

Universidad de Costa Rica

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Química

***Evaluación de los parámetros de operación para la Unidad de
Clarificación mediante un sistema DAF en un Molino de Producción
de Papel Kraft***

Proyecto de graduación sometido a la consideración de la

Escuela de Ingeniería Química

Como requisito final para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería
Química

Alejandro Rubén Morales Quesada

A94237

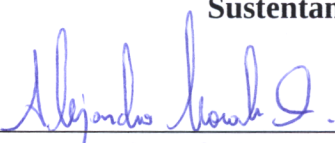
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

San José, Costa Rica


2019

Proyecto de graduación sometido a consideración de la Escuela de Ingeniería Química como requisito final para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Química

Sustentante



Alejandro Morales Quesada


Aprobado por


M.Sc. Randall Ramírez Loría, Presidente


Lic. Luis Alejandro Briceño Mena, Director


Lic. Natalia Montero Rambla, Lectora


Lic. Esteban Gamboa Gamboa, Lector


Mag. Bernardo Mora Gómez, Miembro invitado

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio
2019

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco primeramente a Dios por darme la sabiduría, la paciencia, la perseverancia y la experiencia que he adquirido en estos años tanto en el ámbito universitario como laboral.

A mis padres y a mi esposa Katherine por el apoyo brindado en este largo camino.

Al director de CCAL Kenneth R, por ayudarme a marcar los primeros pasos académicos.

A la empresa Empaques Santa Ana primeramente por brindarme un trabajo, permitiéndome el crecimiento profesional, capacitarme y darme el espacio para el desarrollo del presente proyecto.

A mi amigo Jorge G, de la empresa Quiticol ST.SA. por el apoyo brindado.

A cada uno de los compañeros y profesores que compartieron cada vivencia académica. Don Olman Gamboa de la Escuela de Ingeniería Química por el acompañamiento en cada trámite.

Al director Luis A Briceño, así como a los lectores Esteban G y Natalia M, por darme el apoyo, acompañamiento y confianza necesaria para la ejecución de este proyecto.

RESUMEN

El presente proyecto se realizó en el molino papelerero de la Empresa Empaques Santa Ana ubicada en El Coyol de Alajuela desde junio 2018 hasta febrero 2019. El objetivo general fue investigar, seleccionar y evaluar un tratamiento de régimen químico que permitiera alcanzar una mejora en términos de eficiencia de remoción de turbidez y rendimiento económico de la unidad de clarificación DAF instalada como unidad de separación en el circuito de aguas de proceso de fabricación de papel Kraft, unidad que trata 700 m³/h de agua proveniente de las mesas de formación, permitiendo la separación de las partículas sólidas y coloidales proveniente del material reciclado, sin producir su saturación y la dependencia del consumo de agua fresca.

Se partió de un tratamiento químico dual compuesto de coagulante a base inorgánica de policloruro de aluminio catiónico PAC y un floculante aniónico Andifloc 1122, con el cual se obtenía una remoción de turbidez promedio de 65.18% y un costo anual de 364 269.82 dólares. Con esto se realizó el diseño experimental el cual fue desarrollado en un equipo de jarras, prueba que simuló la etapa de clarificación a escala de laboratorio dosificando otros químicos propuestos para el tratamiento. Se evaluó el efecto sobre la variable de respuesta remoción de turbidez en varias corridas de gramajes de papel en producción. Mediante un diseño factorial se analizaron los factores principales que permitieron seleccionar el coagulante orgánico catiónico a base poliamina Q-180 y el floculante aniónico en polvo QAN-93 como el mejor tratamiento dentro de los factores y niveles propuestos. Además, que la dosificación de coagulante Q-180 entre 20 y 10 ppm no presentaba un efecto significativo sobre la remoción de turbidez a nivel de laboratorio.

Se procedió con el ensayo del tratamiento seleccionado en el DAF a partir de las mismas dosificaciones del tratamiento inicial, ajustando la dosis de coagulante hasta 10 ppm según el criterio obtenido del ensayo en laboratorio.

Se realizaron las mediciones de turbidez en las corrientes de entrada y salida al DAF, para lo cual se obtuvo un promedio de remoción de turbidez de 75.71% con 10 ppm de coagulante Q-180 y 8 ppm de floculante QAN-93, una mejora de 10.53% sobre la variable respuesta remoción de turbidez. Al proyectar el análisis de costo para el tratamiento propuesto, se obtiene un costo mensual de 259 926.55 dólares, lo cual significa un ahorro proyectado de hasta 104 343.27 dólares al año, respecto al tratamiento inicial.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	iii
ÍNDICE DE CUADROS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. PROCESO DE FABRICACIÓN DE PAPEL	5
CAPÍTULO 2. PROCESO DE SEPARACIÓN <i>DAF</i> (<i>Dissolved air flotation</i>)	13
2.1. PRINCIPIO DE SOLUBILIDAD DE AIRE EN AGUA:	13
2.2. FUNCIONAMIENTO:.....	13
2.3. PRINCIPIO DE LA VELOCIDAD CERO:	14
2.4. PARTES DEL CLARIFICADOR <i>DAF</i>	15
2.4.10. TUBO DISOLVEDOR DE AIRE (ADT, <i>Air Dissolved tube</i>).....	18
2.4.11. SUMINISTRO DE AIRE:	18
2.5. APLICACIONES DEL PROCESO <i>DAF</i> EN LA INDUSTRIA PAPELERA	22
CAPÍTULO 3. VARIABLES QUE AFECTAN EL PROCESO DE CLARIFICACIÓN.	23
3.1. SÓLIDOS.	23
3.2. pH.....	23
3.3. DOSIFICACIÓN DE COAGULANTE Y FLOCULANTE.....	23
3.4. TEMPERATURA.....	23
3.5. DISPOSICIÓN DE LOS LODOS	24
3.6. MANTENIMIENTO.....	24
CAPÍTULO 4. ARREGLOS DE PRESURIZACIÓN EN EL SISTEMA <i>DAF</i>	25
4.1. FLUJO ALIMENTACIÓN TOTAL PRESURIZADO	25
4.2. FLUJO ALIMENTACIÓN PARCIAL PRESURIZADO	25
4.3. FLUJO RECIRCULADO PRESURIZADO	26
CAPÍTULO 5. PROCESO DE COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN:.....	29
5.1. COAGULACIÓN:	29
5.2. FLOCULACIÓN:	30
5.3. SELECCIÓN DEL COAGULANTE:	30
5.4. SELECCIÓN DEL FLOCULANTE:	31
5.5. EL MÉTODO DE JARRAS:.....	31
5.6. PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS:.....	31

5.7. DETERMINACIÓN DE LAS DOSIFICACIONES DE COAGULANTE	33
5.8. DETERMINACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN DE FLOCULANTE.....	34
CAPITULO 6. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	35
6.1. DISEÑO EXPERIMENTAL:.....	35
6.2. EQUIPO Y CRISTALERIA	36
6.3. ESCALAMIENTO AL DAF.....	37
CAPÍTULO 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS	43
7.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	43
7.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS EN DAF.....	48
7.3. ANÁLISIS DE COSTO PARA LA APLICACIÓN <i>DAF</i>	52
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	55
8.1. CONCLUSIONES	55
8.2. RECOMENDACIONES	55
BIBLIOGRAFÍA.....	57
NOMENCLATURA	59
APÉNDICE A. RESULTADOS EXPERIMENTALES	60
A.1. DATOS EXPERIMENTALES.....	60
APÉNDICE B. RESULTADOS INTERMEDIOS	63
APÉNDICE C. RESULTADOS FINALES.....	64
APÉNDICE D. MUESTRA DE CÁLCULO.....	65
APÉNDICE E. PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA DE JARRAS	68
APÉNDICE F. INFORMACIÓN TÉCNICA DE LOS PRODUCTOS QUÍMICOS.....	69
APÉNDICE G. FICHAS TÉCNICAS DE LOS PRODUCTOS QUÍMICOS.....	71
APÉNDICE H. COTIZACIÓN DEL TRATAMIENTO QUÍMICO ENSAYADO EN EL DAF.	77
APÉNDICE I. VARIABLES DE DISEÑO DE UN <i>DAF</i>	78
I.1. VOLUMEN DEL TANQUE DE FLOTACIÓN <i>V</i>	78
I.2. TIEMPO DE RETENCIÓN <i>T</i>	78
I.3. GEOMETRÍA DEL CLARIFICADOR.	78
I.4. CAUDAL DE AIRE.....	79
APÉNDICE J. DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO <i>DAF</i>	80

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.1. Consumo promedio de gua en diferentes molinos papeleros de Europa (m ³ /ton papel).	10
Cuadro 1.2. Fuentes de agua de los molinos papeleros (m ³ /ton papel).	10
Cuadro 6.1. Matriz del arreglo factorial 2 ⁴ propuesto.....	35
Cuadro 6.2. Especificaciones del equipo utilizado	36
Cuadro 6.3. Equipos empleados para el proceso de separación DAF del proyecto.	38
Cuadro 6.4. Características del agitador en tanque de preparación floculante.	41
Cuadro 7.1. Resumen de datos de los resultados experimentales a escala de laboratorio y en el DAF.	51
Cuadro 7.2. Detalle del tratamiento químico utilizado en el DAF, comparación de las condiciones iniciales, sistema propuesto y su proyección anual \$/año.	53
Cuadro A1. Mediciones de la turbidez entrada, salida y remoción % de turbidez del DAF, con el programa químico inicial, en el periodo de junio-julio 2018.	60
Cuadro A.2. Corrida preliminar a nivel de laboratorio con tratamiento químico inicial.	61
Cuadro A.3. Resultados de remoción de turbidez para el diseño factorial definido para la prueba de jarras, aleatorizando las corridas con el estadístico Minitab 18 versión gratuita.....	61
Cuadro B.1. Resultados promedio del agua blanca (entrada) y el agua depurada (salida) medidas en el DAF, en el periodo junio-julio 2018.	63
Cuadro B.2. Medición de turbidez de alimentación al DAF, a diferentes condiciones de gramaje y velocidad de producción de papel.	63
Cuadro C.1. Mediciones de la turbidez entrada, salida y remoción % de turbidez del DAF, con el programa propuesto.....	64
Cuadro F.1. Propiedades fisicoquímicas del tratamiento coagulante-floculante, condiciones iniciales.....	69
Cuadro F.2. Propiedades fisicoquímicas de los 2 coagulantes y floculantes propuestos.	69
Cuadro F.3. Características de venta de los coagulantes y floculantes propuestos.	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Equipo utilizado para la desintegración de la materia prima.....	5
Figura 1.2. Equipo utilizado para la refinación de la pulpa	6
Figura 1.3. Esquema de una mesa de formación	7
Figura 1.4. Esquema de una sección de prensas.....	8
Figura 1.5. Esquema de la sección de secado.....	9
Figura 2.7. Consumo de agua fresca del Molino Coyol, desde el año 2017.	12
Figura 2.4. Esquema de conexión bomba de presurización y elementos de control del ADT.....	21
Figura 2.5. Esquema bridado de las membranas formadoras de micro-burbujas en el ADT	21
Figura 4.1. Sistema DAF con sistema de flujo de alimentación total presurizado.....	25
Figura 4.2. Sistema DAF con sistema de flujo alimentación parcial presurizado.....	26
Figura 4.3. Sistema DAF con sistema de flujo de recirculación presurizado.	27
Figura 5.1. Correlación del potencial Z con el pH y muestra del punto isoeléctrico de inestabilidad por coagulación.	32
Figura 5.2. Correlación del potencial Z (mV), y la turbidez (NTU),	34
Figura 5.3. Correlación de la turbidez residual (NTU) y la cantidad de carbono total orgánico ..	34
Figura 6.1. Equipo de medición empleado para mediciones de agua de proceso.....	37
Figura 6.2. a) DAF del fabricante Krofta SPC 36. b) Tubo ADT 2500 del DAF instalado, bomba de presurización y medidores de aire, instalados en Molino papelerero Empaques Santa Ana.	39
Figura 6.3. Coagulante Q-180 y Floculante QAN-93 ensayados en el DAF.	40
Figura 6.4. Dosificación de químicos al DAF.....	42
Figura 7.1. Prueba de jarras.....	43
Figura 7.2. Efecto del gramaje, sobre la turbidez del agua blanca (entrada al DAF).	44
Figura 7.3. Efecto de la turbidez de entrada (NTU) sobre el % de remoción de turbidez con coagulante Q-180 a 10 ppm y floculante QAN-93 a 8 ppm.	45
Figura 7.4. Gráficas del modelo estadístico a) supuesto normalidad, b) supuesto varianza constante, c) supuesto de independencia y d) diagrama de pareto (Salida del programa estadístico Minitab 18).....	46
Figura 7.5. Interacción de factores para la remoción de turbidez, según salida del programa Minitab 18 versión gratuita.....	47
Figura 7.6. Gráfica de efectos principales de remoción de turbidez.....	47
Figura 7.7. Muestreo de las corrientes de alimentación y salida del DAF	49
Figura 7.8. Resultados promedio de cada tratamiento ensayado.....	51
Figura 7.9. Floculación en el DAF con el tratamiento químico propuesto, 10 ppm de coagulante Q-180 y 8 ppm de floculante QAN-93.....	52
Figura 7.10. Tendencia del Volumen de Producción del Molino Coyol.....	53
Figura G.1. Ficha técnica del Coagulante utilizado inicialmente base PAC.....	71
Figura G.2. Ficha técnica del Floculante utilizado inicialmente Andifloc 1122.....	72
Figura G.3. Ficha técnica del Coagulante propuesto Q-180.....	73
Figura G.4. Ficha técnica del Coagulante propuesto polymin SK.....	74
Figura G.5. Ficha técnica del Floculante propuesto QDC-0223.....	75
Figura G.6. Ficha técnica del Floculante propuesto QAN-93.	76

Figura H.1. Cotización de los productos químicos cotizados para el tratamiento propuesto ensayado en el DAF.	77
Figura I.1. Tabla de dimensiones y requerimientos según la capacidad de agua a tratar.	79
Figura I.2. Dimensiones para selección tipo de tubo, según flujo de aire requerido.....	79

INTRODUCCIÓN

El presente proyecto tiene como objetivo principal la determinación de los parámetros de operación que permitan alcanzar una mejora a la etapa de separación utilizando una unidad clarificadora *DAF*, mediante su tratamiento químico. Su importancia radica en la necesaria reutilización del agua tratada en corrientes específicas del proceso de fabricación de papel sin afectar el desempeño de los químicos utilizados para dar resistencia al producto terminado, lo cual permite reducir el consumo de agua fresca extraída del pozo subterráneo.

El proceso *DAF* es un método de separación que utiliza como mecanismo el arrastre de partículas por medio de aire disuelto *Dissolved air flotation (DAF)*. Es una operación unitaria que se fundamenta en la diferencia de densidad entre las sustancias a separar, según su naturaleza fisicoquímica catalizada con aire y productos químicos de floculación. Tiene una gran aplicación en la separación de sólidos indeseados en el agua de proceso de la industria papelera, después del proceso de formación del papel.

Esto mediante la separación de minerales y coloides indeseados, que se retiran en el lodo prensado después de la separación *DAF*. Dicha separación se mide con la remoción de turbidez a través del *DAF*.

La turbidez en el circuito de aguas de la industria papelera es una variable no deseada, causada por:

- Partículas sólidas de tamaño reducido “finos” que no aportan resistencia al papel y absorben 16 veces más los químicos específicos adicionados, por mayor área superficial. Así mismo estas partículas son difíciles de retener en las mallas de formación y causan espuma al saturarse, generando puntos débiles en la hoja de papel y variaciones al peso longitudinal.
- Es proporcional a la carga aniónica coloidal, asociada a residuos de material orgánico, aceites, gomas, tintas y metales pesados provenientes de la materia prima reciclada, que interfieren en el desempeño de polímeros adicionados para mejorar las propiedades de resistencia del papel como almidón, agentes de resistencia en seco, resistencia en húmedo y encolados.

El proyecto se realizó en el Molino de fabricación de Papel Kraft de la Compañía Empaques Santa Ana, en El Coyol de Alajuela, única industria dedicada a la elaboración de este tipo de papel en el país. Esta empresa fabrica rollos de papel a partir de cartón 100% reciclado,

estableciendo el desarrollo de la actividad como un proceso de producción amigable con el ambiente.

La empresa se mantiene en operación las 24 horas del día, efectuando paros de 12 horas mensuales para realizar actividades de mantenimiento programado en equipos que por su importancia en el proceso y alto costo no tienen un equipo de reemplazo.

Esta empresa produce 2 tipos de papel, *MEDIUM* y *LINER*, ambos en bobinas cilíndricas independientes de aproximadamente 2.5 ton, los cuales son convertidos a cajas en las corrugadoras de sus clientes. La unidad de venta del papel es el kilogramo.

El papel *MEDIUM*, es el papel que se corruga “ondulado” y se utilizará como capa intermedia en las láminas de cada caja, para amortiguar los golpes del producto empacado. El papel *LINER* es el papel que conformará la lámina interna y externa, ambas tienen contacto con el corrugado *MEDIUM*. La lámina de liner externa es la que debe salir con mejor acabado, en cuanto a limpieza y color, pues será impresa con la información del producto empacado.

Se utilizan 2 tipos de materia prima, el *Old Corrugated Container* (OCC), el cual es un material post consumo, por ende, más contaminado, y el *Dark Kraft Liner* (DKL), el cual es un material pre-consumo, residuo de las máquinas corrugadoras. Ambas constituyen el papel reciclado.

En operaciones normales de inventario y equipos de limpieza en uso, todo el papel *MEDIUM* se fabrica con 100% OCC y el *LINER* externo con 50% OCC y 50% DKL.

Otra característica importante detallada en el pedido de cada cliente es el gramaje, según su uso. El gramaje del papel depende del uso final de la caja de cartón, y se define como el peso por unidad de área.

$$\text{gramaje} = \frac{\text{peso}}{\text{area}} \left(\frac{g}{m^2} \right) \quad (1.1)$$

El rango de gramaje fabricado es desde 112 hasta 300 g/m^2 .

Para la reutilización del agua de proceso, se encuentra instalado un clarificador *DAF* del fabricante krofta, modelo SPC 36. La corriente de entrada al *DAF* se denomina en la jerga papelería como “*agua blanca*”, la cual se obtiene del drenaje de las mesas de formación de la hoja de papel por gravedad y de los elementos de vacío. La corriente de salida aceptada se denomina “*agua depurada*”. Se utiliza para regulación de consistencia, diluciones de equipos de limpieza y control de perfil de peso de la hoja de papel. La corriente retirada como rechazo se

conoce como “lodo” constituido por partículas muy finas y materia coloidal floculada, que luego es calificada como desecho sólido.

Mediante una investigación bibliográfica, se definió un diseño experimental para la evaluación de productos químicos adecuados encontrados en el mercado. Se realizó el análisis de efectos de los factores y su interacción (mediante el programa estadístico Minitab 18 versión gratuita). Con esto, se define un tratamiento que mejore las condiciones iniciales y evaluarlo mediante escalamiento en el *DAF*.

Finalmente se evaluó el rendimiento del tratamiento propuesto en el *DAF* a nivel de remoción de turbidez y de costo.

CAPÍTULO 1. PROCESO DE FABRICACIÓN DE PAPEL

El proceso de fabricación de papel Kraft comprende cinco etapas principales de operación, preparación de pasta, refinación, formación, prensado y secado. Entre cada etapa hay elementos de transporte, controladores y sincronización que son específicos de la operación. A continuación, se describen brevemente las principales.

1.1. Preparación de pasta:

Esta etapa inicia con el transporte de las materias primas por medio de bandas transportadoras hacia a un equipo de molienda llamado pulper. Este equipo cuenta con un rotor impulsado por un motor y un reductor. En este equipo se da el primer contacto del material reciclado con el agua de proceso. La desintegración ocurre en la parte cercana a la agitación producto de la hidratación y choque entre fibras. Es esta etapa se ubican subetapas de limpieza de contaminantes en la materia prima en caso de ser reciclada. La mezcla de agua y fibra se conoce como pulpa. La concentración de fibra en el agua se mide con un parámetro llamado consistencia. Una vez desintegrado a nivel macro, la pulpa es transportada a la zona de refinación. En la figura 1.2 se muestra el esquema de un pulper (Holik, 2006).

En el Molino de Empaques Santa Ana hay instalados dos bandas transportadoras que descargan el material reciclado a dos pulper donde se da el contacto con el agua de proceso para su desintegración. La consistencia de operación de 5%, así mismo hay instalados equipos de limpieza para materiales pesados y plásticos.

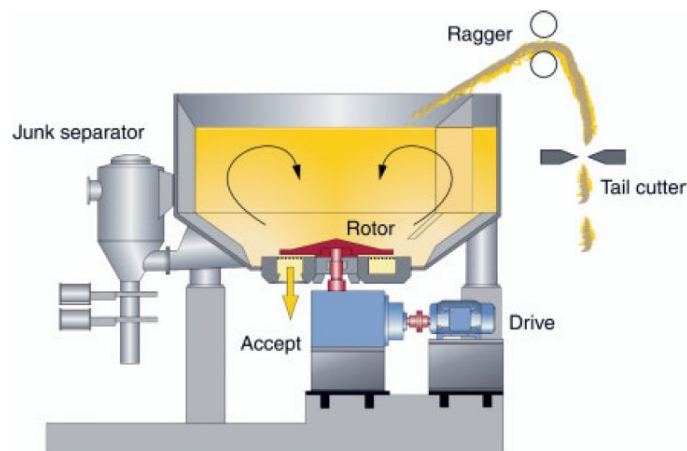


Figura 1.1. Equipo utilizado para la desintegración de la materia prima (Holik, 2006).

1.2. Refinación:

La refinación es un tratamiento dado a las propiedades de las fibras, siendo una mezcla de los efectos de fibrilación y corte, las cuales son primordiales para las propiedades de resistencia y lisura de la hoja de papel. Se da por medio de un equipo llamado refinador, el cual usa un motor y dos o más caras de discos que friccionan la pulpa. El grado de refinación se mide con un Canadian Standard Tester. En la figura 1.3 se muestra las partes de un refinador (Holik, 2006).

En el Molino de Empaques Santa Ana tiene instalados cuatro refinadores de doble disco con un tamaño de 24", para trabajar 600 GPM de pasta a una consistencia de 6%. Esta es la zona de mayor consumo de energía eléctrica. Como complemento se utilizan enzimas de bio refinación.

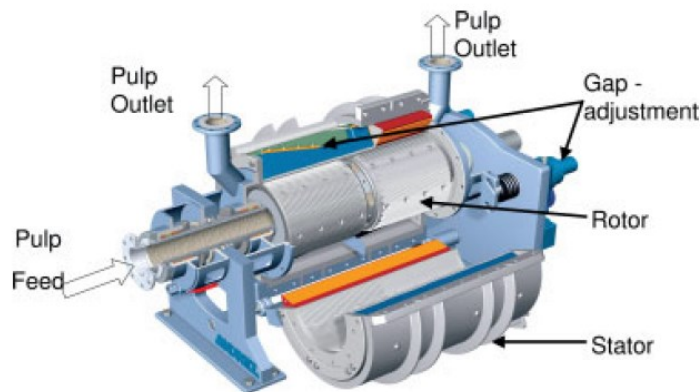


Figura 1.2. Equipo utilizado para la refinación de la pulpa (Holik, 2006).

1.3. Formación:

La formación consiste en producir una hoja de papel con un gramaje uniforme y con resistencia, lo cual se logra con la inmersión de grandes cantidades de agua, se tiene como referencia a menos de 1% de consistencia. Este proceso se da por medio de una caja presurizada que da velocidad a la suspensión de pulpa y lo deposita en una malla formadora girada por un rodillo acoplado a un motor eléctrico a la misma velocidad del chorro de pulpa. La malla formadora, tiene capacidad de retener las partículas y drenar la mayor cantidad de agua posible. El agua formada es retornada al proceso como agua blanca y normalmente regresada al proceso mediante un sistema de limpieza. Luego de formada la hoja, se da inicio al drenaje por gravedad y con el uso de vacío, pasando luego a la sección de prensas. En la figura 1.4 se muestra un esquema de una mesa de formación (Holik, 2006).

En el Molino de Empaques Santa Ana tiene instaladas dos mesas de formación que complementan el peso base final del papel en una composición de 60-40%. La consistencia de formación

objetivo es de máximo 1%. Cuenta con un control automático de sincronización de velocidad y control de perfil para mantener el peso homogéneo de la hoja de papel en todo su ancho. Además, cuenta con drenaje natural, bajo y alto vacío para el drenaje del agua, que es alimentada en etapas posteriores al clarificador DAF para su reutilización en diferentes partes del proceso como controladores reguladores de consistencia, diluciones de perfil y etapas de limpieza.

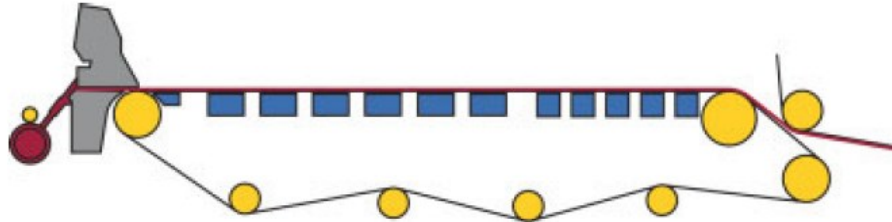


Figura 1.3. Esquema de una mesa de formación (Holik, 2006).

1.4. Prensado.

La operación de prensado tiene como objetivo disminuir la humedad de la hoja de papel desde 80% a 50% mediante la aplicación de fuerza hidráulica por medio de rodillos con recubrimientos diseñados específicamente para la operación. Normalmente las cargas hidráulicas pueden ser de hasta 150 bar. En las zonas de contacto entre dos rodillos se ubica la hoja de papel y un fieltro. El fieltro es un transportador capaz de absorber el agua liberada de la superficie de la hoja y luego liberar dicha agua en las cajas de succión con vacío aplicado. En la figura 1.5 se muestra un esquema de la sección de prensas. Después de este proceso, continúa la sección de secado. (Holik, 2006). El Molino de Empaques Santa Ana, tiene instalado un sistema de prensas trinip equipado con rodillos de recubrimientos en su mayoría a base de poliuretano y otros con cajas de succión en su interior para retirar la mayor cantidad de agua posible previo a la entrada a secadores.

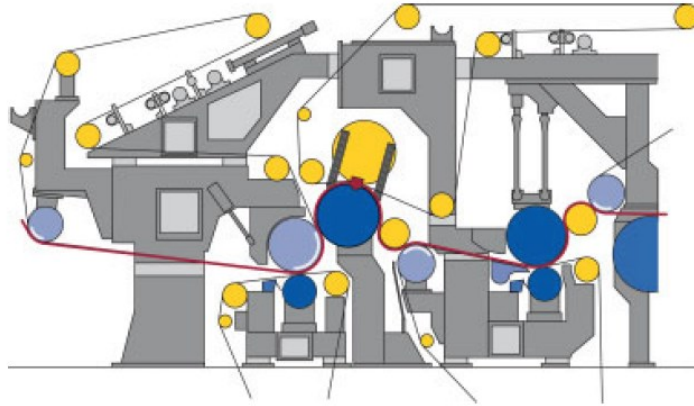


Figura 1.4. Esquema de una sección de prensas (Holik, 2006).

1.5. Secado:

La sección de secadores tiene como objetivo disminuir la humedad de la hoja desde 50%, hasta la humedad requerida del producto terminado la cual normalmente varía de 7 a 9%. Entre menos humedad contiene la hoja de papel, cada vez es más difícil disminuir su humedad interna. Por esto es necesario el secado térmico. Dicho proceso requiere el uso de vapor saturado, el cual se transporta al interior de varios secadores, que al calentar su superficie produce la transferencia de calor al papel hasta el punto de evaporación. En dicha sección la hoja es guiada por medio de lonas secadores que marcan el inicio y fin de cada sección. El calor es aplicado de manera ascendente, controlando la presión del vapor. La sección de secadores, debido al requerimiento de combustible para la producción del vapor es la etapa de mayor costo en la producción de papel. En la figura 1.6 se muestra un esquema de la sección de secadores. El proceso termina con el bobinado, y rotulación de las bobinas (Holik, 2006).

El Molino de Empaques Santa Ana cuenta en su tren de secado, con 46 secadores cromados en su superficie, repartidos entre 6 secciones, las cuales operan en el rango de 5 a 10 bares de presión, utilizando vapor saturado proveniente de una caldera de biomasa. La temperatura máxima medida es de 152 °C en los que operan a mayor presión de vapor. El consumo aproximado es de 2.1 kg de vapor por kg de papel producido.

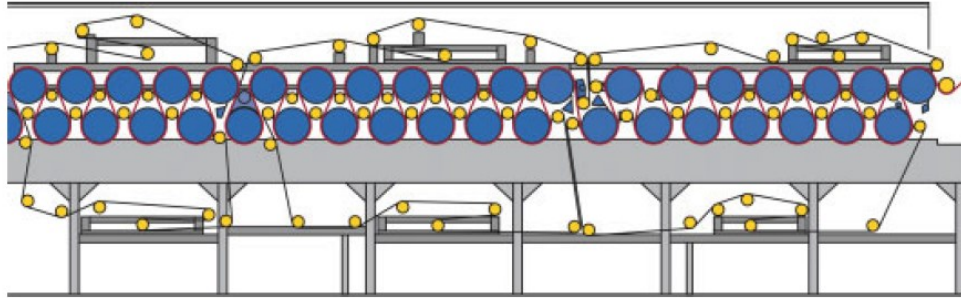


Figura 1.5. Esquema de la sección de secado (Holik, 2006).

1.6. Agua en la industria papelera:

El agua es un componente primordial en la industria de fabricación de papel. En los procesos de conversión de papel reciclado se utiliza para la conformación de la pulpa, depuración de contaminantes, transporte, acondicionamiento mecánico “refinado” y tratamiento químico de las fibras celulósicas, así como en la formación de la hoja de papel, las cuales son etapas esencialmente relacionadas con propiedades de resistencia del producto terminado.

Siendo la primera etapa de conformación de la pulpa, la que requiere mayor volumen de agua. El contenido de humedad en la materia prima reciclada y producto terminado se encuentra entre el rango 6-9%, lo cual es bajo en comparación con el volumen de agua requerido en el proceso de fabricación (Aznar, 2002).

La fuente de agua fresca consumida en los molinos papeleros proviene principalmente de las aguas terrestres, por lo que sus condiciones iniciales pueden depender de las condiciones de la zona. De no ser posible, es importante la gestión de abastecimiento de un acueducto (Yu, 2006).

En la década de 1960, el consumo de agua para la fabricación de papel era de 120 m³/ton. Según datos de la Asociación Española de Fabricantes de Pasta, Papel y Cartón (ASPAPPEL) en 1990 el consumo de agua fresca era de 33,4 m³/ton, y han logrado reducir su consumo a 8.7 m³/ton (ASPAPPEL. Asociación Española de fabricantes de pasta, 2017).

A partir del 2001, aunque son minoría se tiene registro de molinos papeleros en Norteamérica y Europa que registran consumos de 2-10 m³/ton. De las empresas consumidoras de agua del 2003, la industria papelera, solo después de la industria de químicos, es la segunda industria con mayor consumo de agua en el mundo, representando el 14.54% del consumo por todas las industrias de manufactura.

Cuadro 1.1. Consumo promedio de agua en diferentes molinos papeleros de Europa (m³/ton papel) (Bajpai, 2017).

Molino	Producción (ton/día)	Consumo de Agua m ³ /día	Consumo de Agua m ³ /ton
Molinos papeleros con pulpa integrada a partir de madera			
1	650	44.480	67
2	1200	39.320	33
3	290	20.000	69
4	900	122.400	136
5	145	2700	19
Molinos papeleros con pulpa no integrada a partir de material reciclado			
1	120	1000	9
2	900	32.600	36
3	22	230	11
4	185	145	1
5	15	740	49
6	148	2800	19

En 2016 se tiene referencia de molinos de papel reciclado en Colombia Cartonera Nacional y Carvinsa en Perú donde el consumo de agua fresca ha alcanzado los 5 m³/ton papel (Díaz, 2017).

En la última década los esfuerzos de la industria papelera por reducir el consumo de agua fresca, ha llevado a esta industria en algunos casos a no tener efluente de agua tratada, haciendo los circuitos de agua de proceso cada vez más cerrados. El recurso hídrico requerido a partir del año 1996 ha sido cubierto con la misma agua recirculada, según se muestra en el Cuadro 1.2 (Yu, 2006).

Cuadro 1.2. Fuentes de agua de los molinos papeleros (m³/ton papel) (Yu, 2006).

Año	Agua Terrestre	Agua Superficie	Agua comprada	Agua reciclada
1996	33.3	7.9	3.7	54.6
1994	52.5	6.9	13.4	26.7

Los sólidos suspendidos o coloidales en el agua blanca de proceso afectan el desempeño de la química del lado húmedo, agentes de fijación, encolado, retención y drenaje, agentes de resistencia en húmedo y resistencia en seco. En algunas condiciones serias los depósitos insolubles pueden causar problemas de pitch, acumulación de mugre en el papel, generando adicionalmente problemas de erosión y corrosión en las tuberías, equipos y malos olores. Esto puede afectar de forma directa o indirecta la capacidad de producción (Rojas Gaona, 2003).

El agua blanca proviene de las mesas de formación. Contiene rellenos tales como arcillas, carbonato de calcio propias de la materia reciclada y gomas. Estas sustancias orgánicas e inorgánicas en parte se encuentran solubles “coloides” y puede estar también en forma de sólidos suspendidos o fibras de corta longitud “finos”. Los finos son partículas celulósicas o coloidales con un tamaño menor a 76 micrómetros (pasan a través de una malla 200 *mesh*). Se generan naturalmente en la madera y en la fabricación de papel durante los procesos de pulpeo, blanqueo y refinación. Tienen una gran área superficial con gran capacidad de enlace de baja energía. Los sólidos suspendidos, la insuficiencia de oxígeno, espumas, olores fomentan la degradación del material orgánico (Ruben Miranda, 2009).

Cabe mencionar que el consumo de agua fresca en el Molino papelerero de Coyol donde se realiza el presente proyecto mantiene un consumo hídrico promedio de 574 m³/día desde el año 2017 según se muestra en la Figura 1.7 y un valor asociado a la producción de aproximadamente 3 m³/ton, lo cual se perfila entre los niveles más bajos investigados. El agua fresca es extraída de un pozo subterráneo que cuenta con todos los permisos de funcionamiento.

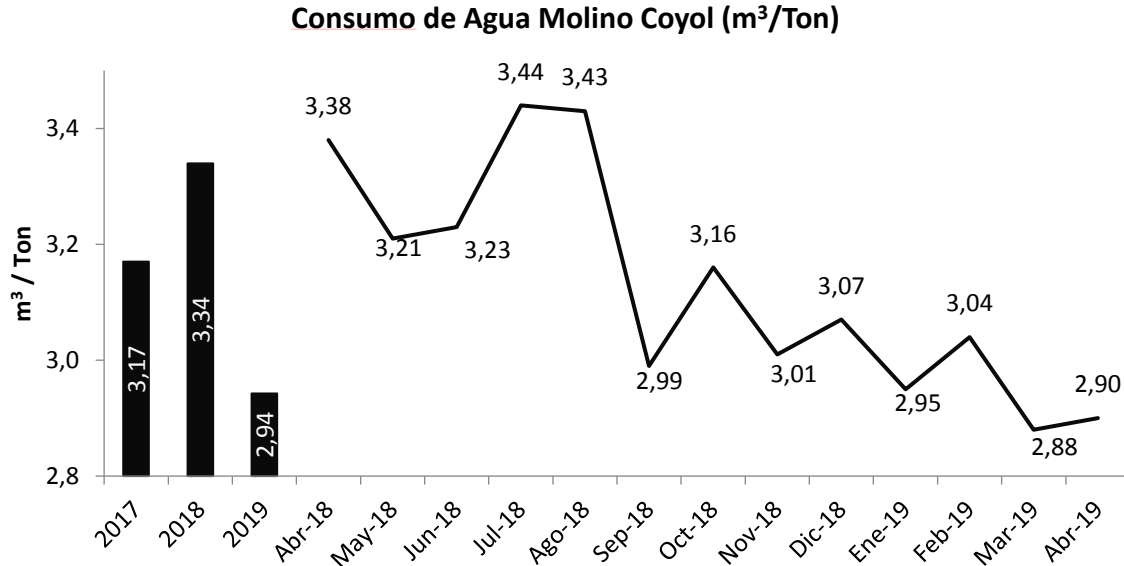


Figura 6.7. Consumo de agua fresca del Molino Coyal, desde el año 2017.

1.7. Consecuencia del cierre de los circuitos de agua en la industria papelera.

La necesaria reducción de consumo de agua de la industria ha producido una recirculación mayor del agua blanca en el sistema, saturándose la concentración de sustancias contaminantes como carbohidratos, grasas, ácidos grasos libres, resinas, colofonias, alcoholes, proteínas y sustancias fenólicas como lignina y taninos (Liu, Yang, & Ni, 2010).

Así mismo se han buscado alternativas para reducir el agua para duchas de limpieza como baterías de filtros con retro-lavado, sistemas reductores de partículas y coloides, incluso causando cerrando totalmente el vertido. Algunos problemas presentados son:

- Limitación del desarrollo ramificado e hidratado de la fibra “encapsulado”.
- Limitación de la velocidad de la máquina por taponamiento de las mallas de formación y espumas que afectan el drenaje.
- Incremento de precipitados, incluyendo sales inorgánicas y depósitos orgánicos “*slime*” que pueden dar una mala apariencia en la hoja de papel.
- Incremento de microorganismos debido a la alta concentración de los orgánicos y de la temperatura, virus, bacterias protozoarias como flageladas son comunes; generando en caso malos olores en el papel.
- Incremento en la dureza, causando un alto poder incrustante dando lugar a precipitaciones de carbonato de calcio (CaCO₃) en tuberías.
- Incremento en la concentración de sólidos representados como DQO y SST.

- Afectación de la química del lado húmedo.
- Incremento de la temperatura del sistema.
- Exposición de equipos a alta corrosión debido al incremento de material disuelto en el agua blanca.
- Taponamiento de boquillas de limpieza de vestiduras: mallas, fieltros y lonas (Ruth Ordoñez, 2009).

Algunas consideraciones previas para la disminución de estos problemas son:

- Evaluación del balance global del sistema de agua.
- Separar el circuito de agua de enfriamiento y que recircule sin contaminarse.
- La eficiencia de regaderas de limpieza usadas en fieltros y mallas de formación.
- El tipo de bacterias y uso necesario de biocidas (Yu, 2006).

CAPÍTULO 2. PROCESO DE SEPARACIÓN DAF (*Dissolved air flotation*)

El proceso *DAF* es un método de separación que utiliza como principio la diferencia de densidad entre las sustancias, utilizando como medio el arrastre de partículas con la disolución de aire en agua a 5 bar de presión. Es utilizado para la separación por flotación de sólidos y coloides suspendidos en el agua. Puede ser continuo o *batch* (Lawrence Wang, Guss, & Krofta, 2010).

En la separación son modificadas las características fisicoquímicas de las sustancias a separar. En un primer paso es un tratamiento físico conformado por la flotación con aire de las partículas. En un segundo paso la atracción entre las burbujas de aire y las partículas es en principio un resultado de la carga superficial de las partículas causado por el tratamiento químico permite la remoción de material orgánico (fenómeno de adsorción y electrocoagulación) de iones nitrógeno, fósforo y otros metales. La posterior floculación permite la resistencia para la separación mecánica. La eficiencia de la flotación aumenta al utilizar aditivos coagulantes que forman flóculos que fomentan la flotación y choque con las microburbujas (Habibzadeh & Gurbanov, 2004).

2.1. PRINCIPIO DE SOLUBILIDAD DE AIRE EN AGUA:

De acuerdo a la ley de Henry, la solubilidad de un gas como el aire, en una solución acuosa aumenta con el incremento de la presión. La ley de Henry es aplicable cuando la temperatura y presión son constantes, y bajas concentraciones del soluto gas “aire” en el líquido “agua”.

$$p_B = H_B x_B \quad (2.1)$$

Donde H_B es la constante de Henry expresada en atm/fracción mol; x_B es la fracción molar de B en el líquido y p_B es la presión parcial de B en el gas. La constante de Henry depende de la Presión, temperatura y composición de la mezcla (Wankat, 2008).

2.2. FUNCIONAMIENTO:

El agua alimentada pasa a través de un tubo disolvedor de aire y son mezclados rápidamente dentro del tubo por 10 segundos antes de llegar a la salida del tubo (ubicado al centro del tanque de flotación), el agua saturada con aire se mezcla con el agua cruda.

La entrada al tanque de flotación se da a través de una junta rotativa en el centro del tanque, pasando seguidamente dentro del ducto de distribución, mediante el principio de velocidad cero el proceso toma el estado transiente en la cámara de flotación. Esto significa que la eficiencia de

flotación se incrementa enormemente a casi el límite máximo teórico. En términos prácticos, esto permite una mejor clarificación en superficies más pequeñas y en tanques más profundos.

La caída de presión ocurre principalmente en la válvula de fricción la cual se encuentra entre el tubo de disolución del aire y la cámara de flotación, esto permite minimizar el efecto de turbulencia producto de la despresurización.

La súbita reducción en la presión en la cámara de flotación resulta en la liberación de burbujas de aire microscópicas (Estas microburbujas pueden ser de un diámetro de 30-50 micras) que en conjunto se unen con los sólidos y coloides suspendidos en el agua de proceso en la cámara de flotación.

Se libera la presión dentro de clarificador a presión atmosférica, el aire no se puede mantener en solución y se libera hacia la superficie, arrastrando las partículas a separar.

El cucharón espiral toma el lodo flotado, vertiéndolo en el centro estacionario donde es descargado por gravedad para ser prensado y desechado.

El agua clarificada es removida por tuberías de extracción que están unidas a la sección del centro móvil. El agua clarificada que normalmente contiene menos de 30 mg/L de sólidos suspendidos puede ser reciclada o utilizada en otros procesos, a menudo se almacena en un tanque con control de nivel (Lawrence Wang, Guss, & Krofta, 2010).

2.3. PRINCIPIO DE LA VELOCIDAD CERO:

En el interior del ducto de distribución, el influente se mueve hacia atrás con la misma velocidad del agua de entrada. Esto permite el estado transiente en la cámara de flotación, a esto se le conoce como “velocidad cero”, lo cual es ideal para la eficiencia del proceso de flotación. En esta sección el fluido fluye por gravedad y no se necesita bomba.

La entrada, salida y el mecanismo de remoción de lodos están contenidos en la sección central giratoria. Esta sección central giratoria y el cucharón rotan alrededor del tanque a una velocidad sincronizada con el flujo (Lawrence Wang, Guss, & Krofta, 2010).

$$t_{rot}(\text{minutos}) = \frac{V_{flot}(m^3)}{Q_a(\frac{m^3}{h})} \times 60 \quad (2.2)$$

A continuación, se detallan las principales partes que conforman una unidad clarificadora DAF.

2.4. PARTES DEL CLARIFICADOR *DAF*

Uno de los modelos más comerciales por parte de la compañía Krofta es el modelo *supercell*, el cual se muestra en la Figura 2.1, el cual corresponde al diseño instalado en el Molino papelerero de Empaques Santa Ana.

2.4.1. JUNTA ROTATIVA:

Permite la alimentación del caudal a tratar sin afectar el movimiento de rotación. Se puede hacer ajustes en los tornillos de compresión, cuando no sea posible se deberán cambiar los empaques. Una doble junta rotativa es recomendada para unidades muy grandes. Mejorando la distribución de agua presurizada y evitando la coalescencia de burbujas y las pérdidas de aire en efluentes de baja conductividad o baja temperatura. El equipo cuenta con raspadores que separan los sólidos de las paredes del tanque, los cuales caen al fondo y serán empujados hacia la descarga de purga periódica. Debe inspeccionarse y lubricarse cada 3-6 meses (Lawrence Wang, Guss, & Krofta, 2010).

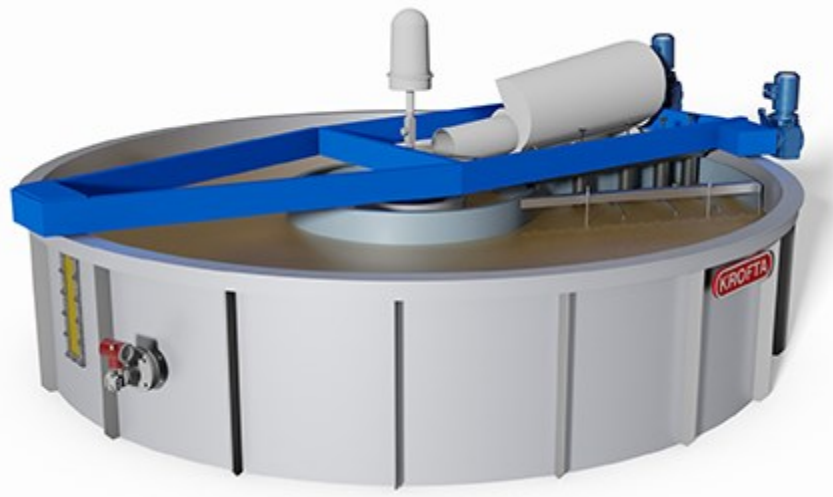


Figura 2.1. Esquema de un clarificador *DAF* del fabricante Krofta (Krofta, 2017).

2.4.2. TUBO DE DISTRIBUCIÓN DE ENTRADA:

El tubo de distribución del caudal alimentado funciona como un cabezal colector para un número de tubos de salida más pequeños que se alimentan dentro de canales formados del cabezal. Los tubos de salida están espaciados para permitir una distribución correcta del agua dentro del tanque. Las manivelas sobre el tubo de distribución varían la distancia de las placas de disco desde el extremo de la salida de los tubos; estos se abren girando en sentido de las manecillas

del reloj. El balanceo del flujo a través del tubo de distribución es importante para minimizar la turbulencia en la salida del floculador.

Para un ajuste inicial del flujo antes del arranque, se debe cerrar completamente todas las válvulas. Después se debe abrir exactamente 15 vueltas hasta que aparezca un flujo uniforme. Se debe evitar una abertura demasiado pequeña, ya que puede presurizar y dañar el tubo de distribución durante la operación (Lawrence Wang, Guss, & Krofta, 2010).

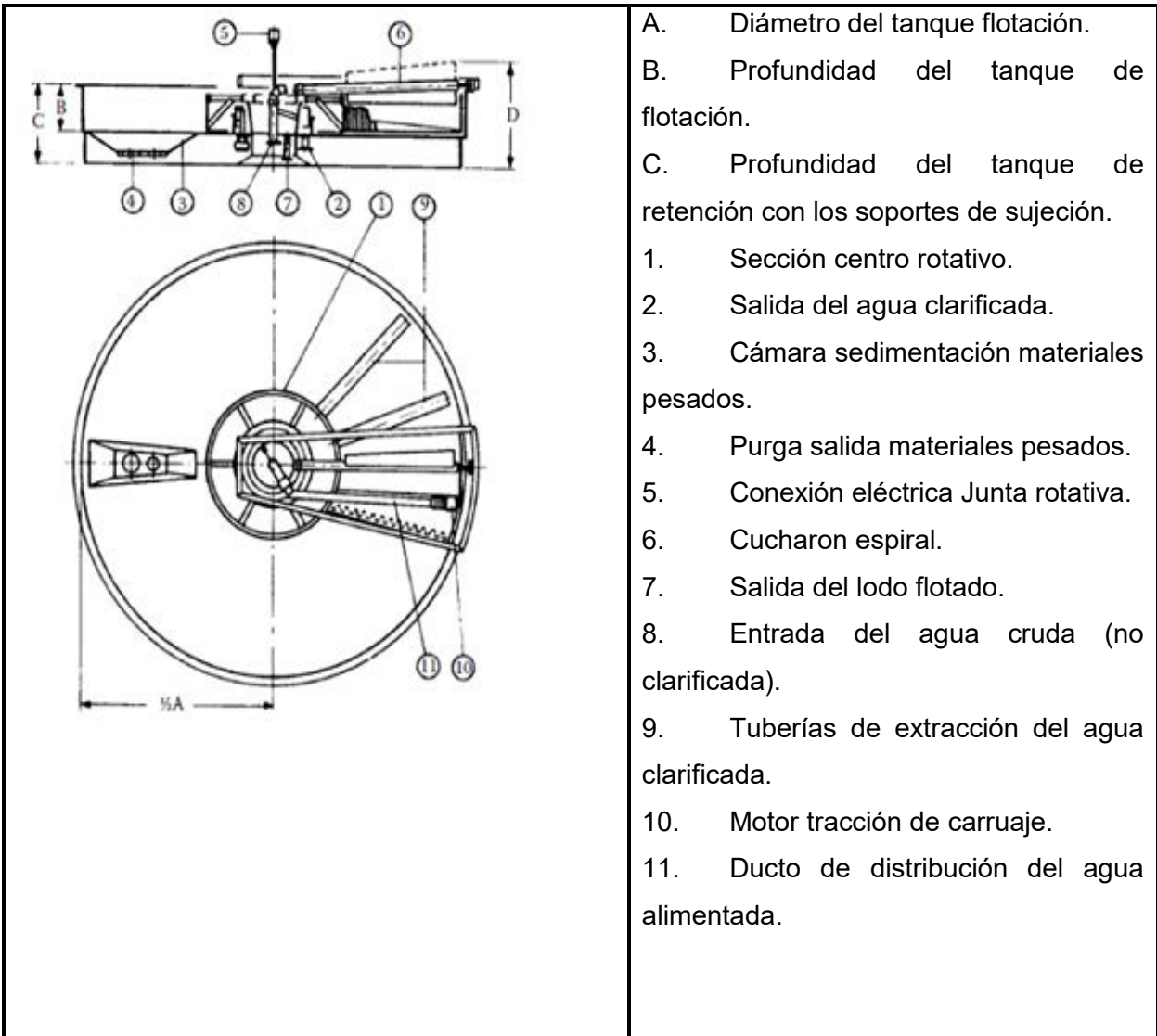


Figura 2.2. Partes que constituyen el tanque de flotación (Lawrence Wang, Guss, & Krofta, 2010).

2.4.3. CONTROL DE NIVEL:

Su altura es ajustable y controlada por una manivela. Mantiene un control preciso del nivel de agua en la unidad, crítico para el control de la profundidad del “cucharoneo” además del rango de remoción de lodo de cucharón espiral. Un control de nivel alternativo utiliza un flotador o un sensor

tipo presión diferencial controlada por una válvula automática (Lawrence Wang, Guss, & Krofta, 2010).

2.4.4. CUCHARÓN:

El cucharón recoge los sólidos que se separaron del proceso de flotación. Está soportado por 2 ruedas sobre el carruaje. El cucharón tiene forma de espiral y es accionado por un motor de engrane montado directamente en el eje extremo exterior del cucharón. La remoción de lodo se ajusta mediante el control de nivel. Para ajustar el rango de remoción del cucharón se ajusta la velocidad mediante un controlador de velocidad variable. El material de la rueda puede ser acero, bronce o poliuretano, coronado o biselado para una mejor resistencia al rodamiento. La consistencia del lodo flotado se encuentra en el rango de 2-4% comparado con 0.5-1.0 % de un lodo obtenido por sedimentación. Este lodo puede ser sacado del proceso de papel, utilizado dosificadamente en tanques después de refinado, o bien al contener trazas de bacterias puede ser prensado para su uso como abono orgánico.

La velocidad del cucharón depende del caudal alimentado, sólidos en el agua alimentada, composición del lodo separado y tratamiento químico. Además, se contemplan factores como evitar el rompimiento de flóculo por corrientes de turbulencia, generaciones de espuma, y grosor de la torta de sólido en la superficie del líquido en la cámara de flotación (Lawrence Wang, Guss, & Krofta, 2010).

2.4.5. VISOR:

En la pared frontal el tanque de flotación cuenta con un visor de acrílico, la visión transversal de la separación y el ancho de la torta de lodo formada (Lawrence Wang, Guss, & Krofta, 2010).

2.4.6. MOTORES:

Los motores de traslación y rotación del cucharón tienen drives para variar su velocidad. La corriente eléctrica de los motores se distribuye desde el eje central sobre la junta rotativa. Se requiere cambiar el aceite después de las 250 horas de operación. Los motorreductores requieren cambios periódicos de aceite. Se recomienda inspeccionar las cadenas de accionamiento cada mes para asegurar la correcta lubricación, tensión y alineamiento de los engranes (Lawrence Wang, Guss, & Krofta, 2010).

2.4.7. TRAMPA DE PESADOS:

Algunos sólidos de partículas muy pesadas como arenas y arcillas que no pueden ser separadas y precipitadas en el fondo. Estos deben ser purgados periódicamente, antes de que se acumule y afecte el volumen del *DAF*. Cuchillas de limpieza, fijadas con el ducto de distribución, raspan el fondo y los lados del tanque, depositando componentes pesados, la cual se gradúa con ciclos de frecuencia ajustable (Lawrence Wang, Guss, & Krofta, 2010).

2.4.8. SELLOS:

Tienen la función de independizar las cámaras de flotación y agua clarificada. Son de neopreno y deben gastarse en los mantenimientos si están desgastados (Lawrence Wang, Guss, & Krofta, 2010).

2.4.9. RUEDAS:

Soportan las partes móviles del equipo, carruaje y cucharón. Deben inspeccionarse cada mes y las chumaceras de las ruedas lubricarse cada 3 - 6 meses. La lubricación deberá aumentarse si se detecta desgaste o contaminación. Algunas ruedas de soporte están selladas con aditamentos no grasos o con material auto lubricante por lo que se excluyen de la lubricación (Lawrence Wang, Guss, & Krofta, 2010).

En la Figura 2.2. se muestran algunas de las partes mencionadas y el detalle de las corrientes de entrada y salida del tanque de flotación del *DAF*.

2.4.10. TUBO DISOLVEDOR DE AIRE (ADT, *Air Dissolved tube*)

Está diseñado para retener el aire y agua a una presión de 6 bar. En la entrada de agua a saturar hay instalada una boquilla que incrementa la velocidad tangencialmente, causando un movimiento en espiral (krofta, 2017).

2.4.11. SUMINISTRO DE AIRE:

Se requiere aire de un compresor, que cumpla con el caudal y presión de aire requerido. Cuando la afectación de flujo y presión no estén limitados el aire puede ser compartido. A menudo se puede colocar un tanque acumulador con regulador de presión para evitar fluctuaciones. El aire alimentado por un compresor entra tangencialmente a través de membranas de dispersión localizadas a lo largo del tubo capaces de generar microburbujas.

La presión del aire debe ser por lo menos 0,7 bar más alta que la presión interna en el ADT. La válvula de aguja del medidor de aire requiere que se ajuste para una óptima lectura de flujo de aire, inicialmente calibrada a 0,85 m³/h. El aire penetra el ADT en los paneles de dispersión y se mezcla y disuelve dentro del agua.

El agua es presurizada por medio de la inyección de aire a 5,5 - 6,0 bar. El agua se introduce tangencialmente por la parte inferior del tubo, tal como se muestra en la Figura 2.3 (Lawrence Wang, Guss, & Krofta, 2010).

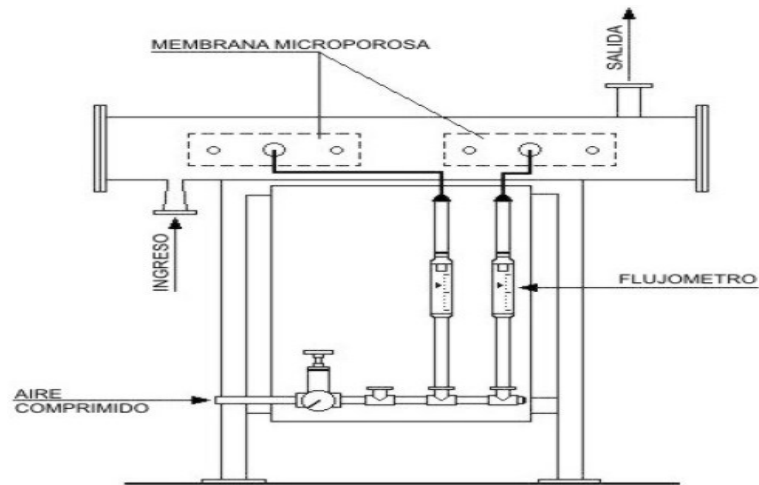


Figura 2.3. Esquema de suministro e instrumentación de medida de aire en ADT (krofta, 2017).

2.4.12. ROTÁMETROS DE AIRE.

La cantidad de aire que necesita el ADT depende del flujo de agua a través de la unidad en función de la capacidad para flotar adecuadamente los sólidos. Normalmente para los modelos SPC es de 0.2 a 1.0 m³/h. El aire penetra el ADT en los paneles de dispersión y se mezcla y disuelve dentro del agua (krofta, 2017).

2.4.13. VÁLVULA DE ALIVIO DE LA PRESIÓN.

La válvula de alivio funciona como una restricción al flujo y por ende una caída de la presión es el punto en el que se forman las pequeñas burbujas de aire necesarias para la flotación. También funcional para el control de flujo y presión a través del ADT (krofta, 2017).

2.4.14. MANÓMETROS DE PRESIÓN.

La presión del aire debe ser por lo menos 0,7 bar más alta que la presión interna en el ADT. El tubo está provisto de un manómetro de presión con una conexión en la tubería de entrada antes de la admisión de aire y otra conexión al cuerpo principal del ADT.

El flujo a través del tubo puede ser determinado por la diferencia de presión entre los dos puntos de conexión del manómetro en el flujo de diseño. La caída de presión debe ser aproximadamente 0,3 bar o 70% del flujo. Una caída mayor a 0,7 bar indicará una elevada medición de flujo que puede disminuir la eficiencia del ADT (krofta, 2017).

2.4.15. VÁLVULA DE MUESTREO DEL ADT.

La válvula de muestreo en el ADT se utiliza para determinar si el sistema de dilución de aire está trabajando correctamente. Las muestras se obtienen de aquí para observar las características de flotación antes de que la solución aire/agua entre al clarificador. Sirve principalmente para definir el flujo óptimo de aire en caso de no contar con rotámetros.

Las burbujas de aire deben ser muy pequeñas dándole al agua una apariencia “lechosa”. No deben estar presentes burbujas grandes.

Sino se añade suficiente aire al sistema, se descargará únicamente agua del tubo. Primero, verificar para estar seguro de que el sistema está operando con la presión y flujo apropiados. Si la descarga es sólo aire, reduzca el ajuste del medidor de aire. La sobredosis puede causar turbulencia en el clarificador o espuma en exceso.

Este punto de muestreo es una herramienta importante para monitorear la operación del ADT (krofta, 2017).

2.4.16. BOMBA DE PRESURIZACIÓN.

La corriente de influente alimentado puede ser saturada una o varias veces la presión atmosférica por medio de una bomba de presurización. Para el ingreso de agua al tubo (generalmente situado a menos altura que el tanque de flotación) no se requiere bomba, pero para retornar el agua saturada sí. Esta bomba permite el ajuste del caudal de agua saturada requerido para la efectiva separación (krofta, 2017).

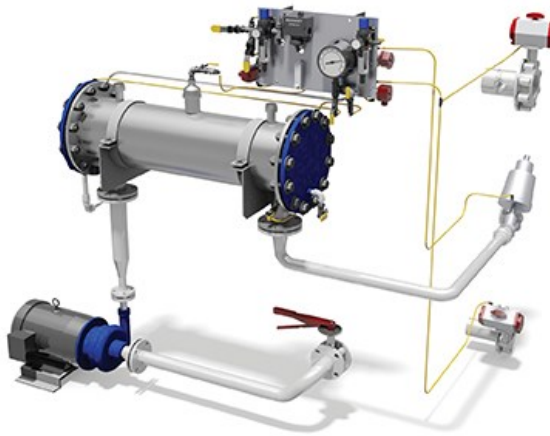


Figura 2.4. Esquema de conexión bomba de presurización y elementos de control del ADT (Krofta, 2017).

2.4.17. MEMBRANAS MICROBURBUJA.

Las membranas micro porosas permiten la dispersión del aire en forma de microburbujas. Generalmente son 4 o 6, dependiendo del tamaño del tubo. Están instaladas por fijación de tornillos en el interior del tubo ADT justo en la entrada de aire a 6 bar. Cuando la formación de microburbujas sea limitada por la obstrucción con contaminantes, se deben reemplazar (krofta, 2017).



Figura 2.5. Esquema bridado de las membranas formadoras de microburbujas en el ADT (krofta, 2017).

2.5. APLICACIONES DEL PROCESO *DAF* EN LA INDUSTRIA PAPELERA

El método de separación *DAF* es aplicable en la recuperación de fibra en los ciclos de agua de la industria papelera. El ciclo de clarificación utilizado para la remoción de coloides contaminantes disueltos en el agua. Puede ser sucedido de un proceso de filtrado. La utilización simple de filtración con filtros de barrera es limitada para remover partículas más grandes que 75 μm y puede requerir varias etapas y costo de mantenimiento, así como agua para limpieza (Bajpai, 2017).

Algunas ventajas de utilizar el método de clarificación *DAF* son:

- La remoción de finos del ciclo de aguas de proceso.
 - Permite el cierre de los ciclos de agua y reducir el consumo de agua fresca.
 - Este método también se utiliza en la clarificación primaria y secundaria en los efluentes de los molinos.
 - Remoción de basura aniónica y *slime*.
- La floculación con químicos adecuados convierte los sólidos suspendidos en flóculos los cuales hacen accesible su separación del agua (Bajpai, 2017).

CAPÍTULO 3. VARIABLES QUE AFECTAN EL PROCESO DE CLARIFICACIÓN.

El proceso de clarificación consiste en un proceso de separación, en una o varias fases según las propiedades específicas de las sustancias involucradas. A continuación, se detallan algunas de ellas (SA Water Government of South Australia, 2013).

3.1. SÓLIDOS.

Esta variable debe ser controlada en el agua de alimentación, las variaciones pueden requerir incrementos en el consumo de químicos. La cantidad de sólidos a la salida es el resultado de la separación. Tiene relación directa con la carga alimentada. El volumen de recirculación de agua y aire suministrado debe ser ajustado manualmente, en relación a los sólidos y el volumen del tanque *DAF*. En algunas ocasiones de excesiva carga es recomendado un tanque de pre-reacción (SA Water Government of South Australia, 2013).

3.2. pH.

Si es muy variable, afectará la formación y composición de los flóculos, así como en la cantidad de remoción de sólidos disueltos. Tiene impacto directo con el tratamiento de coagulación y floculación escogido. Se deben evitar los valores extremos muy ácidos para evitar la corrosión prematura (SA Water Government of South Australia, 2013).

3.3. DOSIFICACIÓN DE COAGULANTE Y FLOCULANTE.

Se realiza las mediciones con cilindros de aforo, en función de la concentración (ppm) según el caudal y sólidos contenidos tanto en el agua alimentada como del agua tratada. Deben estar debidamente definidos los mejores puntos de aplicación y unidades de preparación de los polímeros. Establecido el sistema, medidores de flujo y entradas al PLC, pueden ser necesarios. En general, si la carga de sólidos se incrementa en el clarificador, entonces la cantidad de producto químico también debe incrementarse proporcionalmente. La sobredosis de químicos, algunas veces causan flóculos “resbaladizos” los cuales no se adhieren al aire y por lo tanto se hunden. Esto también provoca que el lodo parezca húmedo o “grasoso” y que sea muy resbaloso al tacto (SA Water Government of South Australia, 2013).

3.4. TEMPERATURA.

La elevada temperatura en el agua de alimentación puede resultar en un alto porcentaje de arrastre de material emulsificado a través de la unidad *DAF*. Se aumenta el indeseable rompimiento de material biológico en la unidad *DAF*. Para compensar, se debe disminuir la

cantidad de suministro de aire. La temperatura en el *DAF* debe mantenerse por debajo de los 40°C (SA Water Government of South Australia, 2013).

3.5. DISPOSICIÓN DE LOS LODOS

Mayoritariamente los agentes químicos aplicados serán separados en conjunto con la carga sólida, por lo que se requiere sean de origen orgánico preferiblemente. El uso final del lodo dependerá de sus características, su destino puede ser compostaje, abono o relleno sanitario. A menudo los lodos están conformados del material orgánico que se puede descomponer, por lo que el tanque de almacenamiento de estos lodos debe ser adecuadamente cerrado (no abierto a la atmósfera), (SA Water Government of South Australia, 2013).

3.6. MANTENIMIENTO

El mantenimiento de todos los elementos debería ser contemplando las recomendaciones del fabricante, o donde la experiencia indique más frecuentemente debe ser necesario. La unidad *DAF* debe ser periódicamente drenada y limpiada para prevenir taponamientos de tubería. Es necesario tomar las medidas de contingencia ante el cumplimiento de inventario de las partes de desgaste, para en caso de falla, el tiempo de corrección sea corto (SA Water Government of South Australia, 2013).

CAPÍTULO 4. ARREGLOS DE PRESURIZACIÓN EN EL SISTEMA DAF

El sistema de clarificación utilizando un DAF, pueden tener algunas variaciones según la diferencia en nivel de dificultad de la sustancia a separar. Por ende, se pueden emplear algunas modificaciones en el porcentaje de flujo a saturar con aire para catalizar la separación. Seguidamente, se detallan 3 arreglos diferentes (Lawrence Wang, Guss, & Krofta, 2010).

4.1. FLUJO ALIMENTACIÓN TOTAL PRESURIZADO

En el sistema de flujo total presurizado, el flujo completo de alimentación pasa por la etapa de presurización. El sistema es usualmente aplicable cuando la corriente de alimentación tiene una concentración de sólidos suspendidos superior a 800 mg/L y no es susceptible a efectos de corte por la bomba de presurización o alta caída de presión en la válvula de fricción. Es ocasionalmente usado para separar algunas fibras y partículas discretas que requieren un alto volumen de burbujas de aire. Es altamente factible donde los sólidos suspendidos flocularán por adición química. Las burbujas de aire logran quedarse atrapadas en el interior de los flóculos, resultando en formación de enlace fuerte entre las partículas de sólido y aire, lo cual hace el proceso de separación muy eficiente (Lawrence Wang, Guss, & Krofta, 2010).

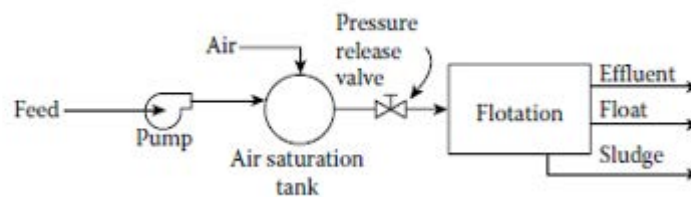


Figura 4.1. Sistema DAF con sistema de flujo de alimentación total presurizado (Lawrence Wang, Guss, & Krofta, 2010).

4.2. FLUJO ALIMENTACIÓN PARCIAL PRESURIZADO

En el sistema de flujo parcial presurizado, solo de 30 a 50% del flujo alimentado pasa por la etapa de presurización. La porción remanente es alimentada por gravedad o bomba de transporte de baja presión. Las dos corrientes, presurizada y no presurizada, se mezclan en la tubería de alimentación, justo antes de llegar a la cámara de flotación. Materiales con baja gravedad específica pueden ser removidos con el sistema de presurización parcial. Este sistema no es recomendado cuando los sólidos suspendidos son susceptibles a efectos de corte por la bomba de presurización y la válvula de fricción. Es generalmente utilizado en aplicaciones donde la

concentración de sólidos suspendidos es baja, resultando en un bajo requerimiento de aire, costo de operación y mantenimiento (Lawrence Wang, Guss, & Krofta, 2010).

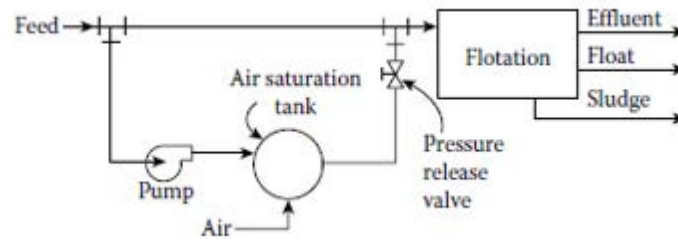


Figura 4.2. Sistema DAF con sistema de flujo alimentación parcial presurizado (Lawrence Wang, Guss, & Krofta, 2010).

4.3. FLUJO RECIRCULADO PRESURIZADO

En el sistema de flujo recirculado presurizado, una porción del 15-50% del efluente clarificado de la cámara de flotación es recirculada, presurizada y semi-saturada con el aire el tubo de disolución. El flujo recirculado y saturado con aire es mezclado con el flujo de entrada sin presurizar justo antes de entrar a la cámara de flotación, con el resultado de que las burbujas de aire salen de la fase acuosa en contacto con la materia particulada suspendida. El sistema es usualmente empleado en aplicaciones donde preliminarmente se da una adición química de coagulante y floculante, la cual es necesaria para la flotación seguida. Esto elimina los problemas con el corte de las partículas, ya que solo las clarificadas pasan a través de la etapa de presurización. El flujo hidráulico incrementado por la recirculación debe ser tomado en cuenta para el diseño de la cámara de flotación.

Aunque los tres sistemas mencionados pueden ser usados para la separación de fibra o lodo, solo el de presurización de flujo de recirculado es recomendado para la purificación de agua y tratamiento de aguas residuales (Lawrence Wang, Guss, & Krofta, 2010).

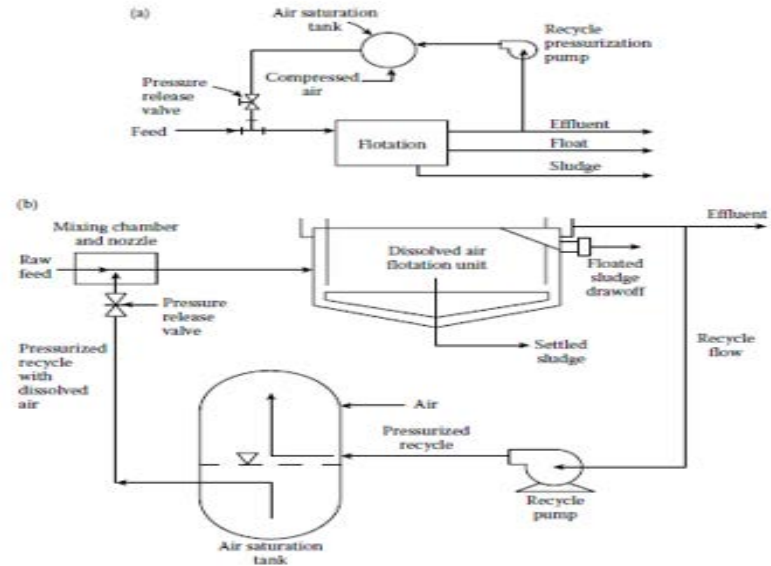


Figura 4.3. Sistema DAF con sistema de flujo de recirculación presurizado (Lawrence Wang, Guss, & Krofta, 2010).

Cabe mencionar que este último arreglo de flujo de recirculación presurizado es el que se utiliza en el DAF instalado en el molino paplero de la empresa Empaques Santa Ana, en una porción aproximada de 30% hacia el tubo de saturación con aire.

CAPÍTULO 5. PROCESO DE COAGULACIÓN Y FLOCULACIÓN:

Estos procesos químicos son utilizados para separar los sólidos suspendidos del agua. Los sólidos suspendidos varían según la fuente, carga compuesta, tamaño partícula, forma y densidad. Las pequeñas partículas son estabilizadas en suspensión por la acción de fuerzas físicas de carga iónica en la superficie de las partículas mismas.

La mayoría de los sólidos suspendidos en agua poseen una carga negativa y dado que tienen el mismo tipo de carga se repelen cuando se acercan. Por lo tanto, se mantendrán en suspensión en lugar de agruparse y asentarse fuera del agua.

La coagulación y floculación ocurren en etapas sucesivas destinadas a superar las fuerzas que estabilizan las partículas suspendidas permitiendo la colisión de partículas y el crecimiento de las partículas formando flóculos. Ambos procesos son fundamentales y exclusivos. Si el paso primero está incompleto el siguiente no tendrá éxito. Generalmente el proceso de floculación requiere más tiempo que la coagulación, dependiendo del caudal, carga sólidos o coloides y propiedades fisicoquímicas de las partículas a separar (Spuhler & Mazille, 2017).

5.1. COAGULACIÓN:

La coagulación es considerada un método primario en el tratamiento de aguas. Consiste en desestabilizar las partículas cargadas. Coagulantes con cargas opuestas se añaden al agua para neutralizar las cargas negativas sobre sólidos dispersables no fijables tales como arcilla, coloides y sustancias orgánicas. Cada vez que una carga es neutralizada, las pequeñas partículas suspendidas son capaces de acercarse y juntarse.

Tres mecanismos ocurren durante la coagulación: neutralización de carga, extensión y puenteo (Bing, Shui, & Puzhen, 2016).

5.1.1. Neutralización:

Los coagulantes basados en las sales metálicas hidrolizadas. Estas sales al contacto con el agua desprenden rápidamente iones que son absorbidos por las cargas negativas causadas por la neutralización de carga. Esta desestabilización generalmente se da con bajas dosificaciones de coagulantes (Bing, Shui, & Puzhen, 2016).

5.1.2. Extensión:

Se puede dar a altas dosificaciones de coagulante debido a que una alta concentración de sales metálicas en el agua permite la precipitación de hidróxidos metálicos amorfos y las partículas coloidales pueden ser enredadas en estos precipitados (Bing, Shui, & Puzhen, 2016).

5.1.3. Puenteo:

Ocurre por el choque promovido también por la desestabilización, uniendo varias partículas entre sí. Las partículas ligeramente más grandes, formadas a través de este proceso y llamadas micro-flóculos, normalmente no son perceptibles a simple vista. El agua que rodea a los micro-flóculos recién formados debe ser clara. Si no es así, todas las cargas de las partículas no han sido neutralizadas, y la coagulación no ha sido efectuada por completo. Puede ser necesario añadir más coagulante. Para obtener una buena coagulación es necesaria una mezcla rápida de alta energía para dispersar adecuadamente el coagulante y promover colisiones de partículas. La mezcla excesiva no afecta a la coagulación, pero una mezcla insuficiente dejará este paso incompleto (Spuhler & Mazille, 2017).

5.2. FLOCULACIÓN:

En la floculación se da el aumento del tamaño de partícula desde los micro-flóculos hasta las partículas en suspensión visibles. Los micro-flóculos se ponen en contacto entre sí a través del proceso de mezcla lenta. Las colisiones de las partículas pequeñas hacen que se unan para producir flóculos más grandes y visibles “macro-flóculos”. Esto se logra mediante la adición de polímeros de alto peso molecular, añadiendo el peso y resistencia de los macro-flóculos. En la floculación se requiere una adecuada velocidad y energía aplicada a la mezcla, para evitar que el flóculo se desgarre o se corte. El criterio a menudo es la velocidad necesaria, para que el flóculo pueda aumentar su tamaño. El proceso de rompimiento del flóculo puede ser irreversible. Por lo general las etapas de coagulación (mezcla rápida) es separada de la etapa de floculación (mezcla lenta) y son seguidas de una etapa de sedimentación o filtración para separar los flóculos (Bing, Shui, & Puzhen, 2016).

5.3. SELECCIÓN DEL COAGULANTE:

La selección depende de la naturaleza de los sólidos suspendidos, de las condiciones del agua a tratar, la facilidad de diseño y el costo del químico aplicado para producir el resultado deseado. Una consideración importante al seleccionar el coagulante puede ser muy eficiente para remover la materia orgánica, pero puede aumentar la conductividad. Los coagulantes inorgánicos como sales de aluminio y hierro son comúnmente utilizados. Estos están compuestos de moléculas altamente cargadas capaces de neutralizar los sólidos suspendidos. Los hidróxidos inorgánicos formados producen pequeñas sillas poliméricas mejorando la formación de micro-flóculos. Durante siglos el sulfato de aluminio “alumbre” ha sido el coagulante más conocido, sin embargo, su naturaleza ácida y su almacenamiento y manejo genera corrosión en bombas y tuberías.

Posteriormente han sido utilizadas moléculas modificadas como policloruro de aluminio (PACl) y coagulante a base de hierro Cloruro Férrico o sulfato Férrico. El Cloruro Férrico es altamente ácido y sus soluciones en agua generan ácido hidroclicóric. La solución es altamente corrosiva. Los coagulantes inorgánicos usualmente son de bajo precio, están ampliamente disponibles y aplicados correctamente logran una alta remoción de sólidos. Son capaces de remover una porción de los precursores orgánicos de bacterias al combinarse con cloro. Las sales comúnmente utilizadas son sulfato férrico, sulfato ferroso, cloruro férrico y aluminato de sodio. Algunas sales pueden incrementar la alcalinidad y alterar el pH. Los coagulantes base orgánica, comúnmente son poliaminas de alta carga catiónico por unidad mol. Son menos comunes y tiene la ventaja de ser degradables sus trazas en los procesos biológicos de tratamiento de efluentes (Bing, Shui, & Puzhen, 2016).

5.4. SELECCIÓN DEL FLOCULANTE:

Polímeros orgánicos de larga cadena, de alto peso molecular han llegado a ser más utilizados como ayudantes de coagulantes orgánicos. Polímeros aniónicos son a menudo los más utilizados con coagulante metálicos, teniendo un efecto de neutralización en la superficie de los sólidos. Los polímeros aniónicos pueden ser efectivos en un amplio rango de pH con coagulantes inorgánicos. Pueden ser aplicados con bajas dosis y no consumir alcalinidad. El floculante seleccionado debe dar un apropiado tamaño y resistencia de flóculo. Los floculantes son varias veces más caros en comparación con los coagulantes inorgánicos (Tzfati, Sein, Rubinov, Raveh, & Bick, 2010).

5.5. EL MÉTODO DE JARRAS:

La prueba de jarras es un método visual, comúnmente utilizado para la simulación a escala de laboratorio, de procesos de separación mediante el uso de químicos para el tratamiento de aguas. Este método permite definir parámetros de floculación, rangos de dosificación requerida, pH, tiempos de reacción, velocidad de agitación y tamaño de flóculos. A menudo, después del análisis visual es complementado con la medición de otras variables de respuesta, según el objetivo deseado (Tzfati, Sein, Rubinov, Raveh, & Bick, 2010).

5.6. PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS:

En los fenómenos de coagulación y floculación se deben analizar las propiedades de las sustancias a separar y el medio en que se encuentran, que permitan la selección de los agentes químicos más apropiados para el tratamiento, que permitan con su medición analizar el cambio

que produce el tratamiento. A continuación, se describen algunas de estas propiedades (Rojas Gaona, 2003).

5.6.1. Turbidez:

La turbidez es la medida que indica el grado de falta de transparencia de un líquido debido a la presencia de partículas en suspensión en dicho líquido. Así cuanto más sólidos suspendidos hay en el agua, mayor es el grado de turbidez. Las unidades estándar de medición son las “Unidades nefelométricas de turbidez” (NTU) (Rojas Gaona, 2003).

5.6.2. pH:

El potencial de hidrógeno se utiliza para cuantificar la acidez o basicidad de una disolución líquida (Rojas Gaona, 2003).

5.6.3. Potencial Z (mV):

El potencial Z es una medida de la magnitud de repulsión o atracción entre partículas. Muy utilizado para medir la estabilidad de coloides y optimizar floculantes excesivamente caros. Su medida proporciona una idea detallada de los mecanismos de dispersión (Rojas Gaona, 2003).

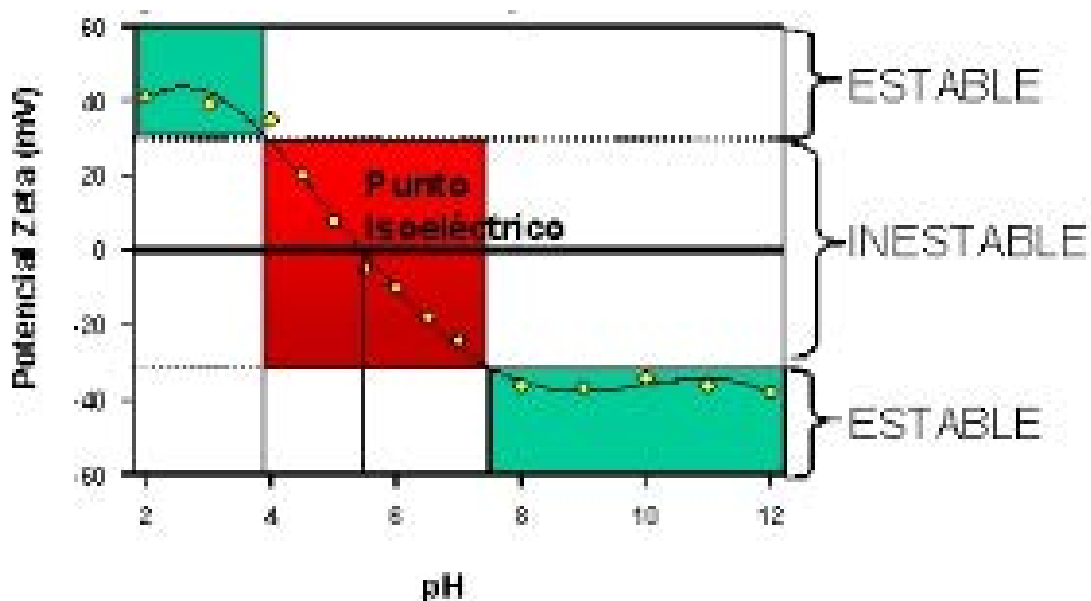


Figura 5.1. Correlación del potencial Z con el pH y muestra del punto isoeléctrico de inestabilidad por coagulación (Bing, Shui, & Puzhen, 2016).

5.6.4. Demanda química de oxígeno (DQO) mg/L:

Mediante la oxidación ácido con dicromato de potasio y el exceso de dicromato es titulado con una disolución estándar de sulfato de amonio ferroso usando ferroína como indicador. La DQO es usada para la cuantificación de la materia orgánica presente y una medida de la resistencia orgánica (Bing, Shui, & Puzhen, 2016).

5.6.5. Contenido de sólidos:

Hace referencia a las partículas sólidas dispersas en la fase acuosa. Se divide en tres grupos: (Bing, Shui, & Puzhen, 2016).

- Sólidos totales fijados (TFS): Se determina mediante el incremento de la temperatura a 103 -105°C.
- Sólidos totales volátiles (TVS): Se determinan a una temperatura de ignición de 500 ± 50°C.
- Sólidos totales suspendidos (TSS): porción separada mediante un filtro con tamaño específico de poro de 1.58 µm.

La siguiente expresión se conoce como la función de utilidad (Z)_T

$$Z_T = \text{Min}(\text{constituyente químico agregado}) + \text{costo químico} + DQO \\ + \text{Sólidos totales fijados (TFS)} + \text{Sólidos totales volátiles (TVS)} \quad (7.1) \\ + \text{sólidos totales suspendidos (TSS)}.$$

5.7. DETERMINACIÓN DE LAS DOSIFICACIONES DE COAGULANTE.

En la Figura 7.2. se muestra la variación del potencial Z (mV) y de la turbidez (NTU) en función de la dosis de coagulante. El potencial Z incrementa rápidamente, mientras la turbidez disminuye cuando la dosificación alcanza los 2500 mg/L. El mecanismo de neutralización de carga inicia cuando el potencial Z es cero a 3000 mg/L. Mientras la dosificación continuamente aumenta la variación del potencial fue poca, la turbidez se mantuvo prácticamente constante. Con esto se determinó que la fase de extensión inicia a 4500 mg/L a la cual la turbidez residual fue la menor, causada por la formación de precipitados de hidróxidos metálicos amorfos. Por ende, a nivel de laboratorio la dosificación óptima de coagulante es alrededor del potencial Z igual cero (Bing, Shui, & Puzhen, 2016).

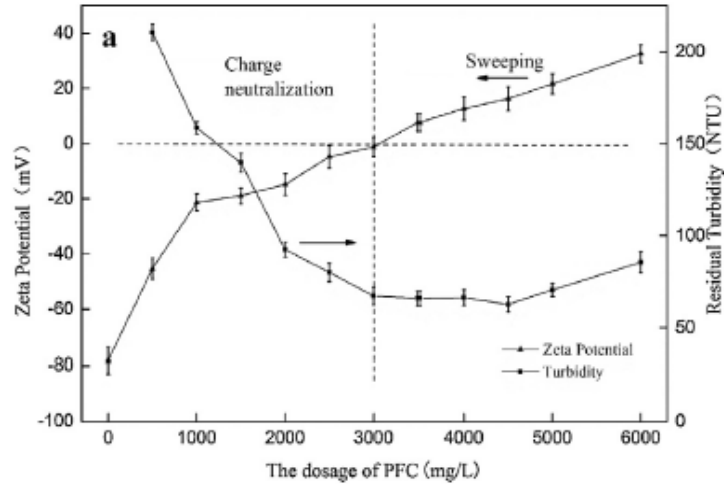


Figura 5.2. Correlación del potencial Z (mV), y la turbidez (NTU), en un experimento con PFC como coagulante, para determinar la dosis óptima (Bing, Shui, & Puzhen, 2016).

5.8. DETERMINACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN DE FLOCULANTE

Con el propósito de determinar la dosificación del ayudante de floculación y el inicio de la etapa de enlazamiento se muestra la variación de la turbidez y TOC en función de la dosificación de floculante, encontrando el menor valor de Turbidez y TOC a 60 mg/L de PAM para este coagulante específico. La dosificación mínima de floculante se obtiene, justo cuando la turbidez residual deja de disminuir formando una asíntota, en el valor mínimo de carbono orgánico total (TOC) (Bing, Shui, & Puzhen, 2016).

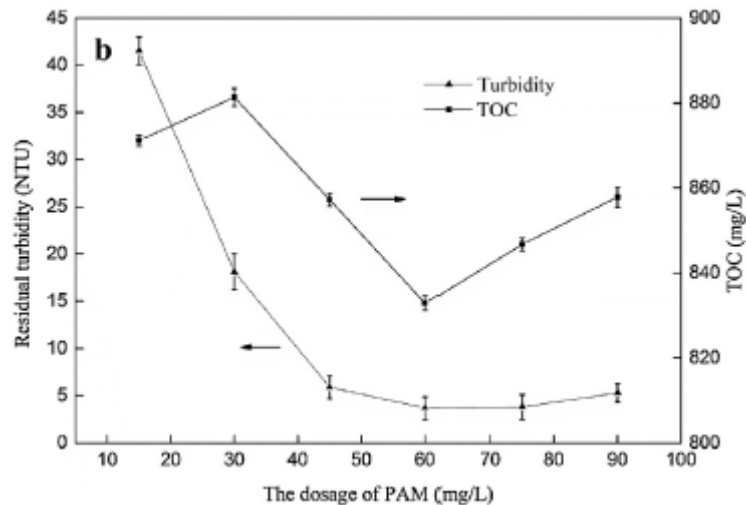


Figura 5.3. Correlación de la turbidez residual (NTU) y la cantidad de carbono total orgánico TOC, en un experimento con PAM como floculante, para determinar la dosis óptima (Bing, Shui, & Puzhen, 2016).

CAPITULO 6. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

6.1. DISEÑO EXPERIMENTAL:

Se planteó un diseño de experimentos para el análisis a nivel de laboratorio con base en la coagulación-floculación de las partículas sólidas y coloidales dispersas en el agua de un molino paplero que utiliza fibras 100% recicladas, mediante un tratamiento industrial *DAF*, con la evaluación y análisis de la remoción de turbidez como variable de respuesta, utilizando un diseño estadístico factorial.

Se consideraron otras posibles variables respuesta pudieron ser pH, conductividad, o remoción de sólidos, sin embargo, la turbidez es la que representa más apropiadamente la carga coloidal.

Se planteó un diseño experimental factorial para la escogencia del tratamiento químico que permitiera una mejora las condiciones iniciales. El diseño 2^4 , consideró el estudio de 4 factores a 2 niveles, se realizaron 16 corridas independientes y tres repeticiones de cada, siendo un total de 48 corridas.

Para la definición de los límites de dosificación como niveles del diseño, se plantearon dos valores que centraran la media de las dosificaciones del tratamiento inicial, mostradas en el Cuadro C.1.

En el Cuadro 6.1, se detalla la matriz del arreglo factorial propuesto, para los factores en análisis y sus respectivos niveles.

Cuadro 6.1. Matriz del arreglo factorial 2^4 propuesto.

Factores	Nombre	Niveles	
		(-)	(+)
A	Coagulante	polymin SK	Q-180
B	Floculante	QAN 93	QDC 0223
C	Dosis coagulante (ppm)	10	20
D	Dosis floculante (ppm)	5	15

El diseño de experimentos se ejecutó en un equipo de prueba de jarras, con un litro de muestra en análisis a una velocidad de agitación 100 rpm, donde se añadieron los químicos, en las cantidades correspondientes. En esta prueba se desarrolló una simulación a escala laboratorio

de la coagulación-floculación del proceso *DAF*. Seguidamente se evaluó su efecto sobre la variable de respuesta remoción de turbidez.

El equipo de medición utilizado se describe en el Cuadro 6.2.

Se utilizó el programa MINITAB 18 VERSION DE PRUEBA para la determinación de los resultados, que fueron utilizados para su posterior análisis, según se muestra en el Cuadro A.3.

6.2. EQUIPO Y CRISTALERIA

En el cuadro 6.2 se muestran las características del equipo utilizado para la medición de las propiedades del agua, y durante el experimento diseñado.

Cuadro 6.2. Especificaciones del equipo utilizado

Equipo	Marca	Modelo	Serie	Detalle
Flocculation tester	VELP SCIENTIFIC A	FP4	321938	Para 4 muestras. Velocidad ajustable: 20-40-50-100-200 rpm
Charge analyzing system	AFG ANALYTIC GmbH	N.R	N.R	
pHmetro	Hanna	Combo pH&ORP	HI 98121	waterproof
Turbidímetro	HACH	2100Q01		
Balanza granataria	OCONY	ES-300H	12247	Máximo 300g, división mínima 0.01g
Pipeta 25 mL				
Probeta 100 mL				
Beakers vidrio 1L				
Pera plástica				

En la figura 6.1 se muestran los principales equipos de medición utilizados.



Figura 6.1. Equipo de medición empleado para mediciones de agua de proceso. a) Turbidímetro HACH2100Q01, b) Equipo para análisis de una prueba de jarras VELP SCIENTIFICA FP4, c) Equipo para medición de demanda de carga AFG, d) pH metro.

6.3. ESCALAMIENTO AL DAF.

Se realizó una revisión de los principales equipos que forman parte del sistema de separación instalado en el Molino paplero de Empaques Santa Ana en El Coyol de Alajuela, los cuales se muestran en el Cuadro 6.3. El sistema de saturación del krofta SPC 36 instalado tiene una configuración flujo presurizado recirculado. La capacidad de la bomba de presurización permite hacer un reciclo de 25% del caudal alimentado, lo cual se mantiene dentro de rango pues se recomienda entre 15 y 50% el porcentaje de flujo clarificado-recirculado.

Cuadro 6.3. Equipos empleados para el proceso de separación DAF del proyecto.

Equipo	Especificaciones
DAF	<ul style="list-style-type: none"> - Modelo Krofta SPC 36, SN 4512075, inox T-316. - Capacidad (m³/h): 712 - Volumen flotación (m³): 22.7 - Motor tornillo (hp): 5, con drive - Motor carruaje: 5 Hp con drive - Velocidad carruaje: 0.5 rpm, 1 rev cada 2 minutos - Velocidad cucharón: Se define 1 rev/5 segundos.
Bomba alimentación al DAF	<ul style="list-style-type: none"> - Goulds 3196, 6x8-13 in, diámetro de impulsor 11.5 in. - Caudal (m³/h): 700 - Presión (m): 30 - Potencia motor (hp): 40 - Velocidad motor (rpm): 1750
Tubo ADT	<ul style="list-style-type: none"> - Modelo Krofta ADT 2500, inox T-316. - Capacidad: 150 m³/h - Diámetro interno (m): 0.45, Largo (m): 3.05. - Presión interna (bar): 5 - Aire comprimido requerido: 4 SCFM= 1.8 m³/h @6.5bar y 46°C. - Membrana microbrubuja.800 x 100 x 4.7 mm
Bomba de presurización	<ul style="list-style-type: none"> - Goulds 3196 3x4-13, diámetro impulsor 11.5 in. - Caudal (m³/h): 140 - Presión (m): 60 - Potencia motor (hp): 50 - Velocidad motor (rpm): 1750
Compresor	<ul style="list-style-type: none"> - Ceccato CSD 100/10 - Caudal (m³/h): 419 - Presión descarga (bar): 10 - Potencia motor (hp): 100

En la figura 6.2, se muestra una fotografía del DAF y el tubo ADT instalado.

a)



b)



Figura 6.2. a) DAF del fabricante Krofta SPC 36. b) Tubo ADT 2500 del DAF instalado, bomba de presurización y medidores de aire, instalados en Molino papelerero Empaques Santa Ana.

Se realizó una revisión de los equipos instalados para la dosificación del sistema químico inicial, y se validó su funcionamiento para el tratamiento químico propuesto. Los productos comprados fueron coagulante Q-180 y floculante QAN-93, mostrados en la Figura 6.3.

a)



b)



Figura 6.3. Coagulante Q-180 y Floculante QAN-93 ensayados en el DAF.

DOSIFICACIÓN DE LOS QUÍMICOS COAGULANTE Y FLOCULANTE AL DAF.

Dosificación coagulante:

El Coagulante Q-180, se dosificó puro, en la misma presentación que se compra. Se utilizó una bomba Milton Roy, descrita en el Cuadro 6.4 y Figura 6.4a. El punto de aplicación se muestra en la Figura 6.4d, en la succión de la bomba de alimentación al DAF, agua blanca, permite una mezcla adecuada. Adicionalmente se utilizó una válvula de check en el punto de mezcla con el agua a tratar, según se muestra en la Figura 6.4e.

Dosificación Floculante:

El Floculante QAN-93 al ser un polímero de alto peso molecular, requiere un proceso de hinchamiento para desarrollo de la molécula de floculación, se preparó al igual que el polímero inicial utilizando 2 tanques cilíndricos con un volumen de 1 m^3 . Uno de preparación y otro de dosificación, a una concentración de $0.5\% \text{ m/m}$, según Figura 8.4b. Se utilizó una bomba Husky 515 neumática, descrita en el Cuadro 6.4 y Figura 6.4c. El punto de aplicación: 40 m aguas abajo del coagulante y 5 m tubería aguas arriba de la mezcla con agua saturada con aire, en una tubería de 6", donde la velocidad del flujo es 10.6 m/s . Con eso se obtiene que entre coagulante y floculante hay aproximadamente 4 segundos. Adicionalmente se utilizó una válvula de check en el punto de mezcla con el agua a tratar, según figura 6.4f.

En el cuadro 6.4 se muestran las principales características del equipo empleado de dosificación de coagulante y floculante. En la figura 6.4 se observa, los detalles relacionados a la dosificación de coagulante y floculante descritos.

Cuadro 6.4. Características del agitador en tanque de preparación floculante.

Equipo	Características
Tanque de preparación y Agitador	- Volumen: 1 m ³
	- Velocidad agitación: 1725 rpm
	- Potencia: 5 Hp
	- Voltaje: 220 V
	- Detalle: 3 aspas de 10 cm, en forma helicoidal
Bomba Dosificadora coagulante	- Modelo: Milton Roy B131-362TI.
	- Voltaje: 110 V
	- Caudal máximo: 4.5 GPM regulable.
Bomba Dosificadora Floculante	- Presión: 50 psi
	- Modelo Husky 515 neumática.
	- Presión aire requerido: 7 bar
	- Caudal máximo: 900 GPM
- Presión: 100 psi	

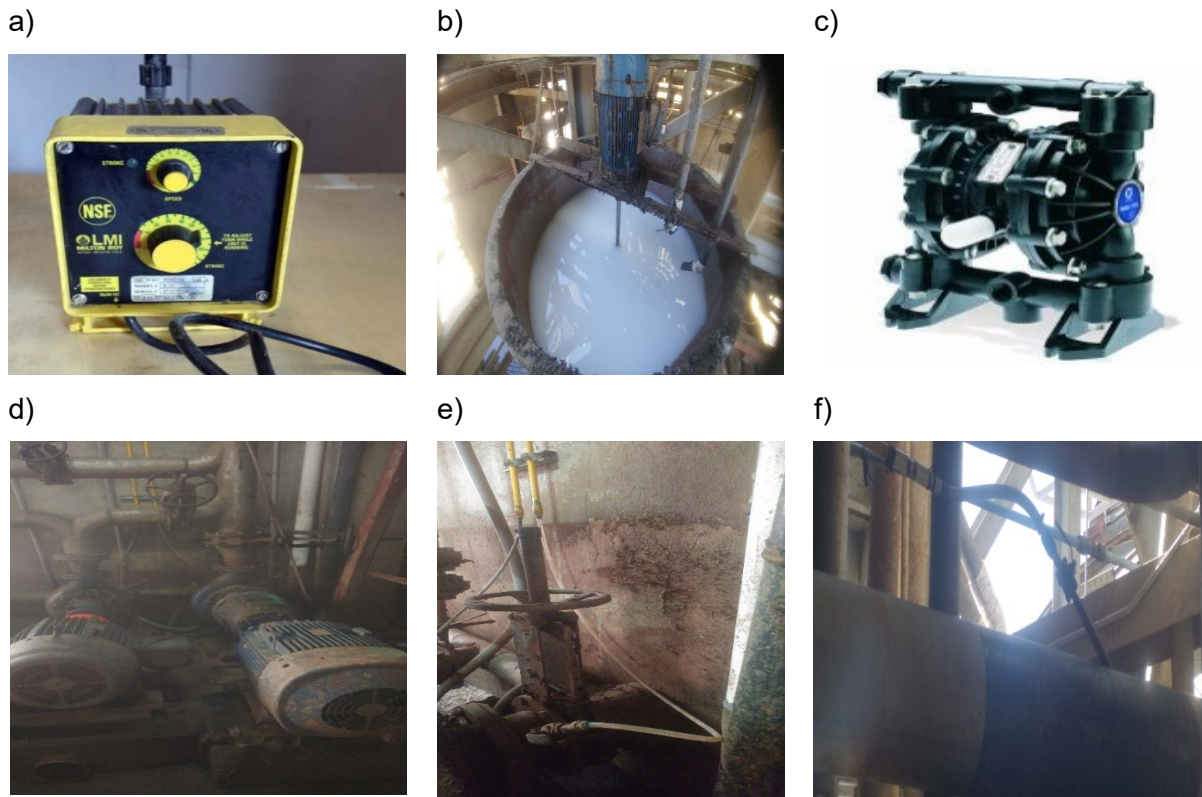


Figura 6.4. Dosificación de químicos al DAF. a) Bomba para coagulante, b) Tanque de preparación de floculante, c) Bomba para floculante, d) bombas alimentación al DAF, e) punto aplicación de coagulante, f) punto de aplicación de floculante.

La dosificación de arranque al DAF con el programa propuesto se estableció con la misma dosificación del programa inicial. Los niveles de dosificación que se utilizaron en el diseño experimental fueron considerados como información para el análisis de efectos, y según los resultados se obtuvo el criterio de ajuste que permitiera la obtención de una mejora en resultados de remoción y de costo respecto al tratamiento inicial.

CAPÍTULO 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

El diseño factorial fue aplicable a este estudio debido a que permite evaluar los efectos principales y las interacciones entre sí, sin requerir gran cantidad de corridas. Específicamente permitió la evaluación de coagulantes y floculantes, que según sus propiedades fisicoquímicas pudieron mostrar efectos significativos sobre la turbidez del proceso. Al ser dos fenómenos complementarios, fue importante poder evaluar su interacción, así como el efecto del nivel de dosificación para cada uno.

Con el diseño factorial planteado en la metodología descrita, se simuló a escala de laboratorio en un equipo de jarras los fenómenos de coagulación y floculación, según se muestra en a Figura 7.1, en la cual se observaron efectos visuales interesantes, como la presencia de espuma en la Figura 7.1c y la flotación de las partículas sólidas, así mismo como el floculante QAN-93 al nivel alto propuesto de 15 ppm formó flóculos muy grandes que sedimentaron, lo cual podría demandar más consumo de aire o causar un problema para la separación en el DAF. Así mismo la Figura 7.1d muestra que después de 20 minutos, al liberarse el aire, las partículas sedimentan al fondo.

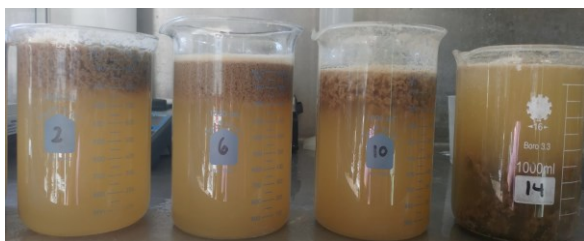
a)



b)



c)



d)



Figura 7.1. Prueba de jarras a) floculación en equipo de jarras, b) alícuota del agua clarificada, c) efecto del exceso de floculante (muestra derecha), d) contraste visual del agua alimentada y clarificada con 20 minutos de reposo.

La muestra de agua alimentada al DAF que se utilizó para la simulación la prueba de jarras, se tomó durante la fabricación de 3 gramajes de producción distintos. La realización de las corridas del diseño experimental en estas condiciones permitió comprobar el efecto esperado de que la turbidez del agua blanca es inversamente proporcional al gramaje de papel fabricado, según se muestra la Figura 7.2, esto se asocian al efecto mecánico de mayor depósito de partículas de menor tamaño al aumentarse el espesor de la hoja en las etapas de formación, y la reducción del paso de partículas sólidas al agua drenada.

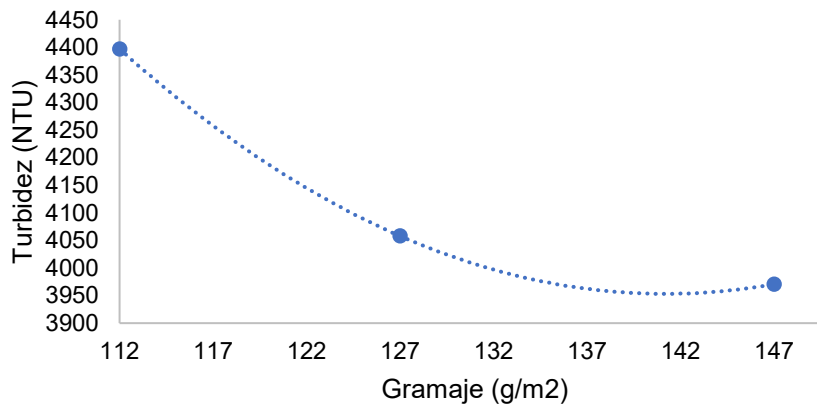


Figura 7.2. Efecto del gramaje, sobre la turbidez del agua blanca (entrada al *DAF*).

Esto permitió comparar el funcionamiento del programa químico en el *DAF* con una variación en la remoción de entrada.

Adicionalmente se analizó el efecto sobre la remoción de turbidez según las variaciones medidas en la turbidez de entrada provocadas por los cambios en el gramaje. Dicha tendencia se muestra en la Figura 7.3, se observa que no hay una tendencia clara de este efecto en la remoción. Por ende, se considera que la remoción es la variable respuesta más indicada para el análisis del tratamiento y que el factor gramaje, no era necesario ser bloqueado en el diseño experimentos, lo cual tampoco era factible, pues debe ser un tratamiento que aplique para todos los tipos de papel fabricados.

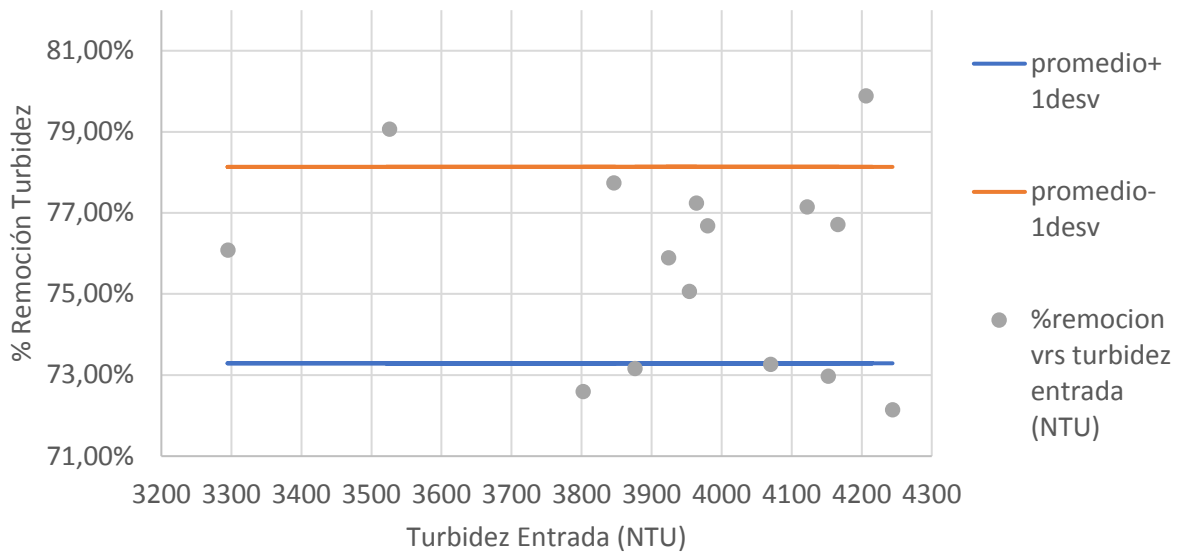


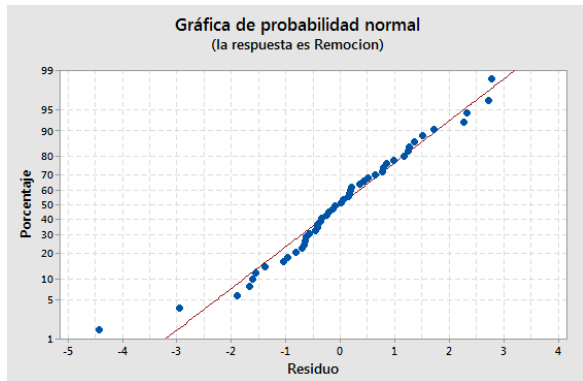
Figura 7.3. Efecto de la turbidez de entrada (NTU) sobre el % de remoción de turbidez con coagulante Q-180 a 10 ppm y floculante QAN-93 a 8 ppm.

Para la evaluación del modelo estadístico del diseño experimental propuesto, se verificó el cumplimiento de los supuestos normalidad, varianza constante e independencia. Así mismo se realizó un Diagrama de Pareto para la clasificación de los efectos estandarizados.

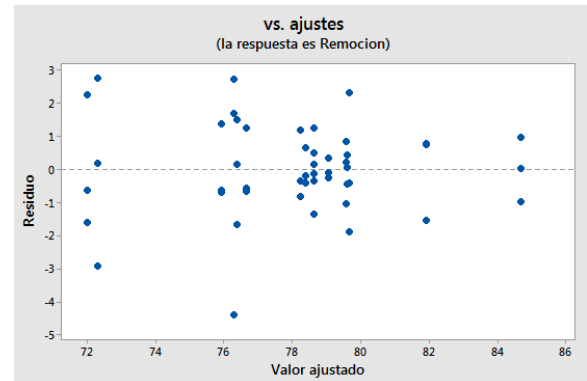
El supuesto de normalidad fue comprobado en la Figura 7.4a, mediante una tendencia recta en la hoja de probabilidad normal en función de los residuos. En la Figura 7.4b, se muestra la gráfica de residuos y el valor ajustado, la cual no muestra un patrón y se distribuyen de manera aleatoria. El modelo de ajuste es representativo de cualquier posible experimentación que se realice en ese rango de datos, por tanto, se concluyó que todos los tratamientos tienen varianza constante. En la Figura 7.4c no se observaron factores asociados al orden de ejecución del experimento. La variable respuesta remoción de turbidez se distribuye de manera normal con la misma varianza en cada tratamiento, por ende, se cumple el supuesto de independencia.

Una vez validados los supuestos del modelo, se procedió con un análisis de efectos mediante un diagrama de Pareto mostrado en la Figura 7.4d, donde el valor 2.037 es el inverso de la distribución normal *t student* con una probabilidad α de 0.05 y 32 grados de libertad. Los efectos mayores a este factor resultan significativos, el tipo de floculante (factor B) y dosis de floculante (factor D).

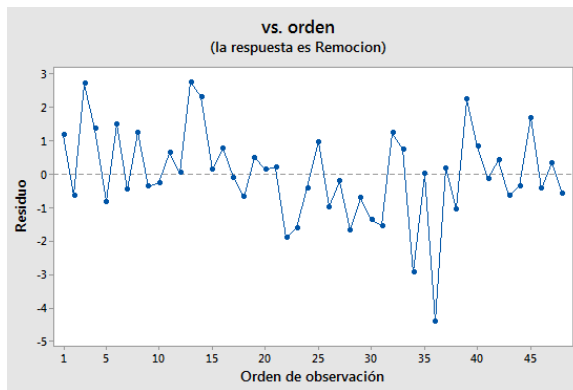
a)



b)



c)



d)

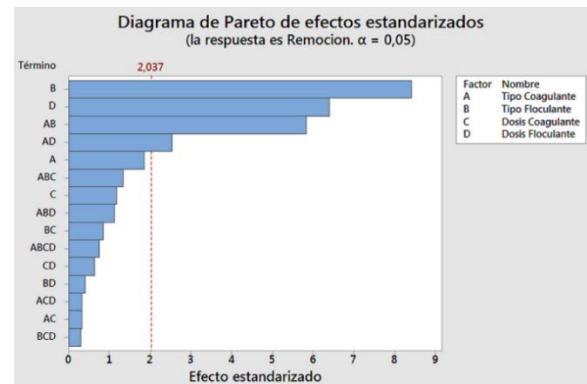


Figura 7.4. Gráficas del modelo estadístico a) supuesto normalidad, b) supuesto varianza constante, c) supuesto de independencia y d) diagrama de Pareto (Salida del programa estadístico Minitab 18).

En la Figura 7.5 se analizaron primeramente las interacciones entre los factores, concluyendo que las rectas que tienden a cruzarse, tipo de coagulante-tipo de floculante (interacción AB), tipo de coagulante con dosis de floculante (AD) representan las interacciones significativas y que estadísticamente el programa que favorece la remoción de turbidez es el coagulante Q-180 con el floculante QAN-93 a 15 ppm.

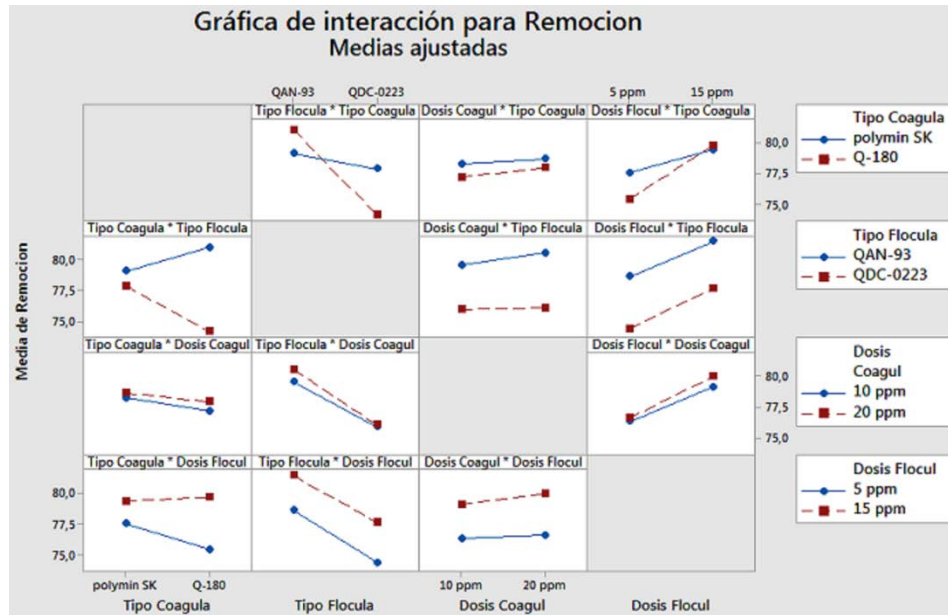


Figura 7.5. Interacción de factores para la remoción de turbidez, según salida del programa Minitab 18 versión gratuita.

En la Figura 7.6 se analizaron las tendencias para los efectos principales sobre la remoción, y se determinó que el floculante QAN-93 a una dosis de 15 ppm es el factor de mayor aporte sobre la media de remoción de turbidez, además que el factor tipo y dosis de coagulante no fueron significativos, por si mismos en los niveles establecidos.

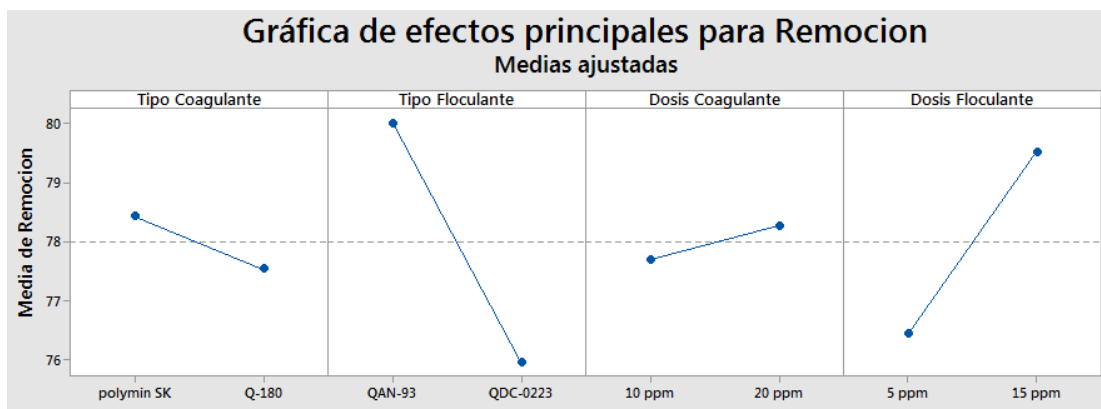


Figura 7.6. Gráfica de efectos principales de remoción de turbidez (Salida del programa estadístico Minitab 18).

Según el análisis desarrollado, el tratamiento a proponer es el compuesto por: coagulante Q-180 con posibilidad de reducir al mínimo su dosificación y el floculante QAN-93 al nivel más alto de dosificación 15 ppm, la cual fue condicionada al beneficio económico esperado.

A partir de estos resultados se planteó la realización del ensayo en el *DAF* con el programa químico Coagulante Q-180, y Floculante QAN-93, para lo cual se realizó la compra de los productos para 15 días de evaluación en el *DAF*.

Las cantidades que se compraron solo para el desarrollo de la prueba fueron 2000 kg de coagulante Q-180 y 1000 kg de floculante QAN-93, lo cual resultó en una inversión total de 9763.2 dólares. Dicha cantidad alcanzó para 17 días de prueba hasta acabarse.

7.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS EN DAF

Con la disposición de los químicos Q-180 y QAN-93 en planta, se procedió según la metodología descrita a desarrollar la prueba en el *DAF*. La evaluación se realizó durante 23 días, desde el 22 de febrero al 10 de marzo del 2019, se registraron 19 mediciones y se registraron gramajes de fabricación de 112 a 195 g/m². Se realizó el muestreo de las corrientes de entrada y salida al *DAF*. En la Figura 7.7 se identifican los puntos de muestreo. El agua alimentada o de entrada al *DAF* se muestrea justamente del drenaje de las mesas de formación según se observa en las figuras 7.7a y 7.7b, la cual luego es almacenada en el tanque de agua blanca. En este punto no se ha dosificado el coagulante ni floculante. Después del tratamiento *DAF* incluido el tratamiento químico, se muestrea con una válvula en la tubería corriente de salida “aceptado” el agua después del tratamiento, según se muestra en la figura 7.7c. La figura 7.7d muestra el contraste visual de antes y después del tratamiento *DAF*.



Figura 7.7. Muestreo de las corrientes de alimentación y salida del DAF, a) mesas de formación, b) punto muestreo drenaje mesas de formación, c) punto de muestro agua clarificada en salida del DAF, d) contraste visual agua entrada y salida del DAF (fotografías tomadas en Empaques Santa Ana el 06 de marzo del 2019).

Se realizaron las mediciones de turbidez en las corrientes de agua entrada y salida del DAF, para la determinación del porcentaje de remoción con el tratamiento químico inicial, es decir con el tratamiento previo a las modificaciones planteadas, compuesto por coagulante PAC a 15.8 ppm y floculante Andifloc 1122 a 8.6 ppm durante los meses de junio y julio 2018, obteniendo una remoción promedio de 65.18%. Con el diseño experimental ya descrito, se realizó una corrida preliminar a nivel de laboratorio con este mismo tratamiento inicial, obteniendo una remoción promedio de 78.50%, mostrando una diferencia de 13.32% mayor de remoción de turbidez al tener las condiciones controladas a escala laboratorio que en el equipo industrial DAF con el mismo tratamiento químico. Dicha variación puede deberse a fluctuaciones en el caudal alimentado al equipo DAF por variaciones en el nivel del tanque de succión de la bomba, o bien a la falta de un sello perfecto aislado entre las cámaras de flotación y de agua clarificada en el

DAF, asociado a desgaste en algunos componentes del equipo, sin embargo, para efectos del presente proyecto el objetivo es mostrar una mejora comparativa con el equipo instalado.

En la prueba de jarras realizada, con las condiciones controladas, se ensayó el tratamiento de coagulante Q-180 y floculante QAN-93 propuesto, con el cual se obtuvo un promedio de remoción de turbidez de 81.00%, un 2.50% mayor que el tratamiento inicial previo a la modificación planteada, considerando una dosis de floculante promedio de 10 ppm, producto de los 2 niveles 5 y 15 ppm establecidos. Dicha comparación tiene validez ya que de una dosificación promedio propuesta de 10 ppm de floculante QAN-93, es muy similar a la de 8.6 ppm del floculante Andifloc 1122 dosificado previo a la propuesta dada.

Al realizarse el tratamiento en el DAF con el tratamiento propuesto y las mismas dosificaciones del tratamiento inicial se obtuvo un promedio de remoción de turbidez de 73.85%, un incremento de 8.67% de remoción respecto al tratamiento inicial. Con base en el criterio obtenido del análisis de efectos del modelo experimental realizado, para este tratamiento la dosificación de coagulante Q-180 no aportaba diferencia significativa, con esto, se procedió a reducir a 10 ppm la dosis de coagulante Q-180 (propuesta ajuste 1) durante la fabricación de un mismo gramaje de papel 127 g/m², según se muestran los resultados detallados en el Cuadro C.1, se obtuvo un promedio de remoción de 73.89% manteniéndose casi constante para 15 y 10 ppm de coagulante. Esta tendencia casi constante en la remoción ante la variación en la dosis de coagulante y en búsqueda del beneficio económico, motivó analizar la respuesta en un mismo gramaje 147 g/m² con 7 ppm de coagulante (propuesta ajuste 2) para el cual se obtuvo una remoción promedio de 67.57%, una disminución significativa de 6.32%, por lo cual se procedió a regresar a la dosificación anterior de coagulante a 10 ppm (propuesta ajuste 3) y continuar con las mediciones, sin realizarse más ajustes. Cabe mencionar que los ajustes de dosificación se realizaron durante la fabricación de gramaje en la línea de producción.

En el Cuadro 7.1 se detallan para análisis los factores y resultados promedio de cada uno de los planteamientos realizados.

Cuadro 7.1. Resumen de datos de los resultados experimentales a escala de laboratorio y en el DAF.

Tratamiento	Coagulante	Dosis promedio (ppm)	Floculante	Dosis promedio (ppm)	promedio Turbidez entrada (NTU)	promedio Turbidez salida (NTU)	Remoción promedio (%)
Inicial (DAF)	PAC	15,80	Andifloc 1122	8,60	3608,00	1256,00	65,18%
Inicial (LAB)	PAC	15,00	Andifloc 1122	8,00	4141,90	890,70	78,50%
Propuesta (LAB)	Q-180	15,00	QAN-93	10,00	4141,90	787,40	81,00%
Propuesta (DAF)	Q-180	15,00	QAN-93	8,00	3638,00	951,00	73,85%
Propuesta ajuste 1 (DAF)	Q-180	10,00	QAN-93	8,00	4047,50	1055,50	73,89%
Propuesta ajuste 2 (DAF)	Q-180	7,00	QAN-93	8,00	4096,00	1329,00	67,57%
Propuesta ajuste 3 (DAF)	Q-180	10,00	QAN-93	8,00	3941,80	958,40	75,71%

El resultado final de remoción promedio con coagulante Q-180 a 10 ppm y floculante QAN-93 con 8 ppm fue de 75.71%, un 10.53% mayor de remoción con el tratamiento propuesto. En la Figura 7.8 se muestra la tendencia de los tratamientos ensayados.

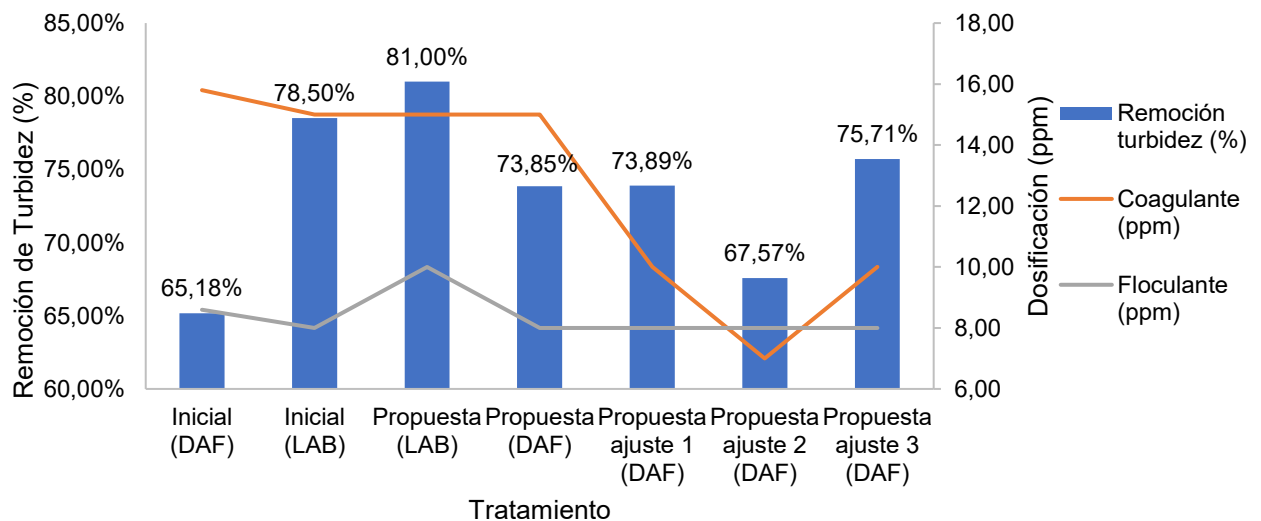


Figura 7.8. Resultados promedio de cada tratamiento ensayado respecto al Cuadro 7.1.

Si bien en la prueba de jarras se notó un efecto significativo con la dosificación de 15 ppm de floculante QAN-93, se mantuvo una dosificación de floculante QAN-93 cercana al floculante Andifloc 1122 inicial, es decir de 8 ppm al DAF; esto para evitar una afectación en el costo, ya alcanzada una mejora a las condiciones iniciales. Dicha afectación se detalla en el cuadro 7.2 de la siguiente sección. En la Figura 7.9 se muestra una buena formación de los flóculos durante la operación del DAF con el tratamiento propuesto.



Figura 7.9. Floculación en el DAF con el tratamiento químico propuesto, 10 ppm de coagulante Q-180 y 8 ppm de floculante QAN-93 (fotografía tomada en Empaques Santa Ana el 06 de marzo del 2019).

7.3. ANÁLISIS DE COSTO PARA LA APLICACIÓN DAF

En el Cuadro 7.2 se resumen los resultados de estimación del costo en un periodo mensual y anual, para las dosificaciones ensayadas en cada caso. Dicho costo se muestra $\$/m^3$ de agua tratada y en $\$/tonelada$ de papel producido, así como la proyección a valores absolutos de costo.

Cabe mencionar que el floculante, es el químico de mayor costo en el tratamiento, por esta razón en la fila 2 del Cuadro 7.2 se planteó una simulación de costo intermedia no probada en el DAF, que justifica lo comentado en el análisis experimental, donde el nivel alto de floculante QAN-93 de 15 ppm a pesar de ser efecto analizado para mejorar la variable respuesta remoción de turbidez, significaría en un incremento al costo de 0.44 $\$/ton$ o bien 32608 $\$/año$ respecto al tratamiento inicial. Partiendo de este argumento se decidió que aparte de la mejora obtenida en remoción de turbidez, ésta fuera complementada por un beneficio económico.

Cuadro 7.2. Detalle del tratamiento químico utilizado en el DAF, comparación de las condiciones iniciales, sistema propuesto y su proyección anual \$/año.

Tratamiento	Producto	Precio unitario (\$/kg)	Dosis (ppm)	(\$/m ³)	(\$/ton)	Costo total (\$/ton)	Costo (\$/mes)	Proyección costo (\$/mes)	Proyección costo (\$/año)
Coagulante inicial	PAC	2,50	15,80	0,04	2,51		15333,18		
Floculante inicial	Andifloc 1122	4,50	8,60	0,04	2,46	4,98	15022,64	30355,82	364269,82
Coagulante propuesto	Q-180	2,22	10,00	0,02	1,41		8617,64		
Floculante propuesto a 15 ppm	QAN 93	4,20	15,00	0,06	4,01	5,42	24455,45	33073,09	396877,09
Coagulante propuesto	Q-180	2,22	10,00	0,02	1,41		8617,64		
Floculante propuesto	QAN 93	4,20	8,00	0,03	2,14	3,55	13042,91	21660,55	259926,55
Ahorro inicial-propuesto				0,03	1,42	1,43	8695,27	8695,27	104343,27

Nota: La base de cálculo empleada es un caudal de alimentación al DAF de 700 m³/h, una productividad de 11 ton/h y un promedio de producción mensual de 6100 toneladas de papel.

La base de cálculo de caudal alimentado al DAF se referencia según la capacidad de la bomba de agua blanca instalada. La producción mensual de 6100 toneladas es referenciada según el crecimiento observado para el periodo 2019.

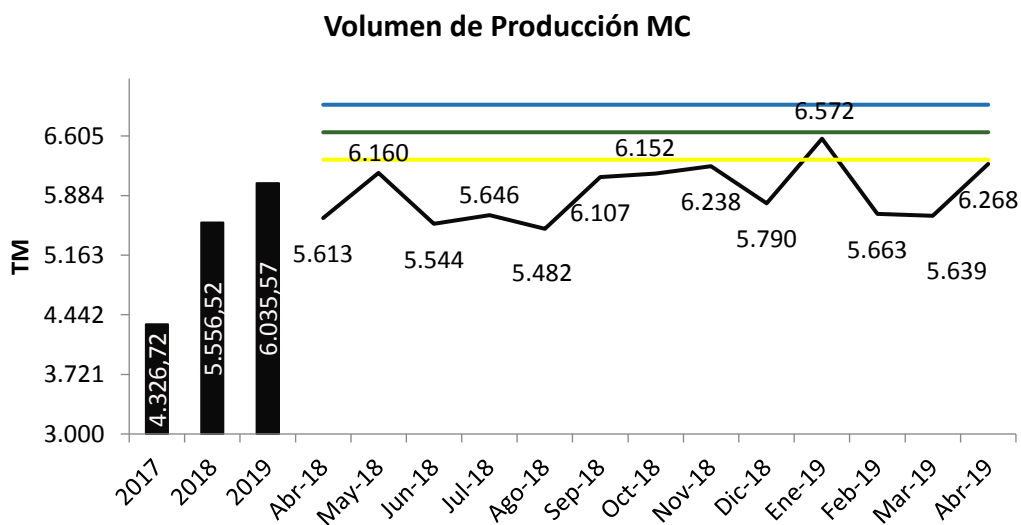


Figura 7.10. Tendencia del Volumen de Producción del Molino Coyal.

La inversión realizada para el desarrollo de la prueba fue de 9763.2 dólares. El ahorro que se puede obtener durante un mes completo con el tratamiento químico propuesto al DAF es de aproximadamente 8695.27 dólares. La proyección anual de ahorro con este tratamiento bajo las mismas condiciones es de 104 343.27 dólares. El costo total presupuestado para el año 2019 en químicos utilizados para la fabricación de papel es de 32 \$/ton, con el tratamiento químico propuesto el aporte del costo del sistema químico al DAF pasaría de un 15.63% a 11.09% del costo total, lo que significa aproximadamente una disminución de 4.5%, sin considerar el efecto lateral que puede tener la mejora obtenida de la remoción de turbidez sobre la dosificación de los demás químicos.

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. CONCLUSIONES

- Se determinó mediante el análisis factorial que los efectos significativos son tipo y dosis de floculante, y su interacción con el tipo de coagulante, por lo que la propuesta comprende los niveles, floculante QAN-93 a 15 ppm, con coagulante Q-180, así mismo que el factor dosificación de coagulante Q-180 para los niveles evaluados de 10 y 20 ppm no tenía una variación significativa en la remoción de turbidez.
- Con el tratamiento químico propuesto de coagulante Q-180 a 10 ppm y floculante QAN-93 a 8 ppm se obtuvo una remoción de turbidez de 75.71% en el DAF, lo cual significó una mejora promedio de 10.53% en la remoción de turbidez, respecto al tratamiento inicial.
- Se demostró una tendencia de disminución en la turbidez del agua cruda alimentada al DAF al incrementar el gramaje del papel en fabricación, lo cual era esperado por tenerse una mayor capacidad de depósito de partículas de menor tamaño al aumentar el espesor de la hoja papel en las etapas de formación.
- Se determinó que para un mismo tratamiento químico evaluado a nivel de laboratorio y en el equipo industrial, se tiene un 13.32% de mayor remoción en condiciones controladas de laboratorio que en el DAF, lo cual demuestra que alguna otra variable no controlada en DAF pueda ser significativa.
- Se obtuvo una remoción de turbidez constante, al ajustar el coagulante Q-180 propuesto durante la fabricación de un mismo gramaje, desde una dosificación de 15 a 10 ppm durante la prueba en el DAF.
- En cuanto a la evaluación económica, con el tratamiento químico propuesto y las condiciones de ensayo en el DAF, se obtuvo una disminución al costo total de químicos de 4.5%, respecto al tratamiento inicial. Lo cual mediante una proyección anual se estimó un ahorro de 103 423.27 dólares.

8.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda implementar por un periodo de unos 3 meses el tratamiento químico Q-180 y QAN-93 propuesto al DAF, pues se determina un beneficio técnico y económico considerable en comparación con el tratamiento actual.
- Se estudie el impacto técnico y económico con la aplicación del tratamiento propuesto durante unos 6 meses, sobre el desempeño de los demás químicos directos: encolante,

agentes de retención y polímeros de resistencia aplicados en la zona húmeda de la fabricación de papel Kraft al disminuir la carga coloidal en el agua de proceso.

- En caso de obtenerse un beneficio económico relevante por ahorro de los químicos para dar resistencia al papel, se recomienda realizar una relación costo beneficio que motive ensayar con una dosificación de floculante QAN-93 a 15 ppm.
- Se recomienda implementar un procedimiento de control de calidad de productos químicos ingresados a planta y se compare con el certificado de calidad dado por el proveedor.

BIBLIOGRAFÍA

- ASPAPEL. Asociación Española de fabricantes de pasta, p. y. (31 de Octubre de 2017). ASPAPEL. Obtenido de www.aspapel.es
- Aznar, M. Á. (2002). *Reducción del Consumo de Agua en la producción de papel a partir de papel recuperado*. Zaragoza, España: S.A. Industrias celulosa Aragonesa (SAICA).
- Bajpai, P. (2017). *Pulp and paper Industry Emerging Waste Water Treatment Technologies* (1st ed.). Elsevier. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811099-7.00004-6>
- Bing, W., Shui, Y., & Puzhen, L. (2016). Comparison of flocs characteristics using before and after composite coagulants under different coagulation mechanisms. *Biochemical Engineering Journal*. ELSEVIER, 107-117.
- Díaz, D. F. (20 de Octubre de 2017). Consumo de Agua Fresca en Colombia y Perú. (A. M. Quesada, Entrevistador)
- Gess, J. M. (1998). *Retention of fines and fillers during papermaking*. USA: Tappi press.
- Gutierrez Pulido, H., & de la Vara Salazar, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. México D.F.: McGraw-Hill Interamericana Editores S.A.
- Habibzadeh, Y., & Gurbanov, K. (2004). *Effect of using dissolved air flotation system on industrial wastewater treatment in pilot scale*. Iran: University of Applied Sciences & Technology Tabriz, Institute of Physics of Azerbaijan National Academy of Sciences.
- Holik, H. (2006). Handbook of Paper and Board. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 150-329.
- krofta, c. (04 de 12 de 2017). *Air Dissolving Tube (ADT)*. Obtenido de https://www.krofta.com/files/Krofta_ADt.pdf
- Lawrence Wang, K., Guss, D., & Krofta, M. (2010). Kinetics and Case Histories of Activated Sludge Secondary Flotation Systems. En L. Wang, Y.-T. Hung, & N. Shamas, *Handbook of Advanced Industrial and Hazardous Wastes Treatment* (págs. 1155-1187). Taylor and Francis Group.
- Liu, H., Yang, S., & Ni, Y. (2010). Effect of Pulp Fines on the Dye-Fiber Interactions during the Color-Shading Process. *American Chemical Society*, 8544-8549.
- Rao, D. (2010). *Introduction to Biochemical Engineering* (2nd ed.). New Delhi: McGraw Hill Education Pvt.
- Rojas Gaona, O. (2003). *Química del papel*. Colombia: Cenpapel.
- Ruben Miranda, C. N. (2009). Internal Treatment of Process Waters in Paper Production by Dissolved Air Flotation with Newly Developed Chemicals.1.Laboratory Tests. *American Chemical Society*, 2199-2205.
- Ruth Ordoñez, D. H. (2009). Influence of Water Quality on the Efficiency of Retention Aids Systems for the Paper Industry. *American Chemical Society*, 10247-10252.

- SA Water Government of South Australia. (2013). Dissolved Air Flotation (DAF). *Trade Waste Guideline*, 1-8.
- Spuhler, D., & Mazille, F. (31 de Octubre de 2017). *Sustainable sanitation and water management*. Obtenido de <https://www.sswm.info/content/coagulation-flocculation>
- Tzfati, E., Sein, M., Rubinov, A., Raveh, A., & Bick, A. (2010). Pretreatment of wastewater: Optimal coagulant selection using Partial Order Scaling Analysis (POSA). *Journal of Hazardous Material. ELSEVIER*, 51-59.
- W, L., & C, D. (1996). *Investigation and analysis of industrial water usage in Taiwan*.
- Wankat, P. (2008). *Ingeniería de procesos de separación*. México: Pearson Educación.
- Yu, Y. F. (2006). *Water consumption, quality demanded, and re-use of treated wastewater for the paper industry*. Taiwan: Taiwan Paper Industry Association.

NOMENCLATURA

Mayúscula

DAF	Dissolved Air Flotation	adimensional
ADT	Air Dissolved Tube	adimensional
H	Constante de Henry	mol/L atm
V	Volumen	m ³
P	Presión	bar
Q	Caudal	m ³ /h; L/min
D	Dosificación	ppm; L/min; ton/h
C	Concentración	g/g (%)
NR	No reporta	adimensional

Minúscula

t	tiempo	min, s
m	masa	g
ppm	partes por millón	mg/L

Símbolos

ρ	densidad	g/mL
μ	viscosidad	mPa s; cps

Subíndice

B	componente B en el gas	adimensional
x	fracción molar	mol/mol
flot	flotación	adimensional
rot	rotación	adimensional
a	alimentación	adimensional
C	Coagulante	adimensional
F	Floculante	adimensional
d	disolución	adimensional
FD	floculante disolución	adimensional

APÉNDICE A. RESULTADOS EXPERIMENTALES

A.1. DATOS EXPERIMENTALES

Cuadro A1. Mediciones de la turbidez entrada, salida y remoción % de turbidez del DAF, con el programa químico inicial, en el periodo de junio-julio 2018.

Medición	Fecha	Gramaje	ton/h	ppm PAC	Caudal PAC (mL/min)	kg/ton PAC	ppm Andifloc 1122	Caudal Andifloc 1122 (mL/min)	kg/ton Andifloc 1122	Turbidez entrada (NTU)	Turbidez salida (NTU)	Remoción %
1	25/06/2018	161,00	10,29	15,80	161,70	1,07	8,60	19,11	0,58	3520,00	986,00	71,99%
2	26/06/2018	161,00	10,40	15,80	161,70	1,06	8,60	19,11	0,58	3644,00	1262,00	65,37%
3	27/06/2018	195,00	10,13	15,80	161,70	1,09	8,60	19,11	0,59	3722,00	1180,00	68,30%
4	28/06/2018	205,00	10,43	15,80	161,70	1,06	8,60	19,11	0,58	3122,00	1204,00	61,43%
5	29/06/2018	175,00	9,65	15,80	161,70	1,15	8,60	19,11	0,62	3920,00	984,00	74,90%
6	02/07/2018	147,00	9,69	15,80	161,70	1,14	8,60	19,11	0,62	3456,00	1024,00	70,37%
7	03/07/2018	161,00	10,62	15,80	161,70	1,04	8,60	19,11	0,57	3222,00	1206,00	62,57%
8	06/07/2018	161,00	9,65	15,80	161,70	1,15	8,60	19,11	0,62	3180,00	1168,00	63,27%
9	09/07/2018	112,00	7,24	15,80	161,70	1,53	8,60	19,11	0,83	4126,00	1236,00	70,04%
10	10/07/2018	112,00	7,91	15,80	161,70	1,40	8,60	19,11	0,76	4240,00	1436,00	66,13%
11	11/07/2018	112,00	7,01	15,80	161,70	1,58	8,60	19,11	0,86	4082,00	1472,00	63,94%
12	12/07/2018	127,00	8,80	15,80	161,70	1,26	8,60	19,11	0,68	3966,00	1416,00	64,30%
13	13/07/2018	220,00	9,52	15,80	161,70	1,16	8,60	19,11	0,63	3720,00	1166,00	68,66%
14	16/07/2018	147,00	9,59	15,80	161,70	1,15	8,60	19,11	0,63	3046,00	1262,00	58,57%
15	17/07/2018	127,00	8,12	15,80	161,70	1,36	8,60	19,11	0,74	3320,00	1306,00	60,66%
16	18/07/2018	112,00	7,31	15,80	161,70	1,51	8,60	19,11	0,82	3660,00	1464,00	60,00%
17	19/07/2018	112,00	7,61	15,80	161,70	1,45	8,60	19,11	0,79	4136,00	1366,00	66,97%
18	20/07/2018	112,00	7,61	15,80	161,70	1,45	8,60	19,11	0,79	4086,00	1432,00	64,95%
19	23/07/2018	147,00	9,59	15,80	161,70	1,15	8,60	19,11	0,63	3840,00	1270,00	66,93%
20	24/07/2018	147,00	7,93	15,80	161,70	1,39	8,60	19,11	0,76	3488,00	1294,00	62,90%
21	25/07/2018	161,00	9,44	15,80	161,70	1,17	8,60	19,11	0,64	3244,00	1240,00	61,78%
22	26/07/2018	161,00	9,54	15,80	161,70	1,16	8,60	19,11	0,63	3164,00	1348,00	57,40%
23	27/07/2018	195,00	10,39	15,80	161,70	1,06	8,60	19,11	0,58	3080,00	1166,00	62,14%
promedio		150,87		15,80	161,70	1,24	8,60	19,11	0,68	3608,00	1256,00	65,18%

Cuadro A.2. Corrida preliminar a nivel de laboratorio con tratamiento químico inicial.

Medición	Dosis Coagulante PAC (ppm)	Dosis Floculante Andifloc 1122 (ppm)	Entrada (NTU)	Salida (NTU)	Remoción turbidez (%)
1	15	8	4120,0	854,0	79,3
2	15	8	3963,0	792,0	80,0
3	15	8	3878,0	862,0	77,8
4	15	8	3922,0	778,0	80,2
5	15	8	3992,0	922,0	76,9
6	15	8	4136,0	878,0	78,8
7	15	8	4026,0	986,0	75,5
8	15	8	4078,0	802,0	80,3
9	15	8	4420,0	1012,0	77,1
10	15	8	4486,0	990,0	77,9
11	15	8	4332,0	966,0	77,7
12	15	8	4350,0	846,0	80,6
promedio	15	8	4141,9	890,7	78,5

Cuadro A.3. Resultados de remoción de turbidez para el diseño factorial definido para la prueba de jarras, aleatorizando las corridas con el estadístico Minitab 18 versión gratuita

Orden aleatorio	Orden Corrida	Tipo Coagulante	Tipo Floculante	Dosis Coagulante	Dosis Floculante	Entrada NTU	Salida NTU	% Remoción
41	1	Q-180	QAN-93	10 ppm	5 ppm	4397,0	905,0	79,4
31	2	Q-180	QDC-0223	20 ppm	5 ppm	4058,0	1162,0	71,4
46	3	Q-180	QDC-0223	10 ppm	15 ppm	4397,0	923,0	79,0
32	4	Q-180	QDC-0223	20 ppm	15 ppm	4058,0	922,0	77,3
25	5	Q-180	QAN-93	10 ppm	5 ppm	4058,0	916,0	77,4
5	6	polymin SK	QDC-0223	10 ppm	5 ppm	3970,8	878,0	77,9
24	7	polymin SK	QDC-0223	20 ppm	15 ppm	4058,0	846,0	79,2
23	8	polymin SK	QDC-0223	20 ppm	5 ppm	4058,0	896,0	77,9
19	9	polymin SK	QAN-93	20 ppm	5 ppm	4058,0	882,0	78,3
43	10	Q-180	QAN-93	20 ppm	5 ppm	4397,0	932,0	78,8
33	11	polymin SK	QAN-93	10 ppm	5 ppm	4397,0	923,0	79,0
8	12	polymin SK	QDC-0223	20 ppm	15 ppm	3970,8	808,0	79,7

13	13	Q-180	QDC-0223	10 ppm	5 ppm	3970,8	990,0	75,1
36	14	polymin SK	QAN-93	20 ppm	15 ppm	4397,0	792,0	82,0
22	15	polymin SK	QDC-0223	10 ppm	15 ppm	4058,0	862,0	78,8
26	16	Q-180	QAN-93	10 ppm	15 ppm	4058,0	702,0	82,7
27	17	Q-180	QAN-93	20 ppm	5 ppm	4058,0	854,0	79,0
39	18	polymin SK	QDC-0223	20 ppm	5 ppm	4397,0	1056,0	76,0
35	19	polymin SK	QAN-93	20 ppm	5 ppm	4397,0	918,0	79,1
21	20	polymin SK	QDC-0223	10 ppm	5 ppm	4058,0	952,0	76,5
18	21	polymin SK	QAN-93	10 ppm	15 ppm	4058,0	821,0	79,8
4	22	polymin SK	QAN-93	20 ppm	15 ppm	3970,8	883,0	77,8
47	23	Q-180	QDC-0223	20 ppm	5 ppm	4397,0	1302,0	70,4
20	24	polymin SK	QAN-93	20 ppm	15 ppm	4058,0	842,0	79,3
44	25	Q-180	QAN-93	20 ppm	15 ppm	4397,0	632,0	85,6
12	26	Q-180	QAN-93	20 ppm	15 ppm	3970,8	648,0	83,7
1	27	polymin SK	QAN-93	10 ppm	5 ppm	3970,8	867,0	78,2
37	28	polymin SK	QDC-0223	10 ppm	5 ppm	4397,0	1112,0	74,7
48	29	Q-180	QDC-0223	20 ppm	15 ppm	4397,0	1090,0	75,2
6	30	polymin SK	QDC-0223	10 ppm	15 ppm	3970,8	904,0	77,2
10	31	Q-180	QAN-93	10 ppm	15 ppm	3970,8	780,0	80,4
38	32	polymin SK	QDC-0223	10 ppm	15 ppm	4397,0	886,0	79,8
42	33	Q-180	QAN-93	10 ppm	15 ppm	4397,0	762,0	82,7
29	34	Q-180	QDC-0223	10 ppm	5 ppm	4058,0	1244,0	69,3
28	35	Q-180	QAN-93	20 ppm	15 ppm	4058,0	622,0	84,7
30	36	Q-180	QDC-0223	10 ppm	15 ppm	4058,0	1142,0	71,9
45	37	Q-180	QDC-0223	10 ppm	5 ppm	4397,0	1210,0	72,5
2	38	polymin SK	QAN-93	10 ppm	15 ppm	3970,8	853,0	78,5
15	39	Q-180	QDC-0223	20 ppm	5 ppm	3970,8	1022,0	74,3
34	40	polymin SK	QAN-93	10 ppm	15 ppm	4397,0	862,0	80,4
3	41	polymin SK	QAN-93	20 ppm	5 ppm	3970,8	854,0	78,5
40	42	polymin SK	QDC-0223	20 ppm	15 ppm	4397,0	878,0	80,0
16	43	Q-180	QDC-0223	20 ppm	15 ppm	3970,8	982,0	75,3
9	44	Q-180	QAN-93	10 ppm	5 ppm	3970,8	878,0	77,9
14	45	Q-180	QDC-0223	10 ppm	15 ppm	3970,8	874,0	78,0
17	46	polymin SK	QAN-93	10 ppm	5 ppm	4058,0	895,0	77,9
11	47	Q-180	QAN-93	20 ppm	5 ppm	3970,8	818,0	79,4
7	48	polymin SK	QDC-0223	20 ppm	5 ppm	3970,8	950,0	76,1

APÉNDICE B. RESULTADOS INTERMEDIOS

Cuadro B.1. Resultados promedio del agua blanca (entrada) y el agua depurada (salida) medidas en el DAF, en el periodo junio-julio 2018.

Parámetro	Unidad	Agua Blanca	Agua Depurada
pH		6.64	6.52
Temperatura	°C	48.00	46.20
Conductividad	μS/cm	4400.00	4250.00
Demanda Carga	μeq/L	480.00	425.00
Potencial Z	mV	-18.10	N.R.
Sólidos Totales	g/100 mL	0,16	0,03
Demanda Carga	mV	-16.00	-12.10
Turbidez	NTU	3608.00	1256.00
Remoción turbidez	%		65.18%

Cuadro B.2. Medición de turbidez de alimentación al DAF, a diferentes condiciones de gramaje y velocidad de producción de papel.

Fecha	27/12/2018	29/12/2018	08/01/2019
Tipo papel	Medium	Medium	Medium
Gramaje (g/m ²)	147	127	112
Velocidad (m/min)	481,5	495	507,5
Formulación pulper	100% OCC	100% OCC	100% OCC
Turbidez promedio Agua Blanca (NTU)	3970,8	4058,0	4397,0

APÉNDICE C. RESULTADOS FINALES

Cuadro C.1. Mediciones de la turbidez entrada, salida y remoción % de turbidez del DAF, con el programa propuesto.

Medición	Fecha	Gramaje	ton/h	ppm Q-180	Caudal Q-180 (mL/min)	kg/ton Q-180	ppm QAN- 93	Caudal QAN- 93 (L/min)	kg/ton QAN- 93	Turbidez entrada (NTU)	Turbidez salida (NTU)	Remoción %
1	22/02/2019	175,00	8,90	15,00	153,51	1,18	8,00	18,67	0,63	3486,00	920,00	73,61%
2	23/02/2019	127,00	9,80	15,00	153,51	1,07	8,00	18,67	0,57	3790,00	982,00	74,09%
3	23/02/2019	127,00	9,80	10,00	102,34	0,71	8,00	18,67	0,57	3802,00	1042,00	72,59%
4	24/02/2019	127,00	7,40	10,00	102,34	0,95	8,00	18,67	0,76	4070,00	1088,00	73,27%
5	25/02/2019	127,00	7,50	10,00	102,34	0,93	8,00	18,67	0,75	4152,00	1122,00	72,98%
6	26/02/2019	147,00	11,40	10,00	102,34	0,61	8,00	18,67	0,49	4166,00	970,00	76,72%
7	26/02/2019	147,00	11,40	7,00	71,64	0,43	8,00	18,67	0,49	4022,00	1272,00	68,37%
8	27/02/2019	147,00	9,30	7,00	71,64	0,53	8,00	18,67	0,60	4170,00	1386,00	66,76%
9	28/02/2019	147,00	10,90	10,00	102,34	0,64	8,00	18,67	0,51	3924,00	946,00	75,89%
10	01/03/2019	127,00	9,70	10,00	102,34	0,72	8,00	18,67	0,58	3964,00	902,00	77,25%
11	02/03/2019	195,00	10,70	10,00	102,34	0,65	8,00	18,67	0,52	3876,00	1040,00	73,17%
12	03/03/2019	127,00	7,90	10,00	102,34	0,89	8,00	18,67	0,71	3954,00	986,00	75,06%
13	04/03/2019	127,00	10,00	10,00	102,34	0,70	8,00	18,67	0,56	4122,00	942,00	77,15%
14	05/03/2019	161,00	9,50	10,00	102,34	0,74	8,00	14,00	0,44	4206,00	846,00	79,89%
15	06/03/2019	195,00	11,00	10,00	102,34	0,64	8,00	14,00	0,38	3526,00	738,00	79,07%
16	07/03/2019	195,00	11,10	10,00	102,34	0,63	8,00	14,00	0,38	3846,00	856,00	77,74%
17	08/03/2019	195,00	11,10	10,00	102,34	0,63	8,00	14,00	0,38	3295,00	788,00	76,08%
18	09/03/2019	112,00	8,30	10,00	102,34	0,84	8,00	14,00	0,51	3980,00	928,00	76,68%
19	10/03/2019	112,00	8,10	10,00	102,34	0,86	8,00	14,00	0,52	4244,00	1182,00	72,15%
promedio		148,26	9,67	10,21	104,49	0,76	8,00	17,19	0,54	3926,05	996,63	74,66%

APÉNDICE D. MUESTRA DE CÁLCULO

D.1. Determinación de la productividad ton/h.

La productividad está definida por la siguiente ecuación.

$$\begin{aligned} \text{Productividad} \left(\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right) & \quad (D.1) \\ & = \text{gramaje} \left(\frac{\text{g}}{\text{m}^2} \right) \times \text{ancho}(\text{cm}) \times \text{velocidad} \left(\frac{\text{m}}{\text{min}} \right) \times 60 \times (1 \times 10^{-8}) \end{aligned}$$

Para los datos del Cuadro C.1, fila 1 tenemos:

$$\text{Productividad} \left(\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right) = 175 \left(\frac{\text{g}}{\text{m}^2} \right) \times 250(\text{cm}) \times 340 \left(\frac{\text{m}}{\text{min}} \right) \times 60 \times (1 \times 10^{-8}) = 8.90 \text{ ton/h}$$

D.2. Determinación de la remoción de turbidez.

$$\% \text{ remoción turbidez} = \frac{\text{turbidez}_{\text{entrada}}(\text{NTU}) - \text{turbidez}_{\text{salida}}(\text{NTU})}{\text{turbidez}_{\text{entrada}}(\text{NTU})} \times 100 \quad (D.2)$$

Para los datos del Cuadro C.1, fila 1 tenemos:

$$\% \text{ remoción turbidez} = \frac{3486,00 (\text{NTU}) - 920,00(\text{NTU})}{3486,00(\text{NTU})} \times 100 = 73.61\%$$

D.3. Determinación de dosificación actual de coagulante D_c (ppm).

Las partes por millón es una medida utilizada normalmente para el escalamiento de procesos industriales que requieran la dosificación de químicos costeados por kg. Las partes por millón “ppm” se pueden también expresar como mg/L

Coagulante: Se dosifica puro.

$$D_c (\text{ppm}) = Q_c \left(\frac{\text{mL}}{\text{min}} \right) \times \rho \left(\frac{\text{g}}{\text{mL}} \right) \times \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} \times \frac{1}{Q_a} \left(\frac{\text{h}}{\text{m}^3} \right) \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \quad (D.3)$$

Densidad PAC= 1.15 g/mL

160 mL/min x 1.15g/mL = 184 g /min

$$D_c (\text{ppm}) = 160 \left(\frac{\text{mL}}{\text{min}} \right) \times 1.15 \left(\frac{\text{g}}{\text{mL}} \right) \times \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} \times \frac{1}{700} \left(\frac{\text{h}}{\text{m}^3} \right) \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} = 15.8 \text{ ppm}$$

D.4. Determinación de dosificación actual de floculante D_F (ppm).

Se dosifica, previamente preparado, mediante un hinchamiento durante 20 minutos.

5 kg de floculante en 1000 L de agua, concentración C_F de 0.5% (m/m).

$$D_F \text{ (ppm)} = Q_F \left(\frac{L}{\text{min}} \right) \times C_F \left(\frac{g_F}{g_{\text{agua}}} \right) \times \rho_d \left(\frac{1 \times 10^6 \text{ mg}}{1L} \right) \times \frac{1}{Q_a} \left(\frac{h}{m^3} \right) \times \frac{60 \text{ min}}{1h} \times \frac{1 m^3}{1000 L} \quad (\text{D.4})$$

Se asume ρ_d , 1 g/mL.

$$D_F \text{ (ppm)} = 20 \left(\frac{L}{\text{min}} \right) \times \frac{0.5\%}{100} \left(\frac{g_F}{g_{\text{agua}}} \right) \times \rho_d \left(\frac{1 \times 10^6 \text{ mg}}{1L} \right) \times \frac{1}{700} \left(\frac{h}{m^3} \right) \times \frac{60 \text{ min}}{1h} \times \frac{1 m^3}{1000 L} = 8.6 \text{ ppm}$$

Las dosificaciones del tratamiento actual son: Coagulante 15.8 ppm y floculante 8.6 ppm.

D.5. Determinación del flujo volumétrico mL/min de coagulante Q-180 al DAF.

$$Q_C \left(\frac{mL}{\text{min}} \right) = D_C \text{ (ppm)} \times Q_a \left(\frac{m^3}{h} \right) \times \frac{1000 L}{1 m^3} \times \frac{1h}{60 \text{ min}} \times \frac{1g}{1000 \text{ mg}} \times \frac{1}{\rho} \left(\frac{mL}{g} \right) \quad (\text{D.5})$$

Tomando como referencia el Cuadro C.1, fila 1 tenemos:

$$Q_C \left(\frac{mL}{\text{min}} \right) = 15 \text{ (ppm)} \times Q_a \left(\frac{m^3}{h} \right) \times \frac{1000 L}{1 m^3} \times \frac{1h}{60 \text{ min}} \times \frac{1g}{1000 \text{ mg}} \times \frac{1}{1.14} \left(\frac{mL}{g} \right) = 153.51 \text{ mL/min}$$

D.6. Determinación del flujo volumétrico L/min de Floculante QAN-93 al DAF.

$$Q_F \left(\frac{L}{\text{min}} \right) = D_F \text{ (ppm)} \times Q_a \left(\frac{m^3}{h} \right) \times \frac{1000 L}{1 m^3} \times \frac{1h}{60 \text{ min}} \times \frac{1g_F}{1000 \text{ mg}_F} \times \frac{1}{C_{FD} (\% \text{ m/m})} \times \frac{1}{\rho_{FD}} \left(\frac{mL}{g} \right) \quad (\text{D.6})$$

O bien,

$$Q_F \left(\frac{L}{\text{min}} \right) = D_F \left(\frac{mg}{L} \right) \times Q_a \left(\frac{m^3}{h} \right) \times \frac{1000 L}{1 m^3} \times \frac{1h}{60 \text{ min}} \times \frac{1g_F}{1000 \text{ mg}_F} \times \frac{100g_{FD}}{0.5g_F} \times \frac{1mL_{FD}}{1g_{FD}}$$

Tomando como referencia el Cuadro C.1, fila 1 tenemos:

$$Q_F \left(\frac{L}{\text{min}} \right) = 8 \left(\frac{mg}{L} \right) \times 700 \left(\frac{m^3}{h} \right) \times \frac{1000 L}{1 m^3} \times \frac{1h}{60 \text{ min}} \times \frac{1g_F}{1000 \text{ mg}_F} \times \frac{100g_{FD}}{0.5g_F} \times \frac{1mL_{FD}}{1g_{FD}} = 18.67 \text{ L/min}$$

D.7. Determinación de la dosificación en kg de químico por cada tonelada de papel (kg/ton).

$$\left(\frac{kg}{ton\ papel}\right) = Dosis\ (ppm) \times \frac{700\ m^3}{1h} \times \frac{1000L}{1m^3} \times \frac{1}{productividad} \left(\frac{h}{ton}\right) \times \frac{1\ kg}{1 \times 10^6 mg} \quad (D.7)$$

Tomando como referencia el Cuadro C.1, fila 1, para el Q-180 tenemos:

$$\begin{aligned} \left(\frac{kg}{ton\ papel}\right) &= 15(ppm) \times \frac{700\ m^3}{1h} \times \frac{1000L}{1m^3} \times \frac{1}{8.90} \left(\frac{h}{ton}\right) \times \frac{1\ kg}{1 \times 10^6 mg} \\ &= 1.18 \left(\frac{kg}{ton\ papel}\right) \text{ de coagulante} \end{aligned}$$

D.8. Determinación del costo químico por m³ agua tratada (\$/m³).

Se requiere un tratamiento de 700 m³/h para una producción de papel en proceso continuo de 11 ton/h.

A partir de estas relaciones se pueden expresar el costo de la siguiente manera:

$$ppm = \frac{mg}{L} = \frac{g}{m^3}$$

$$\frac{\$}{m^3} = ppm \left(\frac{g}{m^3}\right) \times \frac{1kg}{1000g} \times \text{precio} \left(\frac{\$}{kg}\right) \quad (D.8)$$

Tomando como referencia el Cuadro 10.1, línea 1 tenemos para el coagulante PAC:

$$\frac{\$}{m^3} = 15.8 \left(\frac{g}{m^3}\right) \times \frac{1kg}{1000g} \times 2.50 \left(\frac{\$}{kg}\right) = 0.04\ \$/m^3$$

D.9. Cálculo del costo químico por ton papel producida (\$/ton).

$$\frac{Costo\ \$}{ton\ papel} = \frac{\$}{m^3} \times Q_a \left(\frac{m^3}{h}\right) \times \frac{1\ h}{ton\ papel\ producida} \quad (D.9)$$

Tomando como referencia el Cuadro 10.1, línea 1 tenemos para el coagulante PAC:

$$\frac{Costo\ PAC\ \$}{ton\ papel} = 0.04 \frac{\$}{m^3} \times 700 \left(\frac{m^3}{h}\right) \times \frac{1\ h}{11\ ton\ papel\ producida} = 2.51\ \$/ton$$

APÉNDICE E. PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA DE JARRAS

1. Se toma muestra de 20 litros del agua de drenaje de la mesa de formación, que está siendo alimentada al *DAF* sin adición previa de químicos, en tres corridas de producción de gramaje diferente. Se realizará la medición de la turbidez del agua entrada al *DAF*.
2. Se toma la muestra en beakers de 1 L, las cuales serán colocadas en grupos de 4 en el equipo para prueba de jarras.
3. Se encienden los agitadores del equipo *FLOCCULATION TESTER* descrito en el Cuadro 8.3, a una velocidad de agitación de 100 rpm.
4. Seguidamente considerando volumen total 1 L, se agrega coagulante, al nivel correspondiente siguiendo el orden de las corridas, según el Cuadro A.3.
5. Pasados los 5 minutos, se adiciona a la misma muestra el floculante al nivel correspondiente según la corrida, y se mantiene en agitación durante 10 minutos.
6. Seguidamente se apaga el agitador, permitiendo el reposo hasta que los sólidos floten (12 minutos).
7. Se toma una alícuota del decantado mediante el uso de una pipeta de 25 mL y una pera. A esta alícuota se le mide la turbidez en el turbidímetro *HACH 2100Q01*.
8. Lo mismo se realiza para las combinaciones y nivel de dosificación tabuladas en el Cuadro A.3.
9. Se registran los datos y se determina la remoción de turbidez.
10. Las dosificaciones a nivel de laboratorio son reportadas como ppm y los efectos determinados son considerados para los ajustes en el ensayo al *DAF*. Se realiza la adición de flujo volumétrico de productos químicos, relacionado con el caudal de agua alimentada al *DAF*.

Para la dosificación en el equipo de jarras de los niveles propuestos, es necesario la preparación de una disolución analítica de los químicos propuestos.

Para coagulante: A nivel A-= 10 ppm=10 mg/L, se hará una disolución 0.1 (%m/m)

Siendo 1 g de coagulante:1000 mL de agua destilada.

Se adicionan 10 g de la disolución, en el L de agua cruda.

Para floculante: Se adiciona B-= 5 ppm= 5 mg/L, se hará una disolución 0.1 (%m/m)

Siendo 1 g de floculante: 1000 mL de agua destilada.

Se adicionan 10 g de la disolución, en el L de agua cruda.

APÉNDICE F. INFORMACIÓN TÉCNICA DE LOS PRODUCTOS QUIMICOS

Cuadro F.1. Propiedades fisicoquímicas del tratamiento coagulante-floculante, condiciones iniciales.

Tratamiento actual	Nombre	Proveedor	Familia	CAS	% sólidos	Ionicidad	ρ (g/mL)	μ (cps a 5 g/L)	pH
Coagulante	Q-PAC	Quiticol S.T.S.A.	Policloruro de aluminio	132741-9	45	catiónico	1,1-1,14	1800	3
Floculante	Andifloc 1122	Andicol	micro polímero patentado		44	aniónico	1,05	2500	5

Cuadro F.2. Propiedades fisicoquímicas de los 2 coagulantes y floculantes propuestos.

Producto	Nombre	Proveedor	Familia	CAS	% sólidos	Ionicidad	ρ (g/mL)	μ (mPa s)	pH
C1	Polymin SK	BASF chemical company	polietilenimina ramificada	7732-18-5	24,5	catiónico	1060	750	8,1
C2	Q-180	Quiticol S.T.S.A.	poliamina ramificada	124-40-3	50	catiónico	1,11-1,14	24000 cps	3,2
F1	QDC-0223	Quiticol S.T.S.A.	poliacrilamida	patentado	46	catiónico	1	NR	3,5
F2	QAN-93	Quiticol S.T.S.A.	poliacrilamida	patentado	100	aniónico	0,8	5000 cPS al 5%	3

Cuadro F.3. Características de venta de los coagulantes y floculantes propuestos.

Producto	Nombre	Apariencia	Presentación (kg)	Precio \$/kg, puesto en planta
C1	Polymin SK	líquido, amarillento traslúcido	1000	3,04
C2	Q-180	líquido, amarillento traslúcido	1000	2,22
F1	QDC-0223	líquido, blanco turbio	1050	4,35
F2	QAN-93	polvo, blanco	25	4,20

APÉNDICE G. FICHAS TÉCNICAS DE LOS PRODUCTOS QUÍMICOS



FICHAS TÉCNICA
PRODUCTO Q-PAC

1. DESCRIPCIÓN	
<p>Es un producto constituido de policloruro de aluminio en solución ($Al_2(OH)_nCl_{3-n}$) (CAS No: 1327-41-9) que tiene gran utilidad en el proceso de tratamiento y limpieza de aguas de proceso, y en el manejo de floculación de aguas residuales durante la manufactura del papel, sistemas de flotación en la industria textil, cerámica, extracción de petróleo y cosmética.</p>	
2. PROPIEDADES QUÍMICAS	
Apariencia:	Líquido
Color:	Amarillo traslúcido
Olor:	Inodoro
Solubilidad:	Muy soluble en agua
Carga:	Catiónico
% sólidos:	35-45
Densidad a 25°C:	1,11-1,14 g/mL
Viscosidad (cps) a 25 °C:	18000 - 22000
pH:	2,1-3,5
Temperatura fusión (°C):	No se registra
Temperatura Ebullición (°C):	No se registra
3. USOS	
<p>Recomendado para el tratamiento de las aguas residuales y se utiliza además como neutralizante de carga aniónica.</p>	
4. BENEFICIOS	
<ul style="list-style-type: none"> • Es coadyudante del proceso de encolado alcalino facilitando el proceso de adsorción catiónica del AKD sobre la fibra y de esta manera maximizando el encolado. • En algunos casos puede disminuir la demanda catiónica. 	
5. PREPARACIÓN	
<p>El producto puede agregarse puro, por lo que no requiere una preparación previa.</p>	
6. DOSIFICACIONES Y PUNTO DE APLICACIÓN	
<ul style="list-style-type: none"> • Se recomienda aplicar Q-PAC después de la bomba de alimentación del agua blanca al DAF o al sistema recuperador de fibra que este implementado. • Una dosificación puntual recomendada es de: 6-15 ppm (mg/L) de forma continua. 	
7. MEDIDAS DE PRIMEROS AUXILIOS	
<ul style="list-style-type: none"> • Inhalación: 	<p>Llevar a la víctima a un sitio confortable, ventilado y fresco. Lavar nariz y boca con agua abundante y mantener en reposo y abrigado. Si su respiración es dificultosa suministre oxígeno. Consultar al médico lo más pronto posible.</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Ingestión 	<p>Si la víctima esta consciente y alerta darle de beber agua o leche. No induzca al vomito. Consultar al médico lo más pronto posible. Nunca suministre algo por la boca si la persona esta inconsciente o convulsionando. En caso de vomito disponer a la persona de costado.</p>

Dirección: Carretera a Ciudad Colón. 400 m al oeste de los semáforos de Piedades. Detrás del Taller Sibaja. Bodega N° 7
Santa Ana, San José, Costa Rica.
Teléfono: +506-22038645/88353063 Fax: +506-22034487 E-MAIL: quiticol@racsa.co.cr Apartado Aéreo: 38561-00
Ciudad Colón. San José. Costa Rica

Figura G.1. Ficha técnica del Coagulante utilizado inicialmente base PAC.



FICHA TÉCNICA

ANDIFLOC 1122

CÓDIGO -
 VERSIÓN 2
 FECHA REVISIÓN 16-02-2013

DESCRIPCIÓN

ANDIFLOC 1122 es una macropartícula orgánica estructurada, soluble en agua, y de carácter aniónico empleada como segundo componente en un tratamiento de retención y drenaje.

ANDIFLOC 1122 se aplica normalmente después del screen de máquina para crear microfloculación en la pasta, después de la adición de una poliacrilamida catiónica lineal aplicada antes del screen de máquina.

NOMENCLATURA

Nombre químico: Micropolímero aniónico

PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS

Aspecto:	Líquido opaco*
Viscosidad:	1000-1500 cps*
Dilución en agua:	Max. 5 g/L*
Viscosidad aprox. @ 5 g/L	2500 cps*
Carácter iónico:	Aniónico, alto
Peso molecular:	Medio*
Densidad:	1.05 ± 0.03 g/cc*
pH (solución acuosa @ 5 g/L):	5-8*
Tiempo de almacenamiento:	6 meses

USOS Y APLICACIÓN

Beneficios:

- ✓ Aumenta la retención sin afectar la formación
- ✓ Mejora la formación a niveles dados de retención y drenaje
- ✓ Mejora la eficiencia energética en la formación, prensado y secado del papel
- ✓ Aumenta la productividad de la máquina de papel.

Preparación recomendada de soluciones:

Solución stock:	0.3-0.5% máximo, tiempo de almacenamiento de 1-2 días máximo*
Solución de alimentación:	0.05-0.2%

Se recomienda emplear una unidad de emulsificación para la preparación de la solución stock que considere un tiempo de maduración de 60 minutos. Para la preparación de la solución de alimentación se recomienda emplear un mezclador estático en línea.

Figura G.2. Ficha técnica del Floculante utilizado inicialmente Andifloc 1122.



QUITICOL S.T., S.A.

TECNOLOGÍA, PRODUCTOS Y SERVICIOS

**HOJA TÉCNICA DE SEGURIDAD
BARREDOR DE CARGA ANIÓNICA Q-180**

1. DESCRIPCIÓN:

El barredor de Carga aniónica Q-180 es una poliamina de mediano peso molecular, orgánico que se dispersa totalmente en agua. El barredor Q-180 por su alta cationicidad tiene aplicación en la industria papelera para disminuir la demanda de carga "basura aniónica" de las aguas del circuito, adaptando así el medio para obtener un buen desempeño de los demás químicos de carácter catiónico agregados al proceso como: almidón, AKD, agentes de retención, entre otros.

2. PROPIEDADES FÍSICAS-QUÍMICAS:

Apariencia:	Líquido traslucido.
Color:	Amarillento
Olor:	Inodoro
Solubilidad:	Totalmente soluble
Carga:	Catiónico (3000-3000 μ eq/g)
Densidad a 25°C:	1,11-1,14 g/mL
Viscosidad (cps) a 25 °C:	24000 - 25000
pH:	3,0 - 4,0
Sólidos Totales:	50 \pm 2
Temperatura Ebullición (°C):	No se registra

3. USOS:

El barredor de carga aniónica Q-180 se utiliza en la industria papelera para adecuar procesos donde se utilicen químicos catiónicos como: Dispersantes de Pitch, AKD, almidones, Agentes de retención, Resistencia en húmedo y en seco.

4. BENEFICIOS:

- Uso eficiente del almidón catiónico.
- Efectos óptimos de drenaje, en particular en el campo de los papeles producidos con fibra de madera y fibra secundaria.
- Aumenta la producción y disminuye el consumo de vapor.
- Efectos de retención elevados en el proceso de fabricación de papel.
- Presenta un alto desempeño como agente de retención de fibra y en el proceso de depuración de aguas residuales.
- Aumenta el desempeño del encolado, así como de los agentes de retención y drenado.

Dirección: Carretera a Ciudad Colón. 400 m al oeste de los semáforos de Piedales. Detrás del Taller Sibaja. Bodega N° 7
Santa Ana, San José, Costa Rica.

Teléfono: +506-22038645/88353063 Fax: +506-22034487 E-MAIL: quitol@traca.co.cr Apartado Aéreo: 38561-00
Ciudad Colón. San José. Costa Rica

Figura G.3. Ficha técnica del Coagulante propuesto Q-180.

Polymin SK

Composición	Polietilenimina modificada de alto peso molecular.
Forma de suministro	Solución acuosa de color amarillo pálido
Almacenamiento	12 meses. (En recipientes cerrados y a temperaturas inferiores a 35 °C)
Estabilidad a materiales	Según la experiencia habida hasta el presente, los siguientes materiales son adecuados para los recipientes de almacenamiento, tuberías de dosificación y bombas: aceros inoxidables (p. ej. material n° 1.4541 [V2A], o bien 1.4571 [V4A]), poliéster (p. ej. Palatal® A 410), polietileno (p. ej. Lupolan®), polipropileno y PVC duro.

Propiedades

Densidad	aprox. 1060 kg/m ³
pH	aprox. 8
Viscosidad (Brookfield, 20 °C)	aprox. 750 mPa · s
Ionogenicidad	catiónico
Sólidos	aprox. 24,5%
Solubilidad	de muy fácil dilución con agua fría en cualquier proporción
Punto de solidificación	aprox. - 5 °C En caso de haberse helado, el producto se puede emplear de nuevo después de deshelarlo cuidadosamente y homogenizarlo a continuación.

Los valores indicados expresan únicamente el margen esperado de propiedades físicas. La especificación del producto conteniendo los márgenes exactos de tolerancia se facilitará caso de solicitarse.

Aplicación

Acción

El Polymin SK, siendo un producto cationactivo, reacciona con los componentes de la pasta de papel fijando en las fibras las pastas finas, los agentes de carga, las sustancias de acompañamiento en solución coloidal, las sustancias mucilaginosas y las sustancias orgánicas disueltas. Adicionando este producto antes de la caja de entrada de pasta de la máquina de papel o cartón se consigue una mejor retención de esos componentes en el papel y cartón.

Mediante la deshidratación de las fibras y la fijación simultánea de las pastas finas se acelera además el desagüe de la pasta en la tela y se facilita el secado en el secadero. Así pues, con el Polymin SK se reduce el grado de refinado, se acorta el tiempo de desagüe, se aumenta el contenido seco en las prensas húmedas y se disminuye el consumo específico de vapor.

Si el Polymin SK solamente se adiciona a las aguas residuales de la máquina de papel se consigue, gracias a la reacción descrita, separar mejor las sustancias sólidas. Ello aumenta el grado de efectividad de los recogepastas y de las instalaciones de depuración de las aguas residuales. Con la recuperación de pastas se ahorran, por tanto, materias primas y se obtienen aguas residuales mejor depuradas.

El Polymin SK es muy eficaz en un margen de pH de 4 a 7,5. Las cantidades de alumbre que se utilizan normalmente para la fabricación de papel y cartón no perjudican su efecto. Pequeñas cantidades de alumbre pueden incluso ejercer efecto positivo. Únicamente aplicando cantidades extremadamente elevadas de alumbre, como a veces se da en casos especiales en la práctica, se puede producir una cierta disminución de su efectividad.

El Polymin SK no perjudica en general el blanco del papel y, adicionado en cantidades inferiores a 0,15%, tampoco origina generalmente empeora-

Figura G.4. Ficha técnica del Coagulante propuesto polymin SK.



QUITICOL S.T., S.A.

TECNOLOGÍA, PRODUCTOS Y SERVICIO

**HOJA TÉCNICA DE SEGURIDAD
DESHIDRATANTE DE LODOS QDC-0223**

1. DESCRIPCIÓN:

El Deshidratante de lodos QDC-0223 es una poliacrilamida catiónica líquida dispersa en solventes como ácido cítrico CAS No. 77-92-9, hidroprocesado CAS No. 64742-47-8, alcoholes etoxilados (CAS No. 6002-97-1, 68439-50-9, 68551-12-2) utilizados para favorecer el secado y el control de olores en el tratamiento de lodos.

2. PROPIEDADES FÍSICAS-QUÍMICAS:

Apariencia:	Líquido
Color:	Blancuzco
Olor:	Hidrocarburo
Solubilidad:	Soluble en agua. Limitado por la viscosidad
Carga:	Catiónico
Gravedad específica:	Aprox 1,0
Viscosidad (cps) a 25°C:	No disponible
pH:	3,0-4,0 en agua
Temperatura fusión (°C):	No disponible
Temperatura Ebullición (°C):	Aproximadamente 100 °C.

3. USOS: Este producto puede ser beneficioso en cualquier proceso de separación sólido-líquido. Es especialmente recomendado para deshidratación de lodos en:

- Filtro de banda, filtro prensas de placas, centrifugas y prensas de tornillo.
- Ayudante de coagulación.
- Sistemas de flotación con aire disuelto (DAF).
- Sedimentación por gravedad.
- Espesamiento.
- Clarificación de agua.

Dirección: Carretera a Ciudad Colón. 400 m al oeste de los semáforos de Piedras. Detrás del Taller Sibaja. Bodega N° 7 Santa Ana, San José, Costa Rica.

Teléfono: +506-22038645/88353063 Fax: +506-22034487 E-MAIL: quitol@traca.co.cr Apartado Aéreo: 38561-00 Ciudad Colón, San José, Costa Rica

Figura G.5. Ficha técnica del Flocculante propuesto QDC-0223.



QUITICOL S.T., S.A.

TECNOLOGÍA, PRODUCTOS Y SERVICIO

**HOJA TÉCNICA DE SEGURIDAD
FLOCULANTE ANIÓNICO QAN-93**

1. DESCRIPCIÓN:

El Floculante QAN-93 es un polímero de muy alto peso molecular y estructura específica para las aplicaciones dadas. Funciona eficientemente como agente acondicionador de lodos y como ayudante en los procesos de clarificación de agua en una amplia variedad de industrias, así como en procesos de filtro-banda, filtro-prensa y filtros-centrífugos.

2. PROPIEDADES FÍSICAS-QUÍMICAS:

Apariencia:	Polvo (100% malla 10; 10% malla 2)
Color:	Blanco
Olor:	Inodoro
Solubilidad:	Soluble en agua. Limitado por la viscosidad
Carga:	Aniónico
Bulk density a 25°C (cm ³ /g):	0,80
Viscosidad (cps) a 25°C:	Según la concentración en agua: 5,0 g/L= 2000; 2,5 g/L=800; 1,0 g/L=300
pH:	3,0-4,0 en agua
Temperatura fusión (°C):	No se registra
Temperatura Ebullición (°C):	100 °C en agua

3. USOS: Este producto puede ser beneficioso en cualquier proceso de separación sólido-líquido. Es especialmente recomendado para:


- Filtro de banda, filtro prensas de placas, centrífugas y prensas de tornillo.
- Ayudante de coagulación.
- Sistemas de flotación con aire disuelto (DAF).
- Sedimentación por gravedad.
- Espesamiento.
- Clarificación de agua.

Dirección: Carretera a Ciudad Colón, 400 m al oeste de los semáforos de Piedades. Detrás del Taller Sibaja, Bodega N° 7 Santa Ana, San José, Costa Rica.


Teléfono: +506-22038645/88353063 Fax: +506-22034487 E-MAIL: quiticol@qcas.co.cr Apertado Aéreo: 38561-00 Ciudad Colón, San José, Costa Rica

Figura G.6. Ficha técnica del Floculante propuesto QAN-93.

APÉNDICE H. COTIZACIÓN DEL TRATAMIENTO QUÍMICO ENSAYADO EN EL DAF.



COTIZACION
 Martes 05 febrero del 2019



CEDULA JURÍDICA 3-101-306666-29
TELÉFONO: (+506)-22038645
FAX: (+506)-22034487
E-MAIL: quiticol@quiticol.co.cr

ENTREGADO A: Empaques Santa Ana S.A.
CONTACTO: Alejandro Morales Quesada
DIRECCIÓN: Coyol de Alajuela
ENVIADO POR: QUITICOL S.T, S.A.

En atención a su solicitud, nos permitimos cotizar los siguientes artículos

Cantidad	Unidad	Descripción	Presentación	Precio unitario	Precio total
2000	Kilogramos	Coagulante Catiónico Q-180	IBC de 1000kg c/u	\$2.22	\$4.440,00
1000	Kilogramos	Floculante Aniónico QAN-93	Sacos de 25kg c/u	\$4.20	\$4.200,00
				Sub Total:	\$8.640,00
				IMP. De Ventas:	\$1.123,20
				TOTAL:	\$9.763,20

VIGENCIA DE LA COTIZACIÓN: 30 días

Figura H.1. Cotización de los productos químicos cotizados para el tratamiento propuesto ensayado en el DAF.

APÉNDICE I. VARIABLES DE DISEÑO DE UN DAF

I.1. VOLUMEN DEL TANQUE DE FLOTACIÓN (V).

Se determina a partir del caudal requerido (Q) y el tiempo de residencia (t) para la separación. El tiempo de residencia en el clarificador según la eficiencia de separación, a menudo puede ser de 2.5 a 4 minutos.

$$V = Q \times t \quad (1.1)$$

Donde Q es el caudal y t es el tiempo de residencia.

El caudal alimentado es la variable de diseño para la escogencia del modelo de clarificador según sus dimensiones (Habibzadeh & Gurbanov, 2004).

I.2. TIEMPO DE RETENCIÓN (T).

El tiempo de retención (t) es el tiempo teórico que el agua permanece en el proceso. Se calcula dividiendo el volumen de líquido (V) entre el caudal (Q). El tiempo de retención real de una corriente será menor que el tiempo de retención teórico debido a "áreas muertas" asociadas a pérdidas en tuberías y eficiencia de las bombas.

$$t = \frac{V}{Q} \quad (1.2)$$

El tiempo de retención en la cámara de flotación es usualmente de 2.5 a 4 minutos dependiendo de las características del agua de proceso y el desempeño de la unidad de flotación (Habibzadeh & Gurbanov, 2004).

I.3. GEOMETRÍA DEL CLARIFICADOR.

Puede ser rectangular o circular. El más común es la forma circular, pues permite obtención de tiempo de retención mínimo, costo de compra, costo instalación: no requiere soportes de peso, espacio requerido mínimo, limpieza fácil, el fondo es seguro de limpiar, su capacidad de flujo alimentación (Habibzadeh & Gurbanov, 2004).

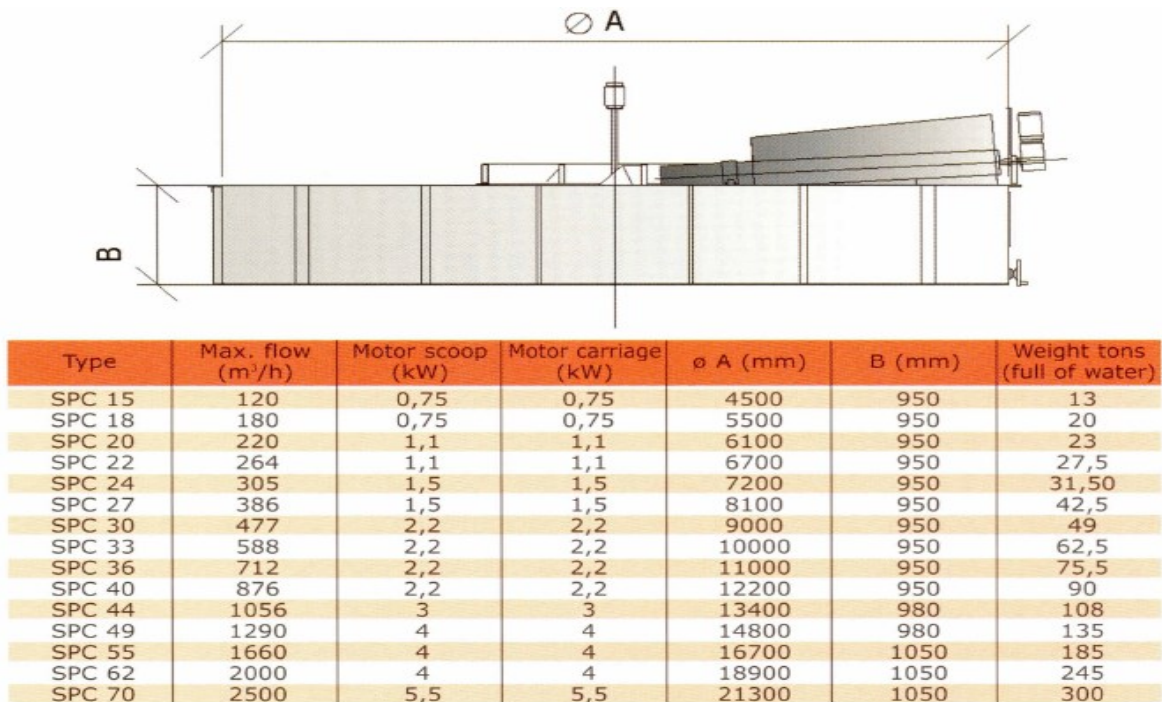


Figura I.1. Tabla de dimensiones y requerimientos según la capacidad de agua a tratar (Lawrence Wang, Guss, & Krofta, 2010).

I.4. CAUDAL DE AIRE.

Para el cálculo del volumen de aire disuelto necesario por hora, se estima entre 2-3% del agua alimentada. La relación de aire agua a presiones elevadas es muy baja, 0.15:1 por volumen (Habibzadeh & Gurbanov, 2004).

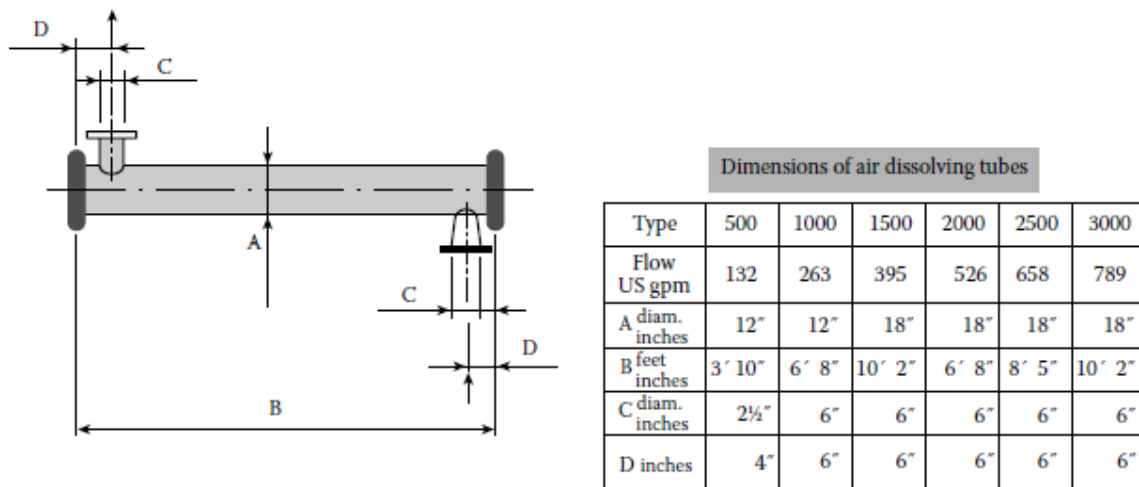
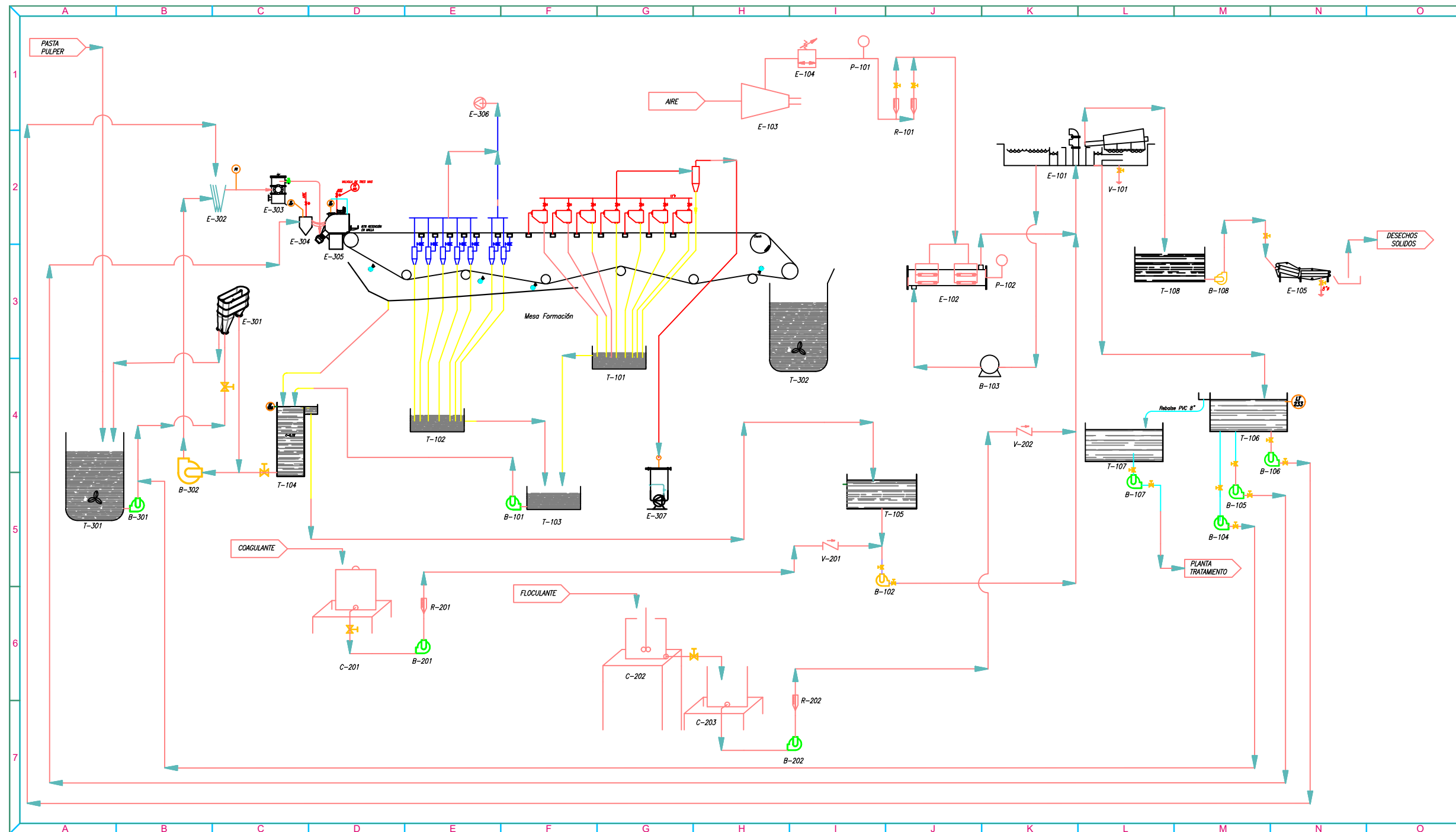


Figura I.2. Dimensiones para selección tipo de tubo, según flujo de aire requerido (Lawrence Wang, Guss, & Krofta, 2010).

APÉNDICE J. DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO *DAF*



NOMENCLATURA			NOMENCLATURA								
IDEM	DESCRIPCIÓN	ZONA	IDEM	DESCRIPCIÓN	ZONA						
T-101	Tanque agua alto vacío	F-3	T-302	Tanque couch	I-4						
T-102	Tanque agua bajo vacío	E-4	E-301	Caja nivel consistencia consistencia gramaje	C-3						
T-103	Tanque mezcla drenaje mesa formación	F-5	E-302	Depuradores arena cleaners	C-2						
T-104	Tanque lateral	C-4	E-303	Screen del headbox	C-2						
T-105	Tanque agua entrada DAF	I-5	E-304	Distribuidor y control perfil	C-2						
T-106	Tanque agua salida DAF	M-4	E-305	Caja salida chorro headbox	D-2						
T-107	Tanque agua a PTAR	L-4	E-306	Ventilador bajo vacío	E-1						
T-108	Tanque Lodos DAF	L-3	B-301	Bomba alimenta caja nivel gramaje	B-5						
B-101	Bomba llenado Tanque lateral	F-5	B-302	Bomba alimenta mesa formación	B-5						
B-102	Bomba alimentación DAF	I-5	V-101	Válvula purga arena DAF	L-2						
B-103	Bomba presurización ADT	K-3	<p style="text-align: center;">APROBACION COMISION REVISORA DE PERMISOS DE CONSTRUCCION</p>								
B-104	Bomba agua control consistencia	M-5									
B-105	Bomba agua control perfil peso	M-5									
B-106	Bomba agua depuración arena	M-4									
B-107	Bomba agua hacia PTAR	L-5									
B-108	Bomba agua alimentación prensa lodo	M-3									
E-101	Clarificador DAF	K-2									
E-102	Tubo inyección aire ADT	J-3	<p>PROYECTO: Clarificador DAF y uso de aguas Molino papetero Coyal</p>								
E-103	Compresor aire	H-1	<p>PROPIETARIO: Empaques Santa Ana</p>								
E-104	Regulador presión aire	I-1	<table border="1"> <tr> <th>PROVINCIA</th> <th>CANTON</th> <th>DISTRITO</th> </tr> <tr> <td>Alajuela</td> <td>Alajuela</td> <td>Alajuela</td> </tr> </table>			PROVINCIA	CANTON	DISTRITO	Alajuela	Alajuela	Alajuela
PROVINCIA	CANTON	DISTRITO									
Alajuela	Alajuela	Alajuela									
E-105	Prensa Lodos	N-3	<p>PROFESIONAL RESPONSABLE: Nombre: Alejandro Rubén Morales Quesada Cédula: 206840778</p>								
P-101	Manómetro P aire 6 bar	I-1	<p>INFORMACION REGISTRO PUBLICO: Propietario: Empaques Santa Ana</p>								
P-102	Manómetro P agua saturada aire 5.5 bar	K-3	<p>CONTENIDO: Diagrama de Flujo del Proceso de Clarificación DAF del circuito de aguas Molino Papetero Coyal</p>								
R-101	Rotámetro aire	J-1	ESCALA	FECHA	LAMINA						
C-201	Contenedor Coagulante	C-6	1:10	25/10/2018	-IQ-001						
C-202	Contenedor Floculante	G-6									
C-203	Tanque hinchamiento	H-6									
B-201	Bomba dosifica Coagulante	D-6									
B-202	Bomba dosifica floculante	I-7									
R-201	Medidor flujo coagulante	D-6									
R-202	Medidor flujo floculante	I-6									
V-201	Válvula check coagulante	I-5									
V-202	Válvula check floculante	K-4									
T-301	Tanque pulpa cartón	A-5									