0176d8ee>.
- [2] FEDNA, «Melazas de remolacha azucarera,» FEDNA, [En línea]. Available: https://fundacionfedna.org/ingredientes_para_piensos/melazas-de-remolacha-azucarera.
- [3] F. J. R. Núñez, «Planta industrial de producción de ácido cítrico a partir de melazas de remolacha.,» Noviembre 2008. [En línea]. Available: <https://rodin.uca.es/handle/10498/6411>.
- [4] S. Mores et al., «Citric acid bioproduction and downstream processing: Status,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852420317004>.
- [5] X. Yin et al., «Comparative genomics and transcriptome analysis of *Aspergillus niger* and metabolic engineering for citrate production,» Enero 2017. [En línea]. Available: <https://www.nature.com/articles/srep41040#ref-CR9>.
- [6] A. Koulouris, «Chapter 11 - Modeling of citric acid production using SuperPro Designer,» Elsevier, 2023. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/chapter/edited-volume/pii/B9780323901680000019>.
- [7] C. R. G. +. C. KG, «Ficha de seguridad del potasio hexacianoferrato(II) trihidrato,» 18 09 2024. [En línea]. Available: https://www.carlroth.com/downloads/sdb/es/7/SDB_7974_ES_ES.pdf.
- [8] F. scientific, «Hydrochloric acid 7%,» Fisher scientific , [En línea]. Available: <https://www.fishersci.com/shop/products/hydrochloric-acid-7-w-w-reagents/01335036>.
- [9] Chemos, «Hydrochloric acid 37%,» Chemos, 30 Junio 2020. [En línea]. Available: https://www.chemos.de/import/data/msds/ES_es/7647-01-0-A0012383-ES-es.pdf.
- [10] R. C. Company, «Safety Data Sheet Sodium hydroxide 4%,» Ricca Chemical Company , [En línea]. Available: <https://digitalassets.avantorsciences.com/adaptivemedia/rendition?id=083dd5e0b7c83b0e89285b4dd5658f58d8437379&vid=6f4380fba7e90594ae2c6aeb57f8b26a5c4d2271&prid=original&clid=SAPDAM>.

- [11] Isquisa, «Hidróxido de sodio 50%,» Isquisa, 2020. [En línea]. Available: https://isquisa.com/assets/files/HDSLSTOS/HIDROXIDOS/HDS-Hidr%C3%B3xido%20de%20Sodio%2050_%20Est%C3%A1ndar..pdf.
- [12] Scharlab, «Ácido sulfúrico, solución 10%,» Scharlab, [En línea]. Available: https://www.scharlab.com/es/es/productos-quimicos/reactivos-inorganicos/acido_sulfurico_solucion_10_p_v_essentq_r_9288?mode_print=2&articulo_resaltado_print=AC20681000.
- [13] S. Aldrich, «Sulfuric Acid 98%,» Merck, [En línea]. Available: <https://www.sigmaaldrich.com/ES/es/sds/mm/1.00748?userType=anonymous>.
- [14] M. I. company, «MISSISSIPPI LIME COMPANY - SAFETY DATA SHEET,» Mississippi lime company, [En línea]. Available: <https://www.scienceinteractive.com/wp-content/uploads/2020/10/Calcium-Hydroxide-Mississippi-Lime-Company.pdf>.
- [15] Dupont, «DuPont™ AmberLite™ FPA66 UPS Ion Exchange Resin,» Dupont, [En línea]. Available: <https://www.dupont.com/content/dam/water/amer/us/en/water/public/documents/en/IER-AmberLite-FPA66-UPS-PDS-45-D00709-en.pdf>.
- [16] Dupont, «AmberLite™ FPC88 Ion Exchange Resins,» Dupont, [En línea]. Available: <https://www.dupont.com/content/dam/water/amer/us/en/water/public/documents/en/IER-AmberLite-FPC88-PDS-45-D00703-en.pdf>.
- [17] C. Carbon, «SGL 8x30,» Calgon Carbon, 2014. [En línea]. Available: <https://www.calgoncarbon.com/app/uploads/SGL8x30.pdf>.
- [18] L. R. D. S. M. Bento, «Process of decoration of sugar solutions, using adsorbent and anionic resins, with use of effluents resulting from regenerations,» Google Patents, 03 Febrero 2015. [En línea]. Available: <https://patents.google.com/patent/PT106321B/en>.
- [19] Carlroth, «Ácido cítrico 99.5%. Ficha de seguridad,» Carlroth, [En línea]. Available: <https://www.carlroth.com/medias/SDB-X863-ES-ES.pdf?context=bWFzdGVyfHNIY3VyaXR5RGF0YXNoZWV0c3wyNTkxODd8YXBwbGljYXRpb24vcGRmfGFewTJMMmd4T0M4NU1UYzFOelUyT0RrNE16TTBMMU5FUWw5WU9EWXpYMFZUWDBWVExuQmtaZ3wwYjAzZGVhZml0ZTJhYjRkMGQwM2E0NTQxMzh1Yzh1ZDkyMWVvkmJRmOWY5>.
- [20] C. D.S. et al., «Effect of potassium ferrocyanide on the chemical composition of molasses mash used in the citric acid fermentation,» WILEY Analytical Science, Junio 1965. [En línea]. Available: <https://analyticalsciencejournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/bit.260070206>.

- [21] M. Ahmedna et al., «Granular Activated Carbons from Agricultural By-products:», LSU AgCenter Bulletins, 2000. [En línea]. Available: https://repository.lsu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1038&context=agcenter_bulletins&.
- [22] HLC Ingeniería y Construcción, «Regeneración de carbón activado,» 26 junio 2024. [En línea]. Available: <https://es.linkedin.com/pulse/regeneraci%C3%B3n-de-carb%C3%B3n-activado-hlc-ingenieriayconstruccion-sac-mhwbe>.
- [23] A. T. D. Belen, «Pruebas de adsorción y regeneración química de carbón activado (...),» julio 2018. [En línea]. Available: <https://zaloamati.azc.uam.mx/server/api/core/bitstreams/b0dfd2ab-5ace-4d8c-be64-6520f4665d2c/content>.
- [24] Universidad de Sevilla, [En línea]. Available: <https://www.elaguapotable.com/Manual%20del%20carb%C3%B3n%20activo.pdf>.
- [25] Ecolab, «Ion Exchange Resins for Beet Sugar Refining,» Ecolab, [En línea]. Available: <https://www.purolite.com/index/core-technologies/industry/food-and-beverage/sugar-refining-applications/beet-sugar-refining>.
- [26] V. Koch et al., «Effect of antifoam agents on the medium and microbial cell properties and process performance in small and large reactors,» Elsevier, 1995. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0032959294000298>.
- [27] S. Kulprathipanja, «Separation of citric acid from fermentation broth,» Google patents, 19 Julio 1989. [En línea]. Available: <https://patents.google.com/patent/EP0324210A1/en>.
- [28] L. Nemdili et al., «Crystallization kinetics of citric acid anhydrate,» Elsevier, 1 Octubre 2016. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022024816303554>.
- [29] Intelligen, «SuperProDesigner User Guide,» Intelligen, [En línea]. Available: https://www.intelligen.com/wp-content/uploads/2020/05/SuperPro_ManualForPrinting_v11.pdf.