



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI



aitex

instituto
tecnológico
textil

Diseño de un proceso de adsorción para el tratamiento de aguas residuales de baños de tintura mediante ciclodextrinas

Alejandro Rico Sánchez

Grado en Ingeniería Química

Director: Jaime Lora García
Ingeniería Química y Nuclear (UPV)

Co-director: Rafael Balart Gimeno
Ingeniería Mecánica y Materiales (UPV)

Co-directora: Marcela Ferrándiz García
Grupo de investigación de Biotecnología (AITEX)



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA
CAMPUS D'ALCOI

Diseño de un proceso de
adsorción para el tratamiento de
aguas residuales de baños de
tintura mediante ciclodextrinas



aitex

instituto
tecnológico
textil



Contenido

I.	Introducción	2
1.	Sector textil.....	2
1.1.	Colorantes.....	4
2.	Sistemas de tratamiento de aguas residuales.....	6
2.1.	Eliminación de colorantes	8
2.2.	Reutilización de colorantes	8
II.	Diseño del proceso	12
1.	Experimentación previa	15
1.1.	Síntesis del polímero epiclorhidrina-ciclodextrina	15
1.2.	Evaluación de las capacidades de adsorción.....	17
1.3.	Evaluación de las capacidades de liberación.....	19
1.4.	Calculo del tiempo de residencia	21
2.	Planta piloto.....	27
2.1.	Diseño del prototipo	27
2.2.	Diseño del agitador	28
3.	Escalado industrial	30
3.1.	Diseño del reactor	30
3.2.	Diseño del agitador	30
III.	Planos.....	¡Error! Marcador no definido.
IV.	Presupuesto	32
V.	Valoración económica	34
1.	Costes de operación y mantenimiento	34

 <p>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA CAMPUS D'ALCOI</p>	<p>Diseño de un proceso de adsorción para el tratamiento de aguas residuales de baños de tintura mediante ciclodextrinas</p>	 <p>aitex instituto tecnológico textil</p>
---	--	---

2.	Costes fijos.....	¡Error! Marcador no definido.
3.	Valoración económica	¡Error! Marcador no definido.
VI.	Conclusiones	¡Error! Marcador no definido.
VII.	Bibliografía.....	34
VIII.	Relación de figuras.....	36
IX.	Relación de tablas	37



Resumen

Este proyecto tiene como objetivo el diseño de un proceso de absorción de colorantes de un agua residual textil, con el fin de poder reutilizar los colorantes en nuevo baños de tintura. Para ello, se hará uso de polímeros de ciclodextrinas con epiclorhidrina.

Las ciclodextrinas son oligosacáridos cíclicos provenientes de la degradación del almidón. Entre sus propiedades destacan su solubilidad en agua y su cavidad interna apolar, con lo que son capaces de producir complejos anfitrión-huésped. Otra propiedad interesante de las ciclodextrinas, es la capacidad de formar complejos de inclusión con polímeros a través de enlaces no covalentes. Con ello conseguimos un polímero de epiclorhidrina y ciclodextrinas insoluble al agua con las propiedades de encapsulación de las ciclodextrinas.

Palabras clave: Complejos de inclusión, ciclodextrinas, reutilización de colorantes.

Abstract

This Project aims to design a process of absorption of a textile dye wastewater, in order to reuse the new dyes in dye baths. To do so, it makes use of cyclodextrins with epichlorohydrin polymers.

Cyclodextrins are cyclic oligosaccharides from starch degradation. Its properties include solubility in water and an apolar internal cavity able to produce host-guest complexes. Another interesting property of cyclodextrins is the ability to form inclusion complexes with polymers through non-covalent bounds. This got a water insoluble polymer of epichlorohydrin-cyclodextrin with the encapsulation properties of cyclodextrins.

Keywords: Inclusion complexes, cyclodextrins, dyes reuse.



I. Introducción

1. Sector textil

La industria textil agrupa las actividades dedicadas a la producción de fibras, hilados, telas y productos relacionados con la confección de ropa. Este sector tuvo un gran desarrollo entre los siglos XVIII y XIX gracias a la Revolución Industrial, en la que se incorporó y mejoró maquinaria capaz de trabajar con distintos tipos de fibra, lo que provocó que el algodón sustituyera a la lana como la fibra más utilizada.

Uno de los factores a los que se debe la complejidad del sector textil es la gran cantidad de materias primas que se utilizan en la preparación de las fibras, así como la diversidad de procesos de producción existentes para su manipulación. Dentro del sector textil, pueden ser establecidos los siguientes subsectores:

- **Hilatura:** Es el proceso en el cual se convierten los hilos de fibras naturales y sintéticas en hilos.
- **Tejeduría:** Es el conjunto de acciones cuya finalidad es obtener telas a partir de hilos.
- **Acabados:** El sector de los acabados, comprende la tintura y los estampados.
- **Confección:** Fabricación de ropa y otros textiles a partir de hilos y telas.

Dependiendo del tipo de fibra con la que se trabaje, son necesarios una serie de tratamientos para conseguir el producto final.

Como esquema general, en la **Figura I-1** se muestra un diagrama con los procesos que se aplican a los tejidos desde que se acaba la hilatura hasta que se finaliza el tejido. Además, también puede verse en que partes del proceso se producen aguas residuales, cuyas cargas y composición depende del tipo de fibra de la que esté hecho el tejido y de los productos utilizados en cada tratamiento.

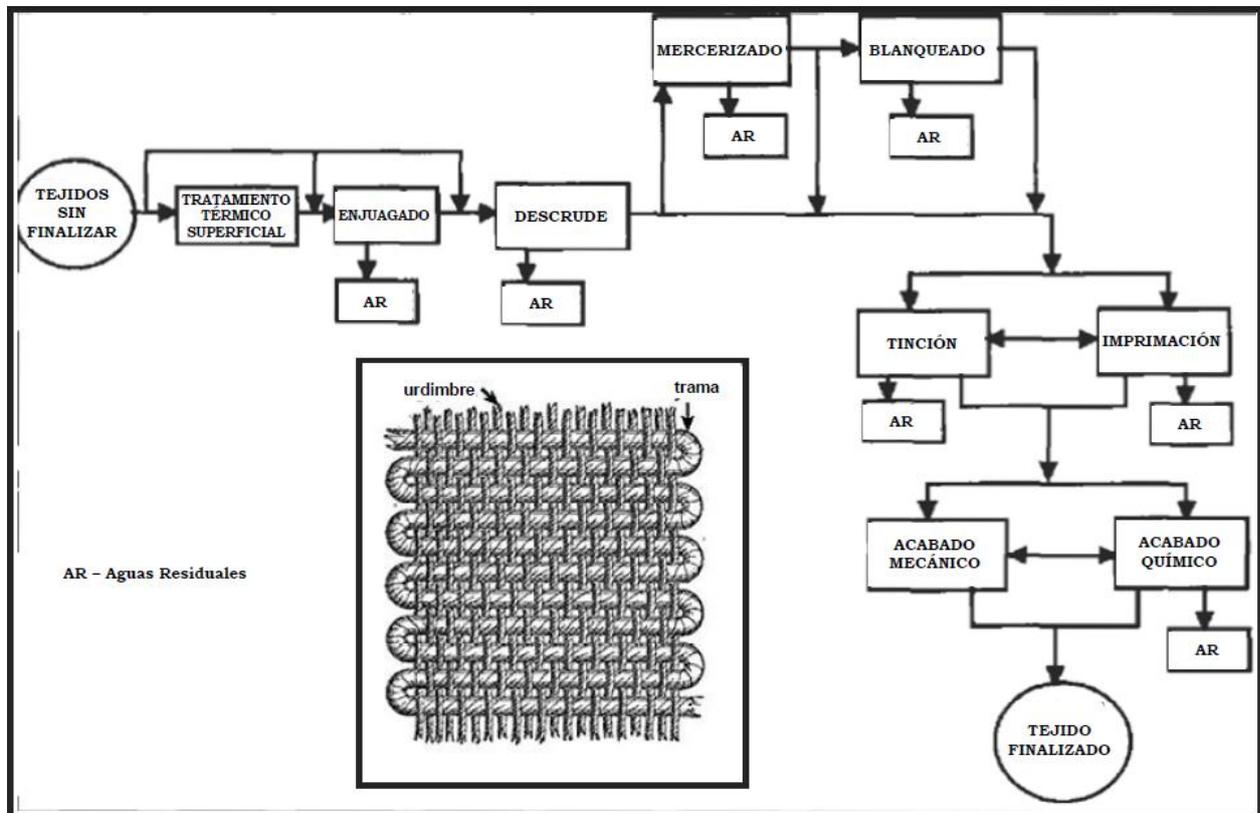


Figura I-1. Diagrama de proceso de tratamientos a tejidos.

Los tratamientos más habituales en el tejido son los siguientes:

- **Desencolado:** Consiste en retirar el encolado de cualquier tela tejida, para ello se somete la tela a una degradación química o enzimática y se lava.
- **Desengrasado:** La finalidad del desengrasado es la de eliminar las impurezas naturales como las ceras, pectinas o proteínas. El proceso se lleva a cabo mediante el uso de baños de hidróxido sódico a temperaturas de 80-90°C.
- **Mercerizado:** Se utiliza para mejorar la resistencia a la tracción y la estabilidad de las fibras, además se obtiene una mejora en el rendimiento del colorante durante la tintura.
- **Blanqueado:** Con el blanqueo de la fibra, se destruyen impurezas naturales de la fibra con el fin de conseguir un acabado blanco. Es común el uso de baños con peróxido de hidrógeno a temperaturas de alrededor de 50°C.

Una vez finalizados los tratamientos previos se realiza la tintura de las fibras, para ello se usan todo tipo de colorantes.



1.1. Colorantes

Los colorantes son compuestos capaces de teñir fibras. El color depende de la estructura electrónica y de sus grupos cromóforos. Los colorantes se pueden clasificar de diversas formas, atendiendo a su origen pueden ser naturales o artificiales, dependiendo de los grupos cromóforos que presenten pueden ser azoicos, nitrogenados y sulfurosos entre otros. El Colour Index es una base de datos reconocida en la que se clasifican todos los tipos de colorantes.

La clasificación más habitual se corresponde con el tipo de grupos cromóforos que presenta el colorante, los más habituales en el teñido de telas de algodón son los colorantes azoicos.

Los colorantes azoicos son una gama de colorantes muy importante, ya que entre sus características destacan en ser hipercrómicos (se fijan fuertemente al tejido), son fáciles de obtener y cubren toda la gama de tonalidades.

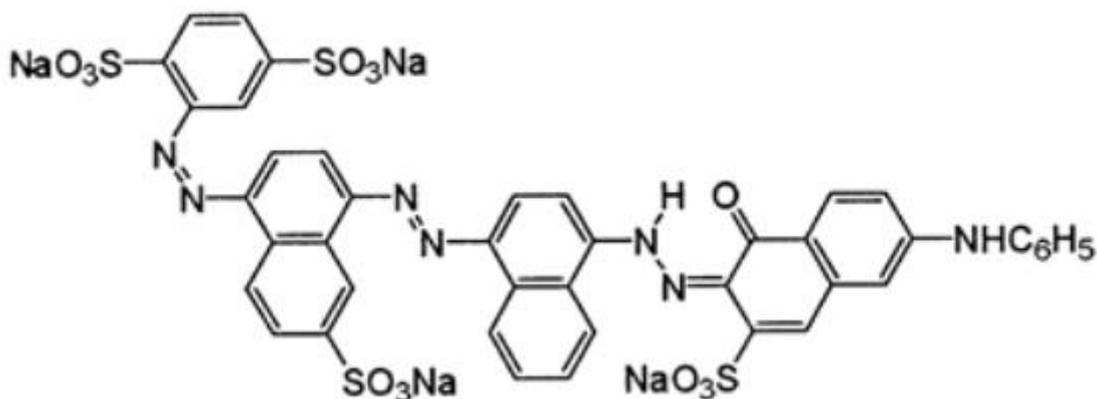


Figura I-2. Estructura del colorante Direct Blue 78.

En la **Figura I-2** Se muestra la estructura del colorante Direct Blue 78, en la que se pueden observar los grupos cromóforos (N=N) responsables del color de la molécula. El colorante se puede clasificar como de tipo azoico y, dentro del grupo de los azoicos como disazoico, ya que tiene dos grupos azo. Además, debido a las condiciones de tintura también se puede clasificar como un colorante directo.

El siguiente grupo más importante en el campo de los colorantes, son los del tipo antraquinona, cuyo cromógeno está presente en las tonalidades rojas, azules y turquesas. En la **Figura I-3** se muestra la estructura del colorante Disperse Blue 73, un colorante clasificado como del grupo de antraquinonas por su composición, y del tipo disperso por el método de tinción.

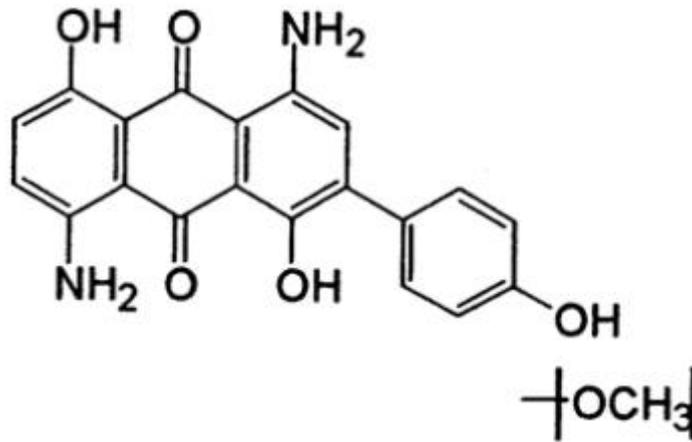


Figura I-3. Estructura del colorante Disperse Blue 73.

En la **Figura I-4** se muestran los principales grupos cromóforos así como la fórmula molecular general.

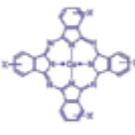
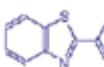
Clase enlace cromóforo	Fórmula molecular general	Clase enlace cromóforo	Fórmula molecular general	Clase enlace cromóforo	Fórmula molecular general	Clase enlace cromóforo	Fórmula molecular general
Acridina		Phthalocyanine		Xanthene		Diazonium	
Antraquinona		Quinone Imine		Thiazole		Azo	
Arimetano		Tetrazolium		Nitro			

Figura I-4. Grupos cromóforos.

Además de estos grupos cromóforos, están también los grupos auxocromos (CH₃, Cl, NH₂, OH, SH, Br), que son capaces de sustituir los enlaces no saturados de los grupos cromóforos modificando así la intensidad de absorción y la longitud de onda de absorción.

Uno de los mayores impactos ambientales del sector textil es el gran consumo de agua que requiere en todas las etapas de fabricación de un producto, por lo que es importante conocer los diferentes tratamientos que pueden ser aplicados a estas aguas residuales para evitar problemas de contaminación, así como reducir los vertidos al máximo.



2. Sistemas de tratamiento de aguas residuales

Debido a la cantidad de sustancias contaminantes que presentan las aguas residuales, es necesario realizar una serie de tratamientos para evitar la contaminación de las zonas donde se viertan.

Como norma general, los tratamientos de los efluentes residuales se pueden en tres grupos; tratamientos físico-químicos primarios, Tratamientos secundarios (biológicos) y tratamientos terciarios.

➤ Tratamientos físico-químicos primarios

Este tipo de tratamientos tienen como objetivo adecuar el agua residual para que el tratamiento secundario sea posible. Generalmente se realizan los siguientes tratamientos:

- **Desbaste:** Mediante unas rejas de desbaste se eliminan partículas sólidas de tamaños mayores de 5mm.
- **Homogeneización:** Mediante tanque se homogeneización se consigue la neutralización de compuestos y se homogeneizan los caudales y concentraciones.
- **Neutralización:** Se adapta el pH del agua para que sea apto para el tratamiento biológico y se precipitan metales pesados.
- **Coagulación-floculación:** Se añaden coagulantes y floculantes al agua y, mediante sedimentadores se eliminan partículas solidas de hasta 1µm.
- **Oxidación-reducción:** Si el agua residual presenta una elevada DQO inicial, se añaden agentes oxidantes o reductores para romper las moléculas y aumentar así la DBO.

➤ Tratamientos secundarios (biológicos)

En este tipo de tratamientos se emplean microorganismos para eliminar la materia orgánica presente en el agua residual. Dependiendo de las características del agua a tratar, se utilizaran fases aerobias, anóxicas o anaerobias.

En la fase aerobia se utiliza el oxígeno como aceptor de electrones, se elimina materia orgánica y se produce NO_3^- , este proceso es recomendado para aguas con bajo contenido en nitrógeno.



La fase anóxica se da cuando la concentración de oxígeno disuelta en agua es menor de 1mg/l, por lo que los microorganismos utilizan el NO_3^- como aceptor de electrones. La fase anóxica suele utilizarse cuando las aguas a tratar son ricas en nitrógeno y este ha de ser eliminado. Generalmente la fase anóxica se lleva a cabo antes de la fase aerobia.

En el caso de que sea necesario eliminar fósforo, se utilizaran bacterias PAO en conjunto con fases aerobias y anóxicas. El fósforo será eliminado mediante la purga de fangos de la recirculación.

Los tratamientos anaerobios son llevados a cabo en condiciones de ausencia total de oxígeno disuelto en agua. Se lleva a cabo en reactores cerrados donde se dan lugar las reacciones de hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. En cuanto a las condiciones de operación, hay que tener muy en cuenta la temperatura y el pH durante todo el proceso, ya que los microorganismos responsables de la metanogénesis son muy sensibles y si las condiciones no son adecuadas no se llega a producir esta reacción, por lo que no se eliminará la materia orgánica. Como resultado de la degradación anaerobia, se produce CH_4 , CO_2 y H_2S .

➤ **Tratamientos terciarios**

Los tratamientos terciarios tienen como objetivo adecuar el agua para su reutilización en caso de que la normativa lo permita. Dependiendo de las condiciones en las que haya acabado el agua en la etapa de tratamiento biológico o de las necesidades del agua a producir, se utilizaran los siguientes tratamientos:

- **Intercambio iónico:** Mediante resinas de intercambio iónico se pueden eliminar compuestos orgánicos que no hayan sido eliminados anteriormente, como fenoles o aminas.
- **Procesos de oxidación:** Con el fin de eliminar materia orgánica tanto biodegradable como no biodegradable y posibles microorganismos, se utilizan oxidantes como el ozono (O_3), el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) o la luz ultravioleta.
- **Desinfección:** Para eliminar microorganismos presentes y evitar su proliferación se añade cloro o hipoclorito.



2.1. Eliminación de colorantes

Los colorantes empleados en el proceso de tintura en la industria textil, se manifiestan en muy poca concentración y, generalmente son moléculas complejas de alto peso molecular incapaces de ser digeridas por los microorganismos por lo que para su eliminación se lleva a cabo mediante procesos de oxidación avanzada.

Los procesos de oxidación avanzada son los siguientes:

- **Proceso H_2O_2 /pH:** La combinación del peróxido de hidrógeno junto con un pH y temperatura adecuada de lugar a un oxidante más fuerte que el cloro o el permanganato. Además de que no es biocida, por lo que no afectaría a procesos biológicos posteriores.
- **Proceso H_2O_2/Fe^{2+} :** La presencia de catalizadores junto con el peróxido de hidrógeno mejora la oxidación gracias a los radicales hidroxilo que se generan.
- **Proceso Fenton:** Este proceso consiste en la oxidación por combinación del peróxido de hidrógeno con el hierro(II) en medio ácido. Se producen radicales hidroxilo e hidroperóxido que son los responsables de la oxidación.
- **Ozonización:** El uso de ozono para eliminar el color en aguas residuales tiene como ventajas el hecho de que tiene potencial para eliminar una parte de la materia orgánica y sus residuos se descomponen en O_2 y H_2O .

Además de estos procesos para eliminar los colorantes, también se pueden utilizar técnicas electroquímicas, en las que mediante la aplicación de potenciales se hidrolizan los colorantes.

2.2. Reutilización de colorantes

Debido a que nunca se consigue un agotamiento del 100% del colorante en los baños de tintura, se plantea la posibilidad de reutilizar el colorante residual que queda presente en los baños de tintura. Con ello, no solo se consigue una disminución en la cantidad de colorantes a utilizar, sino que también disminuye la carga del agua residual.

En el ámbito de la reutilización de los colorantes, son interesantes los materiales capaces de absorber el colorante de alguna forma para luego poder liberarlo de forma controlada. Las zeolitas, los polímeros de quitosano o las ciclodextrinas tienen potencial para ser utilizadas en la reutilización de colorantes debido a sus propiedades.

➤ Zeolitas

Las zeolitas, son minerales capaces de hidratarse y deshidratarse de forma reversible compuestas por tetraedros. La propiedad que hace interesante a las zeolitas a la hora de utilizarlas en el campo de la reutilización de colorantes, es que son capaces de formar complejos de inclusión.

Los complejos de inclusión están formados por una molécula huésped, capaz de albergar en su interior otro tipo de moléculas.

En la Figura I-5. Estructura de las zeolitas. **Figura I-5** se puede observar la estructura de una zeolita. En ella podemos ver la cavidad donde se alojarían las moléculas en la formación de los complejos de inclusión.

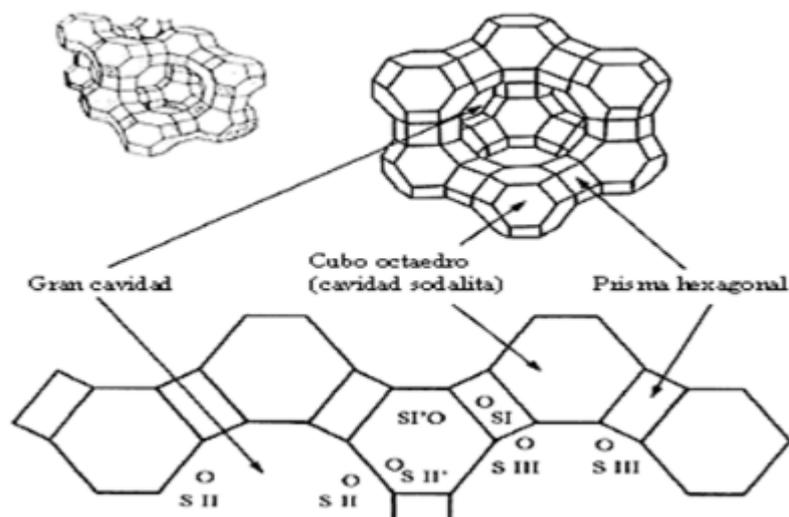


Figura I-5. Estructura de las zeolitas.

➤ Polímeros de quitosano

El quitosano es un polisacárido lineal compuesto de β -(1-4) D-glucosamina y N-acetil-D-glucosamina. Mediante procedimientos realizados en la Universidad de Bari (Italia), se han obtenido unos finos polímeros de quitosano capaces de absorber colorantes y, posteriormente, liberarlos para teñir fibras.

En la **Figura I-6** se muestran tres polímeros de quitosano que han adsorbido colorante, y tres tejidos de algodón tintados con 3% de relación entre el polímero y el peso de fibra y una relación de baño de 1:20. La temperatura del baño a 90°C durante 60 minutos.

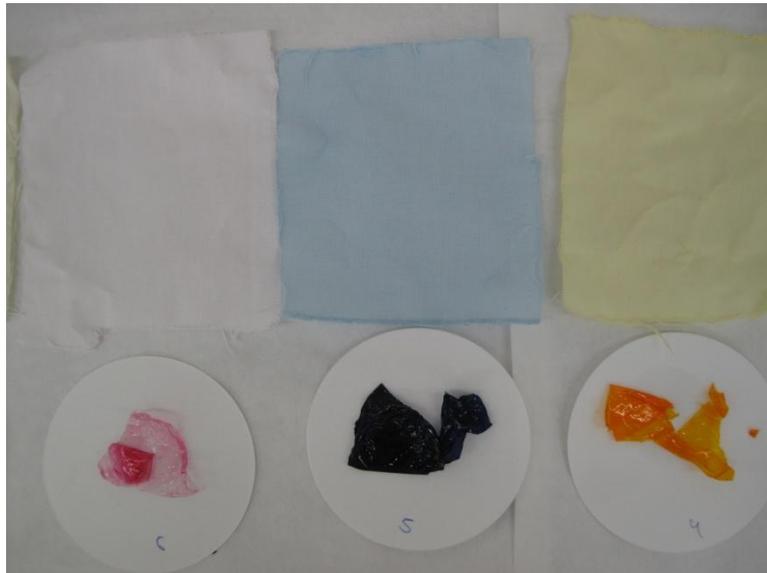


Figura I-6. Polímeros de quitosano y fibras teñidas.

La muestra numero 4 se corresponde con el colorante amarillo directo (Colour Index número 86), la muestra número 5 tiene como colorante el azul directo (Colour index número 78) y la muestra 6 el colorante rojo directo (Colour index número 83:1).

➤ Ciclodextrinas

Las ciclodextrinas son oligosacáridos cíclicos formados a partir de la degradación del almidón, están constituidas desde 6 a 14 unidades de glucopiranosas, aunque para efectos prácticos solo se encuentran aplicación las que están formadas por 6 (α -ciclodextrina), 7 (β -ciclodextrina) y 8 (γ -ciclodextrina) unidades.

Entre las propiedades de las ciclodextrinas, destacan su solubilidad en agua y disolventes polares y su cavidad interna. Las ciclodextrinas presentan una cavidad interna hidrófoba mientras que la parte exterior es hidrófila, esto permite la formación de complejos de inclusión en los que una molécula huésped queda encapsulada por la ciclodextrina.

En la **Figura I-7** se muestra la estructura de las ciclodextrinas así como una representación de la cavidad interna.

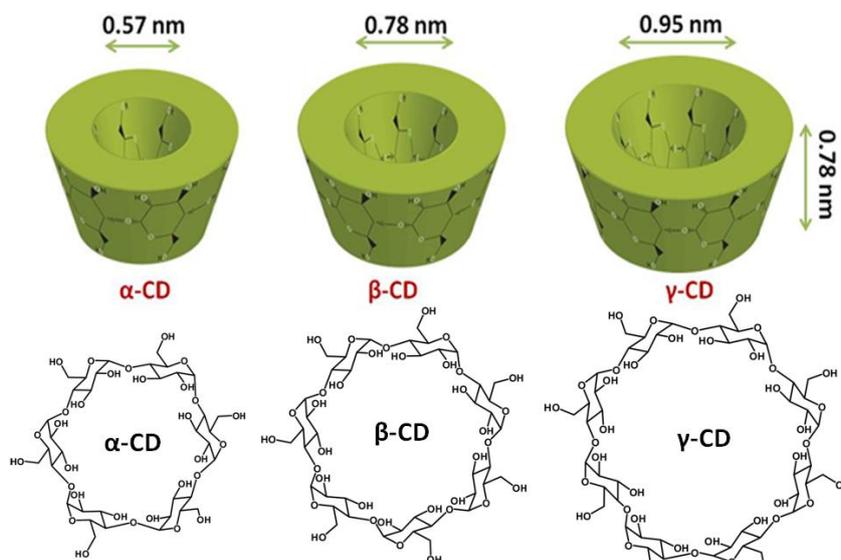


Figura I-7. Estructura de las ciclodextrinas.

Otro campo interesante dentro de las ciclodextrinas, es la posibilidad de modificar sus propiedades a partir de la formación de complejos de ciclodextrinas con varios monómeros, como la adición de grupos metilados o hidroxipropil.

Las ciclodextrinas ya han demostrado su viabilidad en el campo de la medicina^{1,2}, y el tratamiento de aguas³; por lo que otro posible campo de aplicación puede ser el de la reutilización de colorantes. Sin embargo, debido a la solubilidad de las ciclodextrinas en agua, no es posible utilizarlas sin antes formar un polímero donde sean inmovilizadas para evitar esa solubilidad.

Ciertos estudios^{4,5} han demostrado la posibilidad de formar un polímero a partir de epiclorhidrina, un compuesto organoclorado y epóxido, con lo que se consigue un material insoluble al agua con las propiedades de las ciclodextrinas. Por tanto, la utilización de este tipo de polímeros en el ámbito de la reutilización de aguas puede ser factible.

¹ Bekers, O., et al (1991) "cyclodextrins in the pharmaceutical field" en "Drug development and industrial pharmacy", 17 (11). 1503-1549.

² Duchene, D., Wouessidjewe, D. (1990). "Pharmaceutical uses of cyclodextrins and derivatives" en "Drug development and industrial pharmaceutical" 16, 2487-2499.

³ Xiyun Cai, et al (2011) "Adsorption mechanism-based screening of cyclodextrin polymers for adsorption and separation of pesticides from water" en "water research" 45 3499-3511

⁴ XU Wenying, et al (1989) "Studies on the polymerization of β -cyclodextrin with epichlorohydrin" en "Chinese journal of polymer science" Vol.7 No.1.

⁵ JIANG Hongguo, et al (2012) "Immobilization of β -cyclodextrin as insoluble β -cyclodextrin polymer and its catalytic performance" en "Chinese Journal of Chemical Engineering" 20(4) 784-792.



II. Diseño del proceso

Se entiende por diseño industrial el conjunto de procesos en los que se transforman requisitos o necesidades en características específicas o en un producto, proceso o sistema.

Generalmente, el proceso de un diseño industrial se divide en diferentes fases en la que cada una tiene un objetivo claro y diferenciado de las demás. Estas son:

- Toma de datos.
- Evaluación y selección.
- Desarrollo e ingeniería del producto o proceso.
- Pruebas y evaluación.
- Realización del producto.

En el apartado de la **toma de datos**, se recogen todas las cifras necesarias para cuantificar, dimensionar y controlar el proceso que se deseé diseñar. Este apartado es muy importante porque a partir de los datos iniciales se pueden plantear diversas alternativas a la hora de diseñar.

A continuación, está la fase de **evaluación y selección**, en la que se comparan las diversas alternativas atendiendo a los campos de la viabilidad económica y técnica del producto o proceso.

Seguidamente, una vez se ha seleccionado el proceso a realizar, entramos en la fase del **desarrollo e ingeniería del proceso**, donde se desarrolla, se dimensiona y se construye un prototipo.

En el apartado de **pruebas y evaluación**, se realizan todo tipo de ensayos o pruebas en el prototipo diseñado con el fin de comprobar que el trabajo realizado en las tres primeras fases ha sido correcto y realizar los últimos ajustes.

Para finalizar, una vez se ha comprobado que todo funciona correctamente, entramos en el apartado de la **realización del producto o proceso**, donde se escala el prototipo realizado o se pone en marcha la fabricación final del producto.

En el caso que nos concierne, tenemos la necesidad del desarrollo de un proceso industrial, en el que se utilizarán polímeros de ciclodextrinas con epíclorhidrina para adsorber el colorante procedente de baños de tintura.

Ante la novedad en el uso de polímeros de ciclodextrinas en el ámbito de la reutilización de colorantes, se han de realizar una serie de pasos previos hasta alcanzar el resultado final.

Se realizaran una serie de fases similares a las mencionadas anteriormente:



- **Búsqueda bibliográfica:** En la que se revisará la bibliografía sobre las ciclodextrinas, la formación de complejos de inclusión, y el uso de los mismos en el tratamiento de aguas.
- **Experimentación previa:** En este punto se sintetizarán los polímeros de ciclodextrina y epiclorhidrina, así como se realizarán todo tipo de ensayos para conocer y optimizar la adsorción de colorantes por parte de los diferentes tipos de polímeros de ciclodextrinas. Una vez cuantificada la adsorción, se utilizarán las ciclodextrinas con colorantes para tinter tejidos de algodón.
- **Planta piloto:** Sabiendo los tiempos de residencia de los colorantes en contacto con las ciclodextrinas, se diseñará un prototipo para comprobar y ajustar los datos obtenidos en el laboratorio antes del diseño del proceso final.
- **Escalado industrial:** Comprobados los resultados de laboratorio en la planta piloto, se procederá al escalado de la planta piloto a un nivel industrial capaz de operar en condiciones reales.

Todas estas fases se han representado en una línea temporal (**Tabla II-1**) con el objetivo de poder visualizar el proyecto completo, así como conocer las fechas en las que cada apartado debe acabar.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA
CAMPUS D'ALCOI

Diseño de un proceso de adsorción para
el tratamiento de aguas residuales de
baños de tintura mediante ciclodextrinas



Fases	2014						2015						2016					
	I	II	III	IV	V	VI	I	II	III	IV	V	VI	I	II	III	IV	V	VI
1. Estudio bibliográfico					■													
2. Síntesis del polímero					■													
3. Experimentación																		
3.1. Evaluación de capacidades de adsorción						■	■	■	■	■								
3.2. Evaluación de capacidades de tinción								■	■	■								
4. Prototipo																		
4.1. Diseño del prototipo									■	■								
4.2. Prueba del prototipo											■							
5. Reactor																		
5.1. Diseño del reactor										■	■							
5.2. Instalación												■						
5.3. Puesta en marcha del proceso													■	■				

Tabla II-1. Línea temporal del proyecto.



1. Experimentación previa

Atendiendo a las fases del diseño mencionadas anteriormente, es necesario realizar una toma de datos para el proceso, así como una evaluación y selección. En proyecto, estas dos fases se realizarán de forma conjunta a nivel de laboratorio. Primero, se realizará una síntesis de los polímeros necesarios a partir del método proporcionado por la Universidad Católica de Murcia.

El siguiente paso será el de evaluar las capacidades de adsorción de cada tipo de polímero a partir de una serie de ensayos. Finalizados estos ensayos, se realizará la evaluación de las capacidades de tinción de los polímeros una vez se han puesto en contacto con los colorantes.

Para finalizar, a partir de la toma de datos realizada, se calcularán los parámetros necesarios para un posterior desarrollo de una planta piloto donde realizar pruebas.

1.1. Síntesis del polímero epiclorhidrina-ciclodextrina

El primer paso a realizar en el laboratorio, es la síntesis de los polímeros de epiclorhidrina y las ciclodextrinas, para ello serán necesarios los siguientes reactivos:

Material	Proveedor	Fórmula
β-ciclodextrina	Sigma Aldrich	-
HP-β-ciclodextrina	Sigma Aldrich	-
γ-ciclodextrina	Sigma Aldrich	-
HP-γ-ciclodextrina	Sigma Aldrich	-
Hidróxido sódico	Sigma Aldrich	NaOH
Borohidruro sódico	Sigma Aldrich	NaBH ₄
Epiclorhidrina	Sigma Aldrich	C ₃ H ₅ ClO

Tabla II-2. Materiales para la síntesis del polímero.

La síntesis del polímero, comienza añadiendo a un vaso con camisa 13ml de NaOH al 40% p/p junto con 12ml de agua destilada. El siguiente paso consiste en añadir 30mg de NaBH₄, con ello conseguimos una disolución con un pH básico donde la epiclorhidrina podrá reaccionar. A continuación, se añadirán 12g de la ciclodextrina a utilizar, en este caso se han utilizado α -, β - y γ -ciclodextrinas sin modificar y β - y γ -ciclodextrinas modificadas con grupos hidroxipropil.

Una vez se ha puesto la ciclodextrina, se agita hasta que queden totalmente disueltas y se calienta la disolución hasta 50°C mediante recirculación de agua por la parte exterior de la camisa y se comienza a agitar. Cuando la temperatura de la mezcla a alcanzado los 50°C se añaden gota a gota y de forma lenta 110ml de epiclorhidrina, esto se hace así debido a que la reacción de polimerización es exotérmica y un aumento de 6-7°C provoca una reacción demasiado rápida en la que el producto no es válido.



Se observará que la viscosidad de la disolución aumenta conforme se va añadiendo epiclorhidrina hasta que finalmente se forma un polímero viscoso de color blanquecino aproximadamente a las 3 horas de haber comenzado a añadir la epiclorhidrina. Se añade acetona hasta cubrir el polímero, en este punto la masa viscosa se transforma en gránulos del polímero y se mantiene la temperatura y la agitación durante 10 minutos.

Para finalizar, se enfría el polímero hasta temperatura ambiente y se elimina la epiclorhidrina que no haya reaccionado con baños de acetona y agua al 50% v/v y se seca en el horno a una temperatura de 60°C durante 2 horas.

En la **Figura II-1** se muestra el montaje del reactor isoterma en el que se han sintetizado los polímeros de ciclodextrinas.



Figura II-1. Montaje del reactor.



1.2. Evaluación de las capacidades de adsorción

Para evaluar las capacidades de adsorción de diferentes colorantes por parte de los polímeros sintetizados, se utilizarán los siguientes colorantes:

Colorante	Proveedor	Tipo	Colour Index
Amarillo Directo 3R	Comercial Química Massó	Azoico	Direct Yellow 106
Rubí Directo BL	Comercial Química Massó	Azoico	Direct Red 83:1
Gris Superluz HT-GLL	Auxicolor	Azoico	Direct Black 112
Azul Directo HT-4GL	Auxicolor	Azoico	Direct Blue 78
Amarillo Tairus ARL-T	-	-	-

Tabla II-3. Colorantes directos.

Además, se trabajará con una tricromía con la siguiente composición:

- Amarillo tairus 96.24%
- Rubi Directo BL 3.00%
- Gris Superluz HT-GLL 0.736%

Se prepararán disoluciones de cada colorante a una concentración de 0.2g/l y se añade 1g de polímero a 50ml de la disolución. A continuación, se calienta a una temperatura de 50°C y se agita en un agitador magnético a 400rpm durante 2 horas en las que se tomarán muestras cada 20 minutos.

Las muestras se analizarán en el espectrofotómetro Evolution 60S UV-Visible a la longitud de onda máxima de cada colorante y, mediante una recta de calibrado se calculará la concentración.

Los datos con relación a la adsorción de los colorantes estarán disponibles en el anexo, a excepción de una muestra correspondiente al colorante Azul HT-4GL que será utilizada como ejemplo.

- Absorbancia de la disolución respecto a diferentes ciclodextrinas:

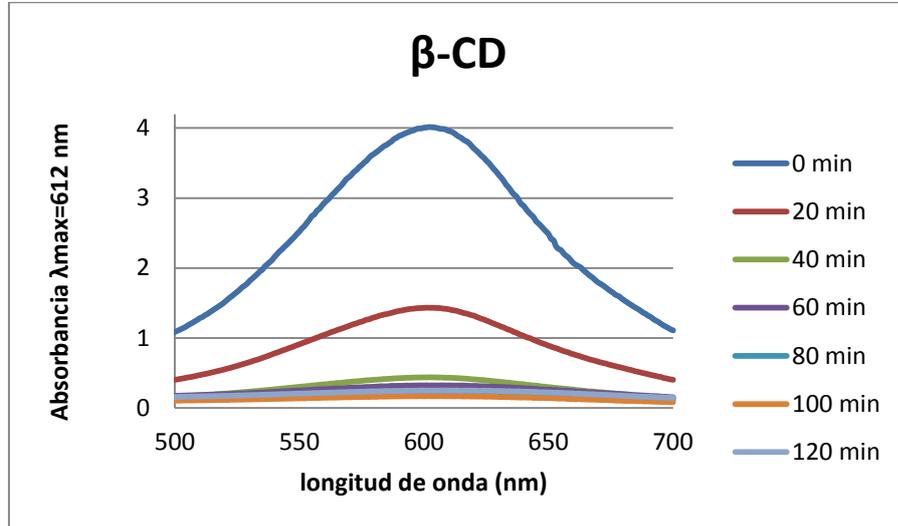


Figura II-2. Absorbancia con el polímero de β-CD.

- Comparación del colorante encapsulado por las diferentes ciclodextrinas:

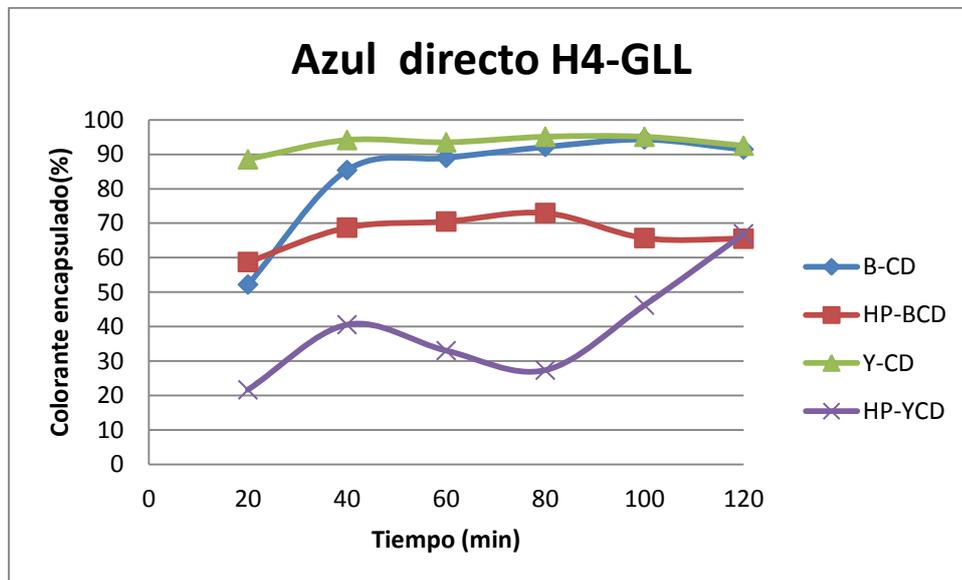


Figura II-3. Colorante encapsulado por diferentes ciclodextrinas.



- Comparación del color después del contacto con las ciclodextrinas:

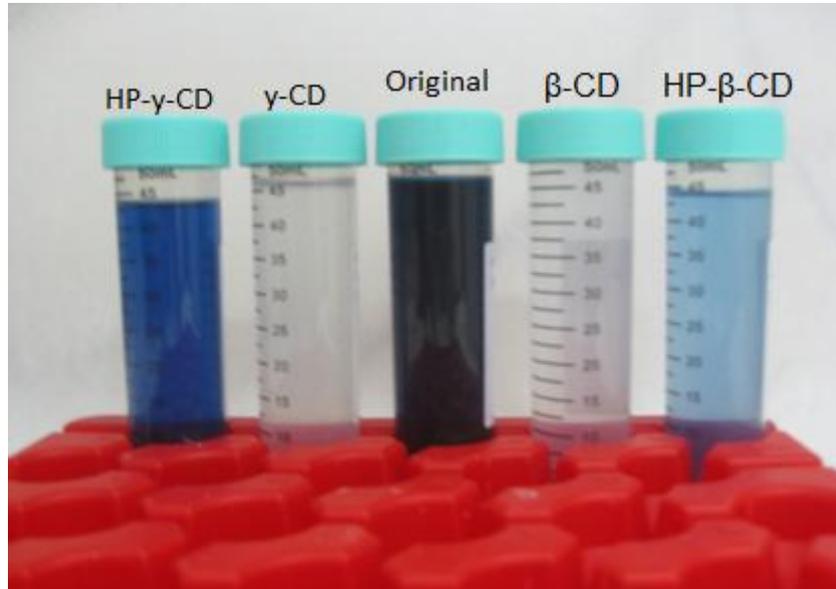


Figura II-4. Comparación visual de las diferentes disoluciones a los 120 min.

A partir de los ensayos realizados con los diferentes polímeros de ciclodextrinas y los diferentes colorantes, se llega a la conclusión de que el polímero con las mejores capacidades de adsorción es el formado por γ -CD+epiclorhidrina*.

*Los resultados de todos los ensayos pueden ser consultados en el anexo encontrado en el documento que acompaña a esta memoria.

1.3. Evaluación de las capacidades de liberación

Finalizados los ensayos de adsorción de los colorantes, el siguiente paso consiste en evaluar las capacidades de cada polímero y colorante en la tinción de fibras de algodón. Los ensayos se han realizado sobre tejidos de 5 gramos de algodón al 100%.

En la **Tabla II-4** se muestran las condiciones de tintura:

Polímeros con colorantes directos			
% s.p.f	Relación de baño	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
6	1:20	95	60

Tabla II-4. Condiciones de tintura.

La temperatura y el tiempo se han seleccionado a partir de la curva de agotamiento de los colorantes directos sobre celulosa que se muestra a continuación:

La temperatura y el tiempo se han seleccionado a partir de la curva de agotamiento de los colorantes directos sobre celulosa que se muestra a continuación:

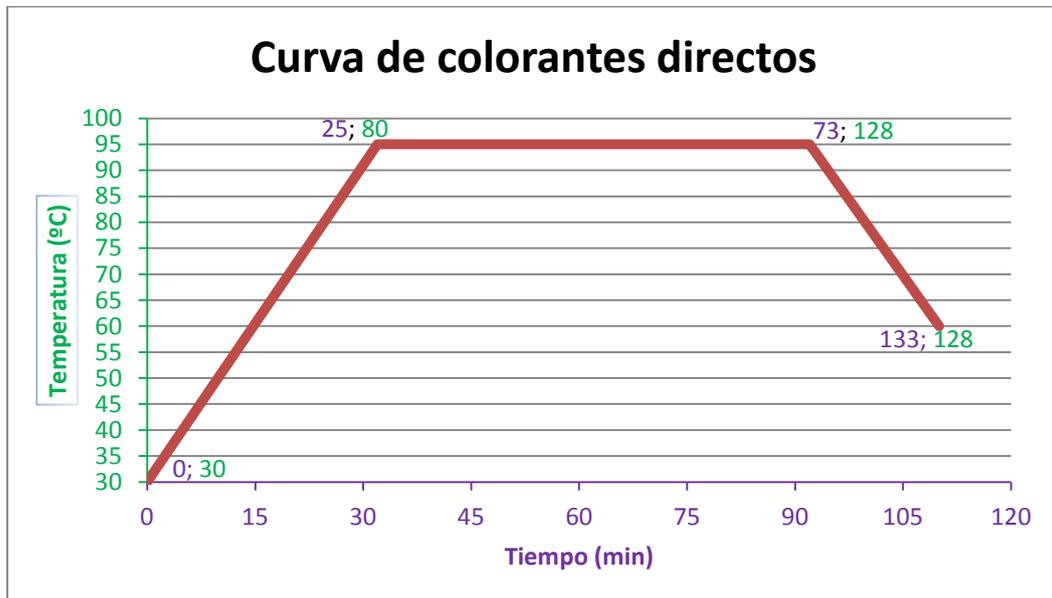


Figura II-5. Curva de colorantes directos.

Como auxiliar en la tintura, se añadirá sulfato sódico decahidratado proporcionado por Sigma Aldrich en una concentración de 15g/l.

Los ensayos serán realizados en un equipo equipado con un tambor rotatorio en el que se pueden controlar la velocidad de rotación, la temperatura, el incremento de temperatura y el tiempo.

Cada polímero será utilizado para tinter tres veces antes de volver a ser utilizado para adsorber colorantes de nuevo, como ejemplo se mostrarán los resultados obtenidos al tinter con las diferentes ciclodextrinas con el colorante Amarillo 3R.

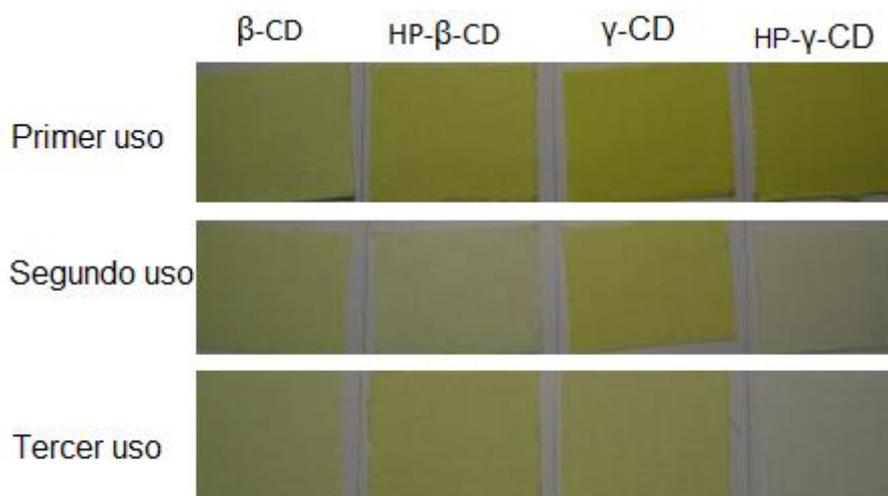


Figura II-6. Tejidos tintados con polímeros con Amarillo 3R

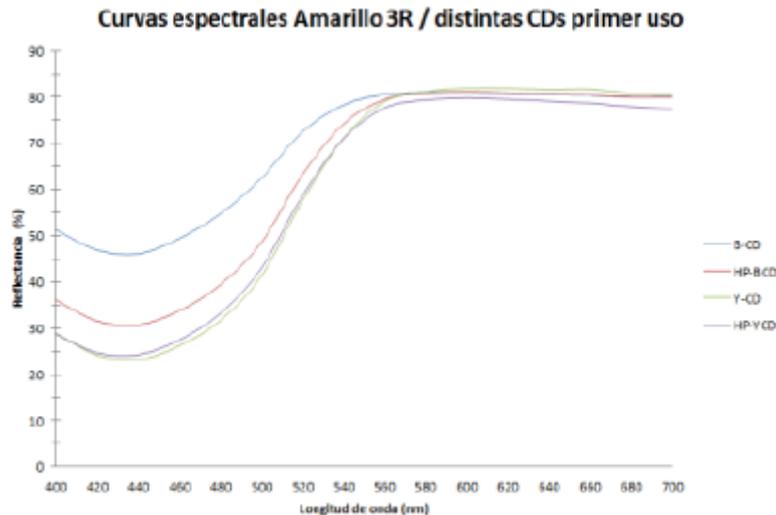


Figura II-7. Curvas espectrales.

Como se puede observar en la **Figura II-6** y **Figura II-7**, el polímero que mejores resultados da en el primer uso es el que está compuesto por la γ -ciclodextrina. Los resultados mostrados por los demás colorantes*, muestran una tendencia muy similar, por lo que los polímeros formados con la γ -ciclodextrina, son los más aptos para ser utilizados en la tintura.

*De la misma forma que en el apartado anterior, el resto de resultados pueden ser encontrados en el documento anexo al informe.

1.4. Cálculo del tiempo de residencia

Una vez comprobadas las capacidades de adsorción y se ha comprobado que ciclodextrina da mejores resultados, se calcula el tiempo de residencia de cada colorante. Debido a que hay ciertos colorantes que están bajo patente y no se conoce el peso molecular, se realizarán los cálculos a partir de distribuciones de tiempos de residencia, excepto para el colorante Azul directo HT-4GL que se hará mediante el cálculo de las constantes cinéticas, ya que si se conoce el peso molecular.

Comenzaremos con el colorante Azul HT-4GL:

El tiempo de residencia puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

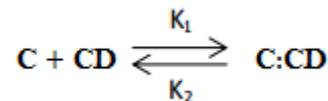
$$\tau = [C]_0 \cdot \int_0^x \frac{dx}{-rc}$$



Donde:

- $[C]_0$ es la concentración inicial del colorante (M).
- X es la conversión alcanzada.
- $-r_c$ es la velocidad de la reacción.

Sabiendo que la formación de complejos de inclusión se puede considerar como una ecuación de primer orden, podemos representarla de la siguiente forma:



La ecuación de la velocidad de reacción queda de la siguiente manera:

$$-r_c = K_1 \cdot [C] \cdot [CD] - K_2 \cdot [C:CD]$$

Para resolver la ecuación de la velocidad de reacción, se seguirán los pasos siguientes:

En la **Figura II-8** se muestra la absorbancia de la disolución de Azul HT-4GL al estar en contacto con las ciclodextrinas, mientras que en la **Figura II-9** está representada la recta de calibrado que relaciona la absorbancia con la concentración.

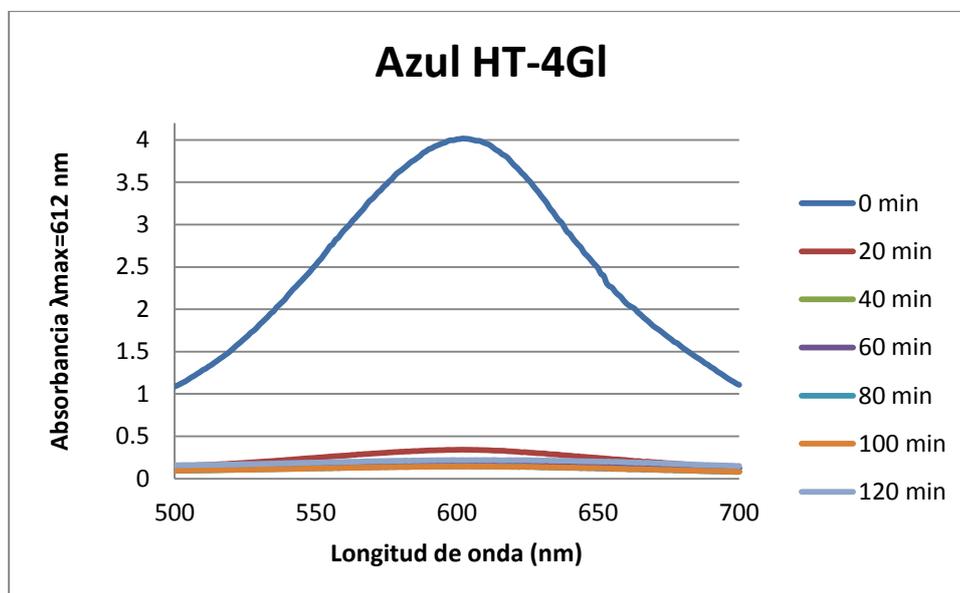


Figura II-8. Absorbancia Azul HT-4GL.

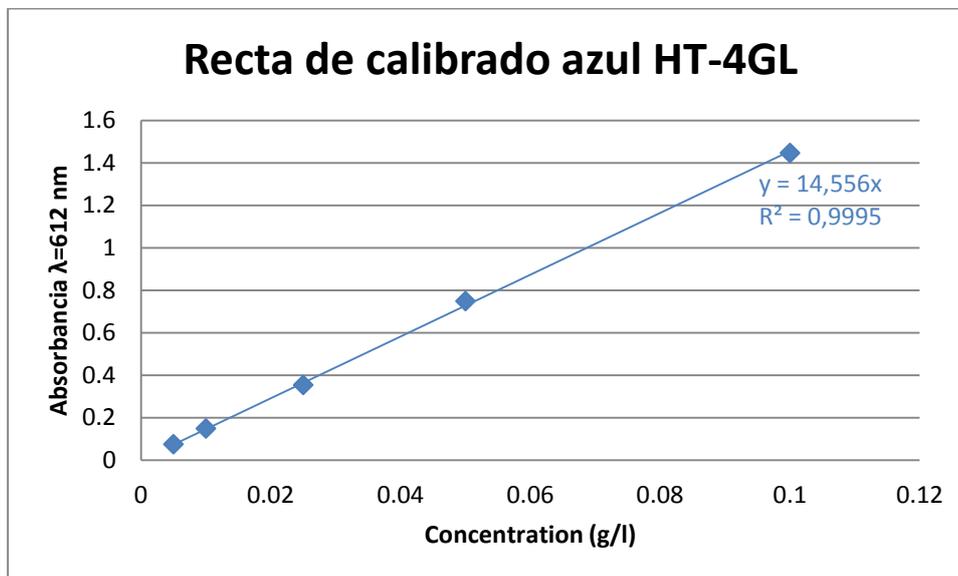


Figura II-9. Recta de calibrado Azul HT-4GL.

Con estos datos, se puede construir la siguiente tabla:

Tiempo (min)	Absorbancia (612nm)	Concentración (g/l)
20	0.3337	0.229
40	0.1708	0.0117
60	0.1902	0.0131
80	0.1430	0.0098
100	0.1434	0.0099
120	0.2189	0.0150

Tabla II-5. Concentración Azul HT-4GL.

El siguiente paso a realizar consiste en hacer un balance de concentraciones, para ello necesitaremos los siguientes datos:

- Peso molecular del colorante Azul directo HT-4GL: 1055.91 g/mol.
- Peso molecular de γ -CD: 1297 g/mol.
- Cantidad de ciclodextrinas en el polímero^{6,7}: 60%.

⁶ E. Renard et al,(1995) "Preparation and characterization of water soluble high molecular weight β -cyclodextrin-epichlorohydrin polymers" en "Eur. Polym. J. Vol. 33, No. 1, pp. 49-57"

⁷ JIANG Hongguo et al, (2012) "Immobilization of β -cyclodextrin as insoluble β -cyclodextrin polymer and its catalytic performance" en "Chinese journal of chemical engineering, 20(4) 784-792"



Sabiendo que en los ensayos se han utilizado 50ml de una disolución con una concentración de 0.2 g/l de colorante y 1g de polímero con ciclodextrinas, podemos calcular la concentración inicial del colorante y de la ciclodextrina.

- Concentración inicial del colorante:

$$[C]_0 = \frac{0.2 \frac{g}{l}}{1055.91 \frac{g}{mol}} = 1.89 \cdot 10^{-4} M$$

- Concentración inicial de las ciclodextrinas*:

$$[CD]_0 = \frac{12 \frac{g}{l}}{1297 \frac{g}{mol}} = 9.25 \cdot 10^{-3} M$$

*No se ha tenido en cuenta el peso molecular del polímero, solo el de la ciclodextrina. Además, solo se ha considerado que un 60% del polímero está formado por las ciclodextrinas.

Sabiendo las concentraciones iniciales y que la reacción global es de primer orden, podemos construir la siguiente tabla:

	[C]	[CD]	[C:CD]
Inicial	$1.89 \cdot 10^{-4}$	$9.25 \cdot 10^{-3}$	-
Reaccionan	$-1.8 \cdot 10^{-4}$	$-1.8 \cdot 10^{-4}$	$1.8 \cdot 10^{-4}$
Equilibrio	$9.33 \cdot 10^{-6}$	$9.07 \cdot 10^{-3}$	$1.8 \cdot 10^{-4}$

Tabla II-6. Balance de concentraciones.

Una vez tenemos las concentraciones en el equilibrio, podemos calcular la constante de equilibrio K_c a partir de la siguiente ecuación:

$$K_c = \frac{[C:CD]}{[C][CD]} = \frac{1.8 \cdot 10^{-4}}{9.33 \cdot 10^{-6} \cdot 9.07 \cdot 10^{-3}} = 2127.08$$

Para el cálculo de la constante directa de la reacción (K_1), se ha de realizar un ajuste en los datos como si se tratara de una reacción de segundo orden⁸ representando la inversa de la concentración frente al tiempo.

⁸ Xiyun Cai et al. (2011) "Adsorption mechanism-based screening of cyclodextrin polymers for adsorption and separation of pesticides from water" en "Water research 3499-3511"

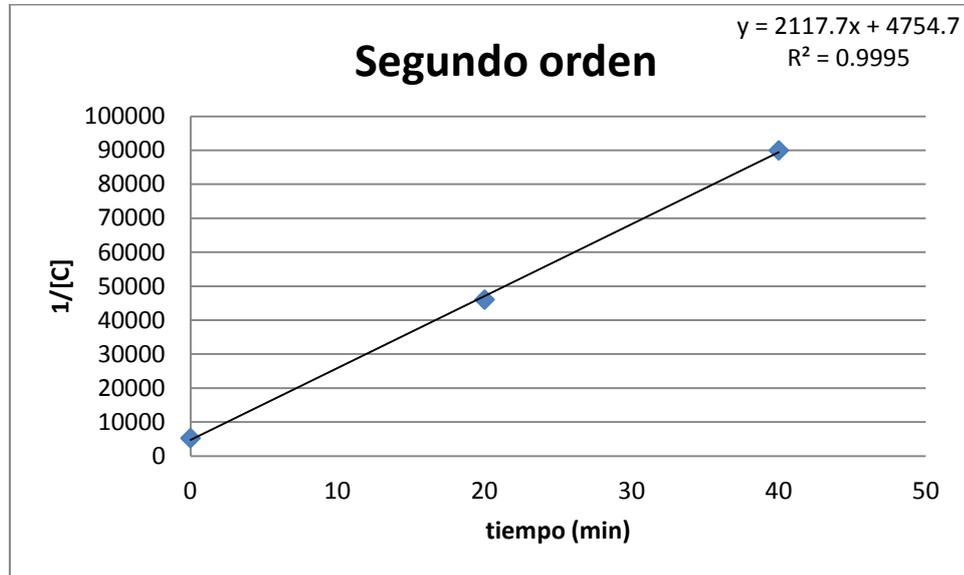


Figura II-10. Ajuste de segundo orden.

En la **Figura II-10** se han representado los datos de la inversa de la concentración frente al tiempo para, a partir de un ajuste por mínimos cuadrados, calcular la constante directa de la reacción, que se corresponde con la pendiente de la recta. Solo se han representado los primeros 40 minutos porque se considera que la reacción ya ha alcanzado el equilibrio.

Por lo que la constante directa de la reacción es:

$$K_1 = 2111.7$$

Sabiendo que la constante de equilibrio K_C está relacionada con el cociente entre la constante directa y la constante inversa, podemos calcular la constante inversa K_2 :

$$K_C = \frac{K_1}{K_2}$$

$$K_2 = \frac{K_1}{K_C} = \frac{2111.7}{2127.08} = 0.996$$

Conocidos los parámetros cinéticos de la reacción, podemos desarrollar la ecuación de la velocidad de reacción de la siguiente forma:

$$-r_C = K_1 \cdot [C] \cdot [CD] - K_2 \cdot [C:CD]$$

$$[C] = (1 - X)$$



$$[CD] = [CD]_0 - [C]_0 \cdot X$$

$$[C:CD] = [C:CD]_0 + [C]_0 \cdot X$$

$$-r_C = K_1 \cdot (1 - X) \cdot ([CD]_0 - [C]_0 \cdot X) - K_2 \cdot ([C:CD]_0 + [C]_0 \cdot X)$$

A continuación, añadimos el término de la velocidad de reacción desarrollado a la ecuación del tiempo de residencia, que queda de la siguiente manera:

$$\tau = [C]_0 \cdot \int_0^X \frac{dx}{K_1 \cdot (1 - X) \cdot ([CD]_0 - [C]_0 \cdot X) - K_2 \cdot ([C:CD]_0 + [C]_0 \cdot X)}$$

Y, la conversión puede calcularse como:

$$X = \frac{[C]_0 - [C]}{[C]_0} = \frac{1.89 \cdot 10^{-4} - 9.33 \cdot 10^{-6}}{1.89 \cdot 10^{-4}} = 0.95$$

Una vez conocidos todos los parámetros necesarios, podemos sustituir los valores en la ecuación y nos queda el siguiente resultado:

$$\tau = [C]_0 \cdot \int_0^X \frac{dx}{K_1 \cdot (1 - X) \cdot ([CD]_0 - [C]_0 \cdot X) - K_2 \cdot ([C:CD]_0 + [C]_0 \cdot X)}$$

Donde:

- $[C]_0$ es la concentración inicial del colorante ($1.89 \cdot 10^{-4}$ M).
- $[CD]_0$ es la concentración inicial de las ciclodextrinas ($9.25 \cdot 10^{-3}$ M).
- $[C:CD]_0$ es la concentración inicial de las ciclodextrinas con colorante (0).
- K_1 es la constante directa de la reacción (2111.7).
- K_2 es la constante inversa de la reacción (0.996).
- X es la conversión realizada (0.95).

Sustituyendo los datos en la ecuación y resolviendo la integral, obtenemos el siguiente valor:

$$\tau = 34.05 \text{ min}$$

Por tanto, el tiempo de residencia del colorante Azul HT-4GL en contacto con el polímero formado por γ -CD+epiclorhidrina será de 34.05 minutos.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA
CAMPUS D'ALCOI

Diseño de un proceso de adsorción para
el tratamiento de aguas residuales de
baños de tintura mediante ciclodextrinas



Debido a que los otros colorantes están protegidos bajo patente, no se puede conocer el peso molecular y calcular el tiempo de residencia pro el mismo método, por lo que se ha realizado una distribución de tiempos de residencia a partir de los datos obtenidos en el apartado



Evaluación de las capacidades de adsorción.

La expresión con la que se obtiene el tiempo de residencia puede expresarse de la siguiente forma:

$$\tau = \int_0^{\infty} t \cdot E(t) \cdot dt = \sum t_i \cdot E(t)_i \cdot \Delta t_i$$

Donde E(t) representa la edad de salida.

Como resultado, obtenemos una tabla con los tiempos de residencia para el resto de los colorantes, con un error de un $\pm 13\%$ debido a que la concentración del colorante no llega a ser 0 y la integral de la curva E(t) (que representa la cantidad de colorante en tanto por 1 que ha sido eliminado) no es igual a la unidad.

Colorante	Tiempo de residencia (min)
Azul HT-4GL	34.05
Amarillo Tairus	41.42
Gris HT-GLL	34.4
Rubi BL	47.31
Amarillo 3R	38.59
Tricromía	50.05

Tabla II-7. Tiempos de residencia.

2. Planta piloto

Una vez conocidos los tiempos de residencia de los colorantes y, elegido el tipo de ciclodextrina a utilizar, se pretende diseñar un prototipo del reactor con su respectivo agitador, con el fin de poder comprobar los resultados obtenidos a partir de los ensayos en el laboratorio y, finalmente, escalar el prototipo de la planta piloto a nivel industrial capaz de soportar la producción de una empresa real.

2.1. Diseño del prototipo

El prototipo será un reactor de acero inoxidable con un espesor de 2mm, ya que por las propiedades de los baños de tintura y los polímeros de ciclodextrina no es necesario el uso de ningún material en concreto por temas de corrosión o riesgos.

El cuerpo del prototipo constará de un cilindro como cuerpo principal con un diámetro de 300mm y una altura de 500mm. De la parte inferior del cuerpo del reactor, saldrá un cono con una inclinación de 45º respecto a la horizontal para evitar problemas con la turbulencia a la hora de agitar. Este cono estará anclado con bisagras al cuerpo del reactor para poder



abrirlo, ya que, entre el cono y el cuerpo se encontraran telas filtrantes de poliéster sobre láminas de acero perforadas que se encargaran de separar el polímero del agua. En la parte superior, se pondrá una tapa móvil donde se encontrará alojado el agitador.

La entrada al reactor se efectuará por una tubería regulada por una válvula, mientras que la salida se realizará por la parte inferior del cono ayudada por una bomba de succión.

El prototipo se ha diseñado con el fin de trabajar de forma discontinua con volúmenes de 30l sin embargo, el volumen total del reactor es de 39.4, esto es así porque para garantizar una correcta agitación es recomendable dejar vacío 1/3 de la altura total del reactor.

La temperatura de trabajo será de 50°C y, debido a las propiedades del proceso global, el baño a tratar no debe ser calentado.

En cuanto a la cantidad de polímero a introducir, se mantendrá la relación entre el área interfacial del polímero y el volumen de disolución que se ha usado en los ensayos a nivel de laboratorio.

Para ello necesitaremos los siguientes datos:

- Densidad del polímero de γ -CD: 1200g/l.
- Diámetro medio de las partículas: 230 μ m

Con estos datos es posible calcular el área proporcionada por el polímero a partir del cociente entre el volumen ocupado en el reactor por el polímero entre el volumen de una partícula esférica de diámetro 230 μ m y se multiplica por el área de una esfera del mismo tamaño.

Con ello tenemos que la cantidad de polímero a utilizar en el prototipo es de 600g.

2.2. Diseño del agitador

El agitador es una parte importante del prototipo, debido a que gracias él se producirá una mezcla homogénea del polímero y permitirá una elevada relación del área interfacial de las partículas del polímero con la disolución, consiguiendo así una buena difusión del colorante a través del polímero y permitiendo la formación de los complejos de inclusión.

En la **Figura II-11** y **Figura II-12**⁹, podemos ver el esquema donde están representadas las variables a tener en cuenta en el diseño de un agitador de palas, así como las ecuaciones con las que calcular las dimensiones recomendadas.

⁹ PERRY. 1994. "Manual del Ingeniero Químico". Sexta edición. Mc. Graw-Hill.

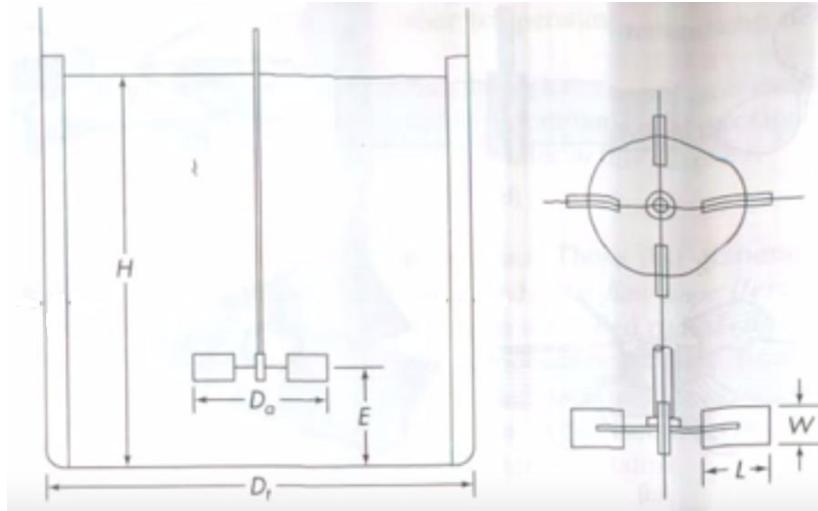


Figura II-11. Esquema agitador.

$$\frac{D_a}{D_T} = \frac{1}{3} \qquad \frac{E}{D_T} = \frac{1}{3}$$

$$\frac{W}{D_a} = \frac{1}{5} \qquad \frac{L}{D_a} = \frac{1}{4}$$

Figura II-12. Correlaciones para el dimensionamiento de un agitador.

Sabiendo que diámetro total (D_T) son 300mm y la altura del fluido, contando con el cono inferior, (H) 425mm, podemos calcular el resto de parámetros necesarios para el agitador:

- **Diámetro del impulsor (D_a):** 100mm.
- **Altura del impulsor respecto a la base del cuerpo (E):** 100mm.
- **Ancho de las palas (W):** 20mm.
- **Longitud de las palas (L):** 25mm.

En cuanto a la potencia del agitador, nos encontramos con un régimen turbulento dentro del reactor, por lo que para el cálculo de la potencia no depende del Número de Fraude ni del Número de Reynolds, por lo que para agitar a una velocidad de 400r.p.m se necesita una potencia de 0.75Kw.

3. Escalado industrial



A falta de conocer los resultados de los ensayos realizados en el prototipo, se procede a diseñar un reactor con capacidad para tratar los baños de tintura producidos por un proceso real, en el que se generan baños residuales con un volumen 3m^3 .

Debido a que los procesos de tintura se realizan de forma discontinua, el reactor trabajará de la misma manera. El material del que será fabricado será el mismo que el utilizado para el prototipo.

3.1. Diseño del reactor

Para garantizar una correcta agitación que permita tener una mezcla homogénea, se dejará $1/3$ de la altura del reactor vacía.

El cuerpo principal del reactor, tendrá una altura de 3.9 metros de altura y una base cilíndrica con un diámetro de 1.1m, con lo que el volumen del cilindro será de 3.7m^3 . El tronco cónico que saldrá de la parte inferior del cilindro, tendrá una altura de 1 metro y una inclinación de 63° , con lo que el volumen total alcanzará los 4.05m^3 . La entrada al reactor se realizará por la parte superior, mientras que la salida se hará por la parte inferior ayudada por una bomba. Para retirar el polímero, se abrirá el reactor por la parte del cono inferior y se retirará junto con la tela filtrante.

La temperatura de trabajo será de 50°C y, debido a las propiedades del proceso global, el baño a tratar no debe ser calentado.

El reactor trabajará de forma discontinua, ya que el agotamiento de los baños de tintura se produce de la misma forma.

Para calcular la cantidad de polímero a utilizar dentro del reactor, se utilizará la misma relación entre el área interfacial proporcionada por el polímero y el volumen total de la disolución a tratar que se ha calculado a nivel de laboratorio y para el prototipo. Con lo que la cantidad de polímero a utilizar será de 60Kg.

3.2. Diseño del agitador

En la **Figura II-11** y **Figura II-12**¹⁰, podemos ver el esquema donde están representadas las variables a tener en cuenta en el diseño de un agitador de palas, así como las ecuaciones con las que calcular las dimensiones recomendadas.

Siguiendo las mismas consideraciones que con el prototipo a la hora de dimensionar el agitador necesario, obtenemos un agitador con las siguientes medidas:

¹⁰ PERRY. 1994. "Manual del Ingeniero Químico". Sexta edición. Mc. Graw-Hill.



Sabiendo que diámetro total (D_T) son 1100mm y la altura del fluido, contando con el cono inferior, (H) 2800mm, podemos calcular el resto de parámetros necesarios para el agitador:

- **Diámetro del impulsor (D_a):** 366.67mm.
- **Altura del impulsor respecto a la base del cuerpo (E):** 366.67mm.
- **Ancho de las palas (W):** 73.33mm.
- **Longitud de las palas (L):** 91.66mm.

A partir de las dimensiones calculadas, buscaremos en un catálogo comercial las palas para el agitador que más se ajusten.

Las condiciones de agitación en el reactor son muy similares a las del prototipo, nos encontramos en el régimen turbulento y la agitación será de 400r.p.m. Por lo que la potencia necesaria para la agitación será de 1.5Kw¹¹.

¹¹ <http://agitacion.opt-ing.com/>

III. Presupuesto

En el presupuesto, se recogen todos los costes que se han de afrontar en la realización del proyecto, por lo que se tendrá en cuenta el coste del personal, los reactivos empleados en la investigación, los costes relacionados con el diseño y fabricación del prototipo y el reactor y los costes generales de uso.

Atendiendo a la **Figura I-1**, donde se muestra el diagrama de proceso general para la fabricación y acabado de fibras, el cambio a realizar consiste en añadir una etapa de proceso adicional, en la que el baño de tintura se hace pasar por el reactor y, el polímero con el colorante encapsulado se utiliza para sustituir en parte o totalmente al colorante utilizado como materia prima inicial del siguiente baño.

En la **Figura III-1** se muestra como quedaría el proceso una vez se ha instalado el reactor:

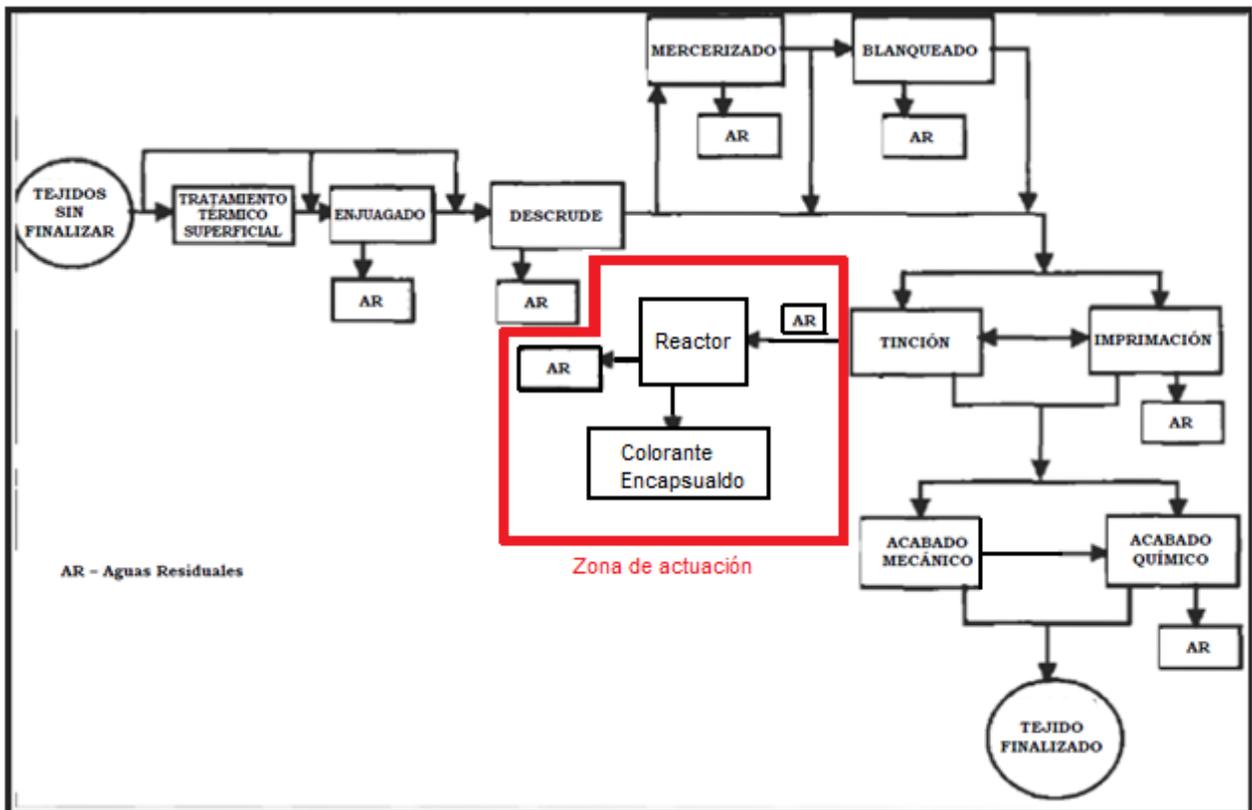


Figura III-1. Proceso modificado.

A continuación, se muestran tablas donde quedan recogidas los costes previstos para la realización e implantación del proceso:



Desglose de costes de inversión	costes totales (€)	% del total
1. Prototipo	5500	32.84
1.a Agitador	500	2.99
1.b Obra civil	2000	11.94
1.c Material	2500	14.93
1.d Bomba	500	2.99
2. Reactor	11250	67.16
2.a Agitador	1000	5.97
2.b Obra civil	4500	26.87
2.c Material	5000	29.85
2.d Bomba	750	4.48
TOTAL	16750	100.00

Tabla III-1. Costes de inversión.

En los costes de inversión se refleja el gasto de los equipos necesarios tanto como para la puesta en marcha de la planta piloto como para la puesta en marcha del proceso final.

IV. Valoración económica

En este apartado, se realizará una valoración económica con el fin de conocer la viabilidad económica del proyecto, para ello se evaluará los costes de operación y mantenimiento y los costes fijos.

1. Costes de operación y mantenimiento

Los costes de operación y mantenimiento tienen en cuenta el coste de los reactivos y productos necesarios durante el funcionamiento del proceso. En la se muestran los costes de los reactivos necesarios:

Costes de operación y mantenimiento	Coste	Unidad
1. Agua	2.07	€/m ³
2. Energía	0.044027	€/Kwh
3. Polímero con ciclodextrinas	46.239	€/g
4. Amarillo Directo 3R	13.25	€/Kg
5. Rubí Directo BL	6.79	€/Kg
6. Gris Superluz HT-GLL	11.73	€/Kg
7. Amarillo Tairus	11.12	€/Kg
8. Azul Directo HT-4GL	14	€/Kg
9. Sulfato sódico	0.0299	€/Kg

V. Bibliografía

- Bekers, O., et al (1991) “cyclodextrins in the pharmaceutical field” en “Drug development and industrial pharmacy”, 17 (11). 1503-1549.
- Duchene, D., Wouessidjewe, D. (1990). “Pharmaceutical uses of cyclodextrines and derivatives” en “Drug development and industrial pharmaceutical” 16, 2487-2499.
- Xiyun Cai, et al (2011) “Adsorption mechanism-based screening of cyclodextrin polymers for adsorption and separation of pesticides from water” en “water research” 45 3499-3511



- XU Wenying, et al (1989) “Studies on the polymerization of β -cyclodextrin with epichlorohydrin” en “Chinese journal of polymer science” Vol.7 No.1.
- E. Renard et al,(1995) “Preparation and characterization of water soluble high molecular weight β -cyclodextrin-epichlorohydrin polymers” en “Eur. Polym. J. Vol. 33, No. 1, pp. 49-57”
- JIANG Hongguo et al, (2012) “Immobilization of β -cyclodextrin as insoluble β -cyclodextrin polymer and its catalytic performance” en “Chinese journal of chemical engineering, 20(4) 784-792”
- Xiyun Cai et al. (2011) “Adsorption mechanism-based screening of cyclodextrin polymers for adsorption and separation of pesticides from water” en “Water research 3499-3511”
- PERRY. 1994. “Manual del Ingeniero Químico”. Sexta edición. Mc. Graw-Hill.
- <http://www.sigmaaldrich.com/>
- Gerardo Martínez (2007) “Ciclodextrinas: Complejos de inclusión con polímeros” en “Revista iberoamericana de polímeros vol.8(4)”.
- <https://es.wikipedia.org/>
- <http://www.quiminet.com/>
- <http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/>
-



VI. Relación de figuras

Figura I-1. Diagrama de proceso de tratamientos a tejidos.....	3
Figura I-2. Estructura del colorante Direct Blue 78.....	4
Figura I-3. Estructura del colorante Disperse Blue 73.....	5
Figura I-4. Grupos cromóforos.	5
Figura I-5. Estructura de las zeolitas.....	9
Figura I-6. Polímeros de quitosano y fibras teñidas.	10
Figura I-7. Estructura de las ciclodextrinas.	11
Figura II-1. Montaje del reactor.	16
Figura II-2. Absorbancia con el polímero de β -CD.	18
Figura II-3. Colorante encapsulado por diferentes ciclodextrinas.....	18
Figura II-4. Comparación visual de las diferentes disoluciones a los 120 min. .	19
Figura II-5. Curva de colorantes directos.	20
Figura II-6. Tejidos tintados con polímeros con Amarillo 3R	20
Figura II-7. Curvas espectrales.	21
Figura II-8. Absorbancia Azul HT-4GL.	22
Figura II-9. Recta de calibrado Azul HT-4GL.	23
Figura II-10. Ajuste de segundo orden.	25
Figura II-11. Esquema agitador.....	29
Figura II-12. Correlaciones para el dimensionamiento de un agitador.	29
Figura IV-1. Proceso modificado.	32



VII. Relación de tablas

Tabla II-1. Línea temporal del proyecto.....	14
Tabla II-2. Materiales para la síntesis del polímero.....	15
Tabla II-3. Colorantes directos.	17
Tabla II-4. Condiciones de tintura.....	19
Tabla II-5. Concentración Azul HT-4GL.	23
Tabla II-6. Balance de concentraciones.	24
Tabla II-7. Tiempos de residencia.	27
Tabla IV-1. Presupuesto total.....	33
Tabla IV-2. Desglose de costes del reactor.....	¡Error! Marcador no definido.