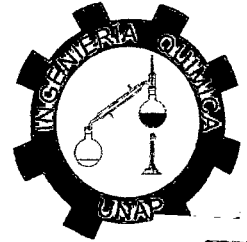




**UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA AMAZONÍA PERUANA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**



TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO

**"DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE UN EQUIPO DEL
TIPO MODULAR DE INTERCAMBIADOR IÓNICO, PARA EL
LABORATORIO DE PROCESOS Y OPERACIONES UNITARIAS DE
LA FIQ-UNAP**

T
660
Ch 2e
2010

PRESENTADO POR LOS BACHILLERES:

**CHÁVEZ PÉREZ, LILIBETH
LINARES VÁSQUEZ, GARY GABRIEL
REÁTEGUI VALLE, CÉSAR**



ASESOR:

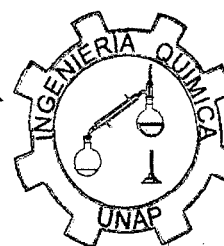
ING. JORGE ARMANDO VÁSQUEZ PINEDO

**IQUITOS-PERÚ
2010**

:3028



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA AMAZONÍA
PERUANA**



**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE UN EQUIPO
MODULAR DE INTERCAMBIADOR IÓNICO, PARA EL
LABORATORIO DE PROCESOS Y OPERACIONES UNITARIAS DE
LA FIQ-UNAP**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO

PRESENTADO POR:

Bach. GARY GABRIEL LINARES VÁSQUEZ

Bach. CÉSAR REÁTEGUI VALLE

Bach. LILIBETH CHÁVEZ PÉREZ

Mgr. JORGE ARMANDO VÁSQUEZ PINEDO
Asesor

**IQUITOS-PERÚ
2010**



Universidad Nacional de la Amazonía Peruana

Facultad de Ingeniería Química

Avda. Freyre 616, 2do Piso, Tel. (65)24 3665, Teléfax (65) 234101

quimica@unapiquitos.edu.pe



ACTA DE SUSTENTACION

En la ciudad de Iquitos, a las.....*8.9.20 p.m.*..... del séptimo día del mes de agosto del año dos mil diez, en el Auditorio de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, se dio inicio al acto de Sustentación Pública de la tesis intitulada: "**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE UN EQUIPO DEL TIPO MODULAR DE INTERCAMBIADOR IÓNICO, PARA EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS - FIQ**", presentada por los bachilleres **GARY GABRIEL LINARES VÁSQUEZ; LILIBETH CHÁVEZ PÉREZ y CÉSAR REÁTEGUI VALLE** para optar el **TÍTULO PROFESIONAL** de **INGENIERO QUÍMICO** que otorga la Universidad, de acuerdo a la Ley 23733 y el Estatuto General de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana.

El Jurado Calificador nombrado por la Dirección de Escuela de Formación Profesional, está integrado por:

Dr. JUAN MANUEL ROJAS AMASIFÉN
ING. SUMNER SHAPIAMA ORDÓÑEZ
ING. VÍCTOR GARCÍA PÉREZ

Presidente
Miembro
Miembro

Luego de haber escuchado con mucha atención la exposición y formuladas las preguntas necesarias, éstas fueron respondidas en forma.....*satisfactoria*.....

1º La tesis ha sido: *aprobada*..... por: *unanimidad*.....

Con calificación de: *buena*.....

2º Observaciones: *en hoja adjunta*.....

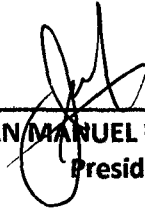
Siendo las.....*10:00 p.m.*..... se dio por terminado el acto, felicitando a los sustentantes por sus exposición.....*presentada*.....

[Signature]
Dr. JUAN MANUEL ROJAS AMASIFÉN
Presidente

[Signature]
ING. SUMNER SHAPIAMA ORDÓÑEZ
Miembro

[Signature]
ING. VÍCTOR GARCÍA PÉREZ
Miembro

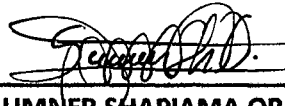
BANCA EXAMINADORA:



Dr. JUAN MANUEL ROJAS AMASIFÉN
Presidente



Ing. VÍCTOR GARCÍA PÉREZ
Miembro



Msc. SUMNER SHAPIAMA ORDÓÑEZ
Miembro



Mgr. JORGE ARMANDO VÁSQUEZ PINEDO
Asesor

AGRADECIMIENTO

Agradecemos al Ingeniero Roger Augusto Chávez Álvarez, por su apoyo incondicional para la elaboración del Equipo Modular. Así mismo al Ingeniero Jorge Armando Vásquez Pinedo.

César Reátegui Valle; Agradezco a Dios y a mis padres Sr. Dario Reátegui y la Sra. Dona Valle por brindarme el apoyo tanto moral como económico, para la formación como profesional en la Facultad de Ingeniería Química de la UNAP, a mi hermano Fran Alex, a todos mis seres queridos y amigos que contribuyeron a la culminación de la Tesis.

Gary Gabriel Linares Vásquez; Quiero agradecer en primer lugar al Dios que está en los cielos y darle la gloria, por brindarme su misericordia al concederme en primer lugar la vida y darme la fortaleza física, espiritual y mental y la inteligencia para culminar la carrera; agradecer a mis padres Sr. Oriel Linares Peña y Sra. Lía Lumeth Vásquez de Linares por brindarme su total apoyo incondicional porque gracias a su esfuerzo y sacrificio me sirvió para seguir adelante en la carrera, agradecer a mi abuelita Bertha Vásquez y a mis tíos Lida Vásquez y Luis Tavares por su apoyo brindándome durante el periodo de mi carrera; a los docentes de la Facultad de Ingeniería Química por su contribución en la formación profesional.

Lilibeth Chávez Pérez; Agradezco a mi Señora madrecita Gloria Pérez de Chávez, a mi padre Roger Chávez Álvarez, a mi abuelita Acela Ordonez del Castillo, a mis hermanos por haber contribuido a la formación de mi carrera y haber estado en los momentos más importantes de mi vida.

ÍNDICE DE CONTENIDO

PRESENTACIÓN	01
TESISTAS	02
ACTA DE SUSTENTACIÓN	03
BANCA EXAMINADORA	04
AGRADESIMIENTO	05
ÍNDICE DE CONTENIDO	06
INDICE DE CUADROS	13
INDICE DE FIGURAS	14
RESUMEN	16
INTRODUCCIÓN	18
ANTECEDENTES	20
OBJETIVOS	21
JUSTIFICACIÓN	22
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	23
1.1. ECUACIÓN GENERAL DE BALANCE DE MATERIA	23
1.2. ECUACIÓN DE CONTINUIDAD	24
1.3. ECUACIÓN GENERAL DE ENERGÍA	25
1.4. PÉRDIDA DE ENERGÍA DEBIDO A LA FRICCIÓN, ACCESORIOS Y EN LECHOS POROSOS	28
1.4.1. PÉRDIDA DE ENERGÍA DEBIDO A LA FRICCIÓN	28
1.4.2. PÉRDIDA DE ENERGÍA DEBIDO A LOS ACCESORIOS	30
1.4.3. PÉRDIDA DE ENERGÍA EN LECHOS POROSOS	33
1.5. DISEÑO EXPERIMENTAL	34
1.5.1. CONCEPTO	34
1.5.2. CARACTERÍSTICAS DE LA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	34
1.5.3. VENTAJAS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL	34

1.5.4.	VIABILIDAD DE LOS DISEÑOS EXPERIMENTALES	35
1.5.5.	INCONVENIENTES DEL DISEÑO EXPERIMENTAL	35
1.5.6.	CALIDAD DEL DISEÑO EXPERIMENTAL	35
1.5.6.1.	VALIDEZ INTERNA	35
1.5.6.2.	VALIDEZ EXTERNA	36
1.5.6.3.	VALIDEZ ECOLÓGICA	36
1.5.6.4.	VALIDEZ DE CONSTRUCTO	37
1.5.7.	TIPOS DE DISEÑOS EXPERIMENTALES	37
1.5.7.1.	DISEÑO EXPERIMENTAL AUTENTICO	37
1.5.7.1.1.	CLASIFICACIÓN DE LOS DISEÑOS	37
1.5.7.1.1.1.	DISEÑOS COMPLEJOS O DISEÑOS FACTORIALES	38
1.5.7.1.1.2.	CARACTERÍSTICAS DE LOS DISEÑOS COMPLEJOS O FACTORIALES	38
1.5.7.1.1.3.	EXPERIMENTOS O ENSAYOS SECUENCIALES	39
1.6.	PROCESO DE INTERCAMBIO IÓNICO	39
1.7.	RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO	40
1.7.1.	RESINAS CATIONICAS DE ÁCIDOS DÉBILES	45
1.7.2.	RESINAS CATIONICAS DE ÁCIDOS FUERTES	45
1.7.3.	RESINAS ANIÓNICAS DE BASES DÉBILES	46
1.7.4.	RESINAS ANIÓNICAS DE BASES FUERTES	47
1.7.5.	RESINAS CATIONICAS CICLO SODIO	47
1.8.	REGENERACIÓN DE LAS RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO	48
1.8.1.	REGENERACIÓN DE RESINAS DE INTERCAMBIO CATIONICO	48
1.8.2.	REGENERACIÓN DE RESINAS DE INTERCAMBIO ANIÓNICAS	49
1.9.	SELECTIVIDAD DE LAS RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO	50
1.10.	DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO DEL EQUIPO	50
1.10.1.	DESMINERALIZADOR	51
1.10.2.	INTERCAMBIADOR ABLANDADOR	52
1.10.3.	LÍNEA PARA ALIMENTACIÓN DE AGUA	52

1.10.4. LÍNEA PARA ALIMENTACIÓN DE QUÍMICOS	52
1.10.5. TANQUE RESERVORIO	53
1.11. APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN GENERAL DE BALANCE DE MATERIA AL EQUIPO MODULAR	53
1.12. VARIABLES MÁS IMPORTANTES PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN	58
1.12.1. VOLUMEN INTERNO DE CADA INTERCAMBIADOR	58
1.12.2. VOLUMEN DE LA RESINA DE CADA INTERCAMBIADOR	59
1.12.3. ALTURA DE LA RESINA EN CADA INTERCAMBIADOR	59
1.12.4. RANGO DE CAUDAL QUE PRODUCE LA ELECTROBOMBA	59
1.13. VARIABLES MÁS IMPORTANTES EN LAS OPERACIONES Y PROCESOS A LLEVARSE A CABO EN EL EQUIPO MODULAR	60
1.13.1. VARIABLES MÁS IMPORTANTES EN EL DESMINERALIZADO	60
1.13.2. VARIABLES MÁS IMPORTANTES EN EL ABLANDAMIENTO	60
1.13.3. EFICIENCIA PROMEDIO EN EL DESMINERALIZADO	60
1.13.4. EFICIENCIA PROMEDIO EN EL ABLANDAMIENTO	61
CAPÍTULO II: CÁLCULOS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN	62
2.1. CÁLCULOS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN	62
2.1.1. CÁLCULO DEL VOLUMEN INTERNO DE CADA INTERCAMBIADOR	62
2.1.2. CÁLCULO DEL VOLUMEN DE LA RESINA DE CADA INTERCAMBIADOR	62
2.1.3. CÁLCULO DEL LA ALTURA DE CADA INTERCAMBIADOR	63
2.2. CALULOS DE OPERACIÓN	64
2.2.1. CALCULO DEL INTERCAMBIADOR IÓNICO-CATIÓNICO	64
2.2.1.1. CALCULO DEL PROCESO	64
2.2.1.1.1. CALCULO DEL CAUDAL	64
2.2.1.1.2. CALCULO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO	65
2.2.1.1.3. CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE INTERCAMBIO IÓNICO	65

2.2.1.1.4.	CÁLCULO DE LA CONCENTRACIÓN DEL AGUA DE LA RED	65
2.2.1.1.5.	CALCULO DE LA CANTIDAD DE AGUA A TRATAR	66
2.2.1.1.6.	CALCULO DEL TIEMPO DE SATURACIÓN	66
2.2.1.2.	CÁLCULO DEL LAVADO	66
2.2.1.2.1.	CÁLCULO DEL CAUDAL	66
2.2.1.2.2.	CALCULO DEL TIEMPO	67
2.2.1.2.3.	CALCULO DEL VOLUMEN DE AGUA A UTILIZAR	67
2.2.1.3.	CÁLCULO DEL REGENERADO	67
2.2.1.3.1.	CÁLCULO DEL CAUDAL	67
2.2.1.3.2.	CÁLCULO DEL TIEMPO	67
2.2.1.3.3.	CÁLCULO DEL VOLUMEN DE AGUA UTILIZAR	68
2.2.1.3.4.	CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE H ₂ SO ₄	68
2.2.2.	CÁLCULO DEL INTERCAMBIADOR IÓNICO-ANIÓNICO	69
2.2.2.1.	CALCULO DEL PROCESO	69
2.2.2.1.1.	CALCULO DEL CAUDAL	69
2.2.2.1.2.	CALCULO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO	70
2.2.2.1.3.	CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE INTERCAMBIO IÓNICO	70
2.2.2.1.4.	CÁLCULO DE LA CONCENTRACIÓN DEL AGUA DE LA RED	71
2.2.2.1.5.	CALCULO DE LA CANTIDAD DE AGUA A TRATAR	71
2.2.2.1.6.	CALCULO DEL TIEMPO DE SATURACIÓN	71
2.2.2.2.	CÁLCULO DEL LAVADO	71
2.2.2.2.1.	CÁLCULO DEL CAUDAL	71
2.2.2.2.2.	CALCULO DEL TIEMPO	72
2.2.2.2.3.	CALCULO DEL VOLUMEN DE AGUA A UTILIZAR	72

2.2.2.3.	CÁLCULO DEL REGENERADO	72
2.2.2.3.1.	CÁLCULO DEL CAUDAL	
2.2.2.3.2.	CÁLCULO DEL TIEMPO	72
2.2.2.3.3.	CÁLCULO DEL VOLUMEN DE AGUA A UTILIZAR	73
2.2.2.3.4.	CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE NaOH	73
2.2.3.	CÁLCULO DEL ABLANDADOR	74
2.2.3.1.	CALCULO DEL PROCESO	74
2.2.3.1.1.	CALCULO DEL CAUDAL	74
2.2.3.1.2.	CALCULO DE LA VELOCIDAD DE FLUJO	75
2.2.3.1.3.	CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE INTERCAMBIO IÓNICO	75
2.2.3.1.4.	CÁLCULO DE LA CONCENTRACIÓN DEL AGUA DE LA RED	76
2.2.3.1.5.	CALCULO DE LA CANTIDAD DE AGUA A TRATAR	76
2.2.3.1.6.	CALCULO DEL TIEMPO DE SATURACIÓN	76
2.2.3.2.	CÁLCULO DEL LAVADO	77
2.2.3.2.1.	CÁLCULO DEL CAUDAL	77
2.2.3.2.2.	CALCULO DEL TIEMPO	77
2.2.3.2.3.	CALCULO DEL VOLUMEN DE AGUA A UTILIZAR	77
2.2.3.3.	CÁLCULO DEL REGENERADO	78
2.2.3.3.1.	CÁLCULO DEL CAUDAL	78
2.2.3.3.2.	CÁLCULO DEL TIEMPO	78
2.2.3.3.3.	CÁLCULO DEL VOLUMEN DE AGUA A UTILIZAR	78
2.2.3.3.4.	CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE NaCl	78
2.3.	DIAGRAMA DE BLOQUE DEL EQUIPO DE INTERCAMBIADOR IÓNICO	80
2.4.	DIAGRAMA DE BLOQUE DEL ABLANDADORDA	80

CAPÍTULO III: CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DEL EQUIPO 81

3.1.	MATERIALES Y EQUIPOS EMPLEADOS	81
3.2.	DETALLE DE LOS COMPONENTES PRINCIPALES DEL EQUIPO	82
3.2.1.	DETALLE DEL DESMINERALIZADOR	82
3.2.2.	DETALLE DEL INTERCAMBIADOR ABLANDADOR	83
3.2.3.	DETALLE DE LA LÍNEA PARA ALIMENTACIÓN DE AGUA	84
3.2.4.	DETALLE DE LA LÍNEA PARA ALIMENTACIÓN DE QUÍMICOS	85
3.2.5.	DETALLE PARA EL TANQUE RESERVORIO	86
3.3.	ESPECIFICACIÓN DE LOS COMPONENTES PRINCIPALES DEL EQUIPO MODULAR	86
3.4.	DISPOSICIÓN ADECUADA DEL EQUIPO EN EL LABORATORIO	93

CAPÍTULO IV: EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN DEL EQUIPO 94

4.1.	DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO	94
4.2.	ENSAYOS Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	98
4.3.	DISEÑO EXPERIMENTAL PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL EQUIPO MODULAR	98
4.4.	CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	100
4.5.	MANUAL DE INSTRUCCIONES PARA EL FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO MODULAR	103
4.6.	HIGIENE Y SEGURIDAD INDUSTRIAL	104

CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE COSTO

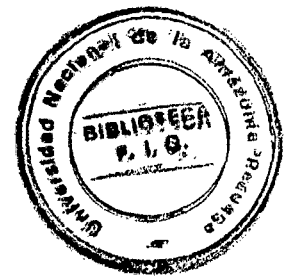
105

5.1.	COSTO DE DISEÑO	105
5.2.	COSTO DE CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN	105
5.3.	COSTO DE MATERIALES	106
5.4.	OTROS COSTOS	107

5.5. COSTO TOTAL	107
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	108
6.1. CONCLUSIONES	108
6.2. RECOMENDACIONES	109
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	110
BIBLIOGRAFÍA	112
ANEXOS	114
ANEXO 1: Curva de operación de la electrobomba	115
ANEXO 2: Simbología utilizada en el detalle de los componentes del equipo modular	116
ANEXO 3: Algunas propiedades fisicoquímicas de la resina en cada intercambiador	117
ANEXO 4: Fotos de la construcción del equipo modular de intercambio iónico	119
ANEXO 5: Fotos del equipo modular de intercambio iónico construido y ubicado en la Planta Piloto de Alcohol	120

INDICE DE CUADROS

• CUADRO 1.1. RESISTENCIA EN VÁLVULAS Y JUNTURAS EXPRESADA COMO LONGITUD EQUIVALENTE	32
• CUADRO N° 4.1.: ENSAYOS EN EL DESMINERALIZADOR	99
• CUADRO N° 4.2.: ENSAYOS EN EL ABLANDADOR	99
• CUADRO N° 5.1: COSTO DE DISEÑO	105
• CUADRO N° 5.2: COSTO DE CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN	105
• CUADRO N° 5.3: COSTO DE MATERIALES	106
• CUADRO N° 5.4: OTROS COSTOS	107



INDICE DE FIGURAS

• FIGURA 1.1. ESQUEMA QUE ILUSTR A LA ECUACIÓN DE CONTINUIDAD	25
• FIGURA 1.2. SISTEMA DE FLUJO DE FLUIDO QUE ILUSTR A LA ECUACIÓN GENERAL DE ENERGÍA	27
• FIGURA 1.3. DIAGRAMA DE MOODY	30
• FIGURA 1.4. MEDICIÓN DE h_L PARA UN FLUIDO QUE SE MUEVE EN UN LECHO POROSO	33
• FIGURA 1.5. RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO EN FORMA DE ESFERAS	44
• FIGURA 1.6. ESQUEMA PARA EL BALANCE DE MATERIA EN EL PROCESO DE DESMINERALIZADO	56
• FIGURA 1.7. ESQUEMA PARA EL BALANCE DE MATERIA EN EL PROCESO DE ABLANDAMIENTO	57
• FIGURA 2.1. ESQUEMA PARA EL ACONDICIONAMIENTO DE UN INTERCAMBIADOR	63
• FIGURA 3.1. DETALLE DEL DESMINERALIZADOR	82
• FIGURA 3.2. DETALLE DEL INTERCAMBIADOR ABLANDADOR	83
• FIGURA 3.3. DETALLE DE LA LÍNEA PARA ALIMENTACIÓN DE AGUA	84
• FIGURA 3.4. DETALLE DE LA LÍNEA PARA ALIMENTACIÓN DE QUÍMICOS	85
• FIGURA 3.5. DETALLE PARA EL TANQUE RESERVORIO	86
• FIGURA A1. CURVA DE OPERACIÓN DE LA ELECTROBOMBA	115
• FIGURA A.4.1.: PREPARACIÓN DEL INTERCAMBIADOR	119
• FIGURA A.4.2.: UNIENDO LAS PARTES	119
• FIGURA A.4.3.: COLOCANDO LA RESINA	119
• FIGURA A.4.4.: COLOCANDO LA RESINA	119
• FIGURA A.4.5.: INTERCAMBIADOR IÓNICO	119
• FIGURA A.5.1.: EQUIPO MODULAR	120
• FIGURA A.5.2.: INTERCAMBIADOR IÓNICO	120

• FIGURA A.5.3.: LÍNEA DE LAS SUS. QUÍMICOS	120
• FIGURA A.5.4.: TANQUE	120
• FIGURA A.5.5.: ELECTROBOMBA	120

II. RESUMEN

Los conocimientos implantados en la formación profesional de la Facultad de Ingeniería Química sobre los procesos y operaciones unitaria nos conllevan hacer equipos que complemente los conocimientos teóricos implantados dentro de las aulas, es por eso la necesidad que nos hace Construir E Instalar un Equipo Modular de Intercambio Iónico para el mejor desarrollo de los conceptos que adquirimos durante nuestra formación.

El presente trabajo de investigación tiene por contenido la descripción tanto teórico como práctico del Intercambiador Iónico y del Ablandador, en una primera instancia los dos equipos desarrollan un intercambio iónico debido a sus cargas eléctricas tanto de los aniones y cationes presentes en el agua.

El intercambiador iónico posee dos etapas: la primera consta de un Intercambiador Catiónico en forma circular, en su interior lleva grava, resina tipo Purolite C-100H con la cual se elimina a los cationes que están unidos a los iones cloruros, nitratos, sulfatos y silicatos, quedando en el agua los ácidos de las sales inicialmente presentes en el agualos; la segunda etapa consta de un Intercambiador Aniónico en forma circular, en su interior lleva grava, resina tipo Purolite A-400 con la cual se elimina a los aniones de los ácidos débiles tales como el ácido carbónico y el ácido silícico.

El Ablandador está formado un tubo de PVC y en su interior contiene grava, resina tipo Lewatit S-1467 con la cual se elimina a los cationes de Ca y Mg presentes en el agua a tratar.

Los equipos tanto el Desmineralizador y Ablandador constan del mismo volumen de resina (6 L) la resina tiene forma circulares y son gelatinosas, con la diferencia de la capacidad de Intercambio que posea cada resina la cual se menciona en el Capítulo II.

El desmineralizador y Ablandador trabajan independientemente, es decir no depende uno del otro. Las variables predominantes es el Caudal, sin embargo la temperatura y el pH no

alternan en nada el intercambio iónico; ya que el equipo puede trabajar a temperaturas mayores al del ambiente y a un rango de pH que va de 0-13.

Los cálculos de diseño y construcción se elaboraron con una expectativa académica las cuales están mencionadas en el Capítulo II; el manejo esta detallado dentro del Capítulo IV, ya que se tiene que hacer juego de válvulas para su obtimo funcionamiento.

Los equipos tienen un tiempo de servicio optimo, ya que llegan a saturarse en la cual se necesita hacer un regenerado con sustancias químicas que se especifican en el trabajo (Acido Sulfúrico, Soda Caustica, Cloruro de Sodio); también se recomienda hacer un lavado con agua destilada con el fin de separa los sólidos que puedan retener el intercambiador, ya que eso evita el área de contacto y así minimiza la eficiencia del intercambiador.

El uso que se le puede dar a dicho equipo es para la obtención de agua desmineralizada (intercambiador iónico) y agua blanda (Ablandador); el agua desmineralizada sirve para hacer análisis dentro del laboratorio, dando una seguridad y exactitud de los datos ya que está libre de iones que pueden intervenir dentro de algunas reacciones químicas. El agua blanda se puede utilizar para calderos.

III. INTRODUCCIÓN

Dentro la formación del ingeniero químico, las operaciones y procesos unitarios ocupan un lugar importante. El intercambio iónico es un proceso que implica la transferencia de uno o más iones de la fase fluida al sólido por intercambio o desplazamiento de iones de la misma carga, que se encuentran unidos por fuerzas electrostáticas a grupos funcionales superficiales. La eficacia del proceso depende del equilibrio sólido-fluido y de la velocidad de transferencia de materia, así mismo de operaciones de transporte de fluidos. Los sólidos suelen ser de tipo polimérico, siendo los más habituales los basados en resinas sintéticas. ⁽¹⁾

Muchos tipos de materiales de intercambio, en varios estados físicos han sido sintetizados y se encuentran comercialmente. Por ejemplo; membranas, esferitas, fibras, líquidos, etc. ⁽¹⁾

Los procesos de intercambio iónico, son básicamente reacciones químicas de sustitución entre un electrolito en solución y un electrolito insoluble con el cual se pone en contacto la solución. El mecanismo de estas reacciones y las técnicas utilizadas para lograrlas son tan parecidos a los de adsorción que, para la mayoría de los fines de ingeniería, el intercambio iónico puede considerarse simplemente como un caso especial de la adsorción. ⁽²⁾

Hoy en día, las sustancias de intercambio de iónico son usadas casi exclusivamente con el nombre de resinas. Estas resinas de intercambio iónico son materiales sintéticos, sólidos e insolubles en agua, que se presentan en forma de esferas o perlas de 0.3 a 1.2 mm de tamaño efectivo, aunque también las hay en forma de polvo. ⁽³⁾

En general las resinas de intercambio iónico operan en columnas, para favorecer el proceso de intercambio, parecido a la destilación o la destilación en bandejas.

La reacción de intercambio se desplaza en el lecho de resina, generalmente hacia los niveles inferiores. ⁽³⁾

Un ablandador es un equipo diseñado para reducir la concentración de sales de calcio y magnesio que provocan la incrustación en tuberías, accesorios, superficies de intercambio de calor entre otros, dichas sales forman la dureza permanente y temporal. Este tipo de agua se usa en la generación de vapor entre otros. ⁽⁴⁾

La dureza del agua está determinada por la cantidad de calcio y magnesio presentes en la misma. Estos iones forman sustancias poco solubles que ocasionan incrustaciones indeseables sobre las superficies con las que entra en contacto. Junto con la sílice, calcio y magnesio son los elementos a remover para evitar incrustaciones y toda vez que se trabaja con agua a temperaturas más altas que la del ambiente. ⁽⁴⁾

La desionización es un proceso que utiliza resinas de intercambio iónico de fabricación especial cuya función es eliminar las sales ionizadas del agua. Teóricamente puede eliminar el 100% de las sales. La desionización normalmente no elimina los compuestos orgánicos, virus o bacterias excepto a través del atrapado "accidental" en la resina. ⁽⁴⁾

En el presente trabajo de tesis, se plantea el diseño construcción e instalación de un equipo modular de intercambio iónico. Este equipo modular consta principalmente, de un desmineralizador y un intercambiador ablandador. El desmineralizador está constituido por dos intercambiadores, el primer intercambiador contiene una columna de resina catiónica y el segundo una columna de resina aniónica. El intercambiador ablandador consta sólo de una columna de resina catiónica. Además el equipo cuenta con una serie de componentes adicionales tales como: un tanque reservorio, una electrobomba, tramos de tubería recta y válvulas. Todos estos componentes adicionales cumplen una función específica en las diferentes operaciones y procesos que se llevan a cabo en el equipo. El detalle de cada uno de los componentes del equipo se da a conocer en el desarrollo del informe final, así mismo la función de cada uno de estos en las diferentes operaciones y procesos que llevan a cabo en el equipo.

III. ANTECEDENTES

La absorción de que las tierras de cultivo tenían la facultad de intercambiar iones alcalinos y alcalinos térreos, condujo a la introducción de la zeolita existente en la naturaleza y de la permutita sintética ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) para la desmineralización del agua. Estas sustancias ligan iones Ca^{++} , Fe^{+++} y Al^{+++} y seden para ello, agua con solamente iones Na^+ flojamente ligados (cambio de cationes).

VOIGT. R, BORNSCHEIN realizó un importante progreso, ha sido el descubrimiento de cambiadores sintéticos sobre una base de resina artificial, que se caracteriza por su elevada velocidad de intercambio, alta capacidad y gran resistencia química y mecánica, y con lo cual fue posible la eliminación de aniones. ⁽⁵⁾

Desde el año 1983, en la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (FIQ-UNAP), se vienen desarrollando proyectos de tesis que involucran en su contenido, diseño, construcción e instalación de equipos; de acuerdo a la revisión bibliográfica efectuada, existen varios trabajos de tesis que involucran diseño y construcción de equipos, pero específicamente los trabajos similares al que se pretende realizar son:

LOPEZ. V, RAMIREZ. S, han realizado un trabajo de tesis sobre alternativa de tratamiento de agua para caldero. ⁽⁶⁾

ARMAS. E, RABINES. H, han realizado un trabajo de tesis sobre diseño, construcción e instalación de un reactor catiónico para el Laboratorio de Procesos y Operaciones Unitarias de la FIQ-UNAP, en la actualidad el laboratorio no cuenta con este equipo. ⁽⁷⁾

MOTT, GEANKOPLIS, y otros, se mencionan algunas de las operaciones y procesos que servirán para el desarrollo del presente trabajo, los cuales contribuyen a determinar las ecuaciones para el diseño del equipo. ⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽³⁾

IV. OBJETIVOS

A. OBJETIVO GENERAL

Diseñar, construir e instalar un equipo modular de intercambio iónico para el Laboratorio de Procesos y Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería Química.

B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las variables más importantes de diseño y construcción del equipo modular
- Determinar las variables más importantes en las operaciones y procesos a llevarse a cabo en el equipo modular
- Seleccionar el tipo de resina adecuada para cada intercambiador.
- Seleccionar el material adecuado para la construcción.
- Realizar un análisis de costos



V. JUSTIFICACIÓN

Dentro de la formación del ingeniero químico se muestra el dictado de cursos relacionados con transferencia de materia. El equipo de intercambio iónico se relaciona con la transferencia de materia (fluido - sólido).

La FIQ-UNAP, cuenta con un laboratorio de procesos y operaciones unitarias que está destinado a las prácticas de los estudiantes como una manera de complementar los conocimientos teóricos adquiridos en el aula, contribuyendo así, en su formación profesional como futuros ingenieros químicos. A la inexistencia del equipo de intercambio iónico, en el mencionado laboratorio, es que se plantea el diseño, construcción e instalación de un equipo modular de intercambio iónico.

El equipo de intercambio iónico no está restringido al tratamiento de agua, sino que puede tener un amplio campo de aplicación, tal como: recuperación de uranio; decoloración y reducción de cenizas en soluciones de azúcar; recuperación y purificación de estreptomycin; remoción del ácido fórmico del formaldehído; recuperación de metales de soluciones; desalinización de aguas y eliminación de acidez de efluentes minero-metalúrgicos. En todos estos procesos que se pueden realizar en el equipo, el estudiante puede aplicar conocimientos de cursos como balance de materia y mecánica de fluidos, para adecuar las condiciones de operación que se requieren en el proceso de intercambio iónico. De esta forma el estudiante de la FIQ-UNAP, complementará sus conocimientos teóricos que recibió en las aulas y estará mejor formado para desenvolverse como profesional.

Por su relevancia en el tratamiento de aguas de los diversos procesos industriales, en la presente tesis se pretende dar una visión general, de las condiciones de operación para el proceso de intercambio iónico y de esta forma contribuir a mejorar el conocimiento del estudiante y egresado de la FIQ-UNAP.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.14. ECUACIÓN GENERAL DE BALANCE DE MATERIA

En un esfuerzo para determinar si una unidad de proceso está funcionando correctamente, se miden los flujos másicos de entrada y salida de un determinado componente, hallándose que no son las mismas. Existen sólo cuatro explicaciones posibles para justificar la diferencia observada entre los flujos medidos.

1. La unidad pierde al componente por alguna parte
2. Se está consumiendo el componente como reactivo, ó se está generando como producto dentro de la unidad de proceso.
3. Se está acumulando el componente dentro de la unidad, posiblemente al absorberse sobre las paredes.
4. Las mediciones contienen errores.

Si las mediciones son correctas y no hay fugas, las otras posibilidades de generación o consumo en una reacción química y acumulación dentro de la unidad de proceso son las únicas explicaciones posibles que justifican la diferencia entre los flujos de entrada y salida.

Se puede expresar un balance de materia de un componente en un sistema en la siguiente forma general.

$$\text{Acumulación} = \text{Entrada} - \text{Salida} + \text{Generación} - \text{Consumo} \quad (1.1)$$

Esta ecuación general puede formularse en función a la masa o al número de moles, ya sea para la cantidad total de material o a cualquier especie atómica o molecular involucrada en el proceso.

1.2. ECUACIÓN DE CONTINUIDAD

La masa de un fluido en movimiento no cambia al fluir. Esto da pie a una importante relación cuantitativa llamada **ecuación de continuidad**. Considérese una porción de tubo en el cual está fluyendo un fluido entre dos secciones transversales estacionarias con áreas A_1 y A_2 (figura 1.1). Las velocidades del fluido en estas secciones son v_1 y v_2 , respectivamente. No fluye fluido por los costados del tubo porque la velocidad del fluido es tangente a la pared en todos sus puntos. Durante un tiempo corto dt , el fluido en A_1 se mueve una distancia $v_1 dt$, (dt es la diferencial de tiempo) de modo que un elemento diferencial del volumen de control para el fluido de altura $v_1 dt$ y volumen $dV_1 = A_1 v_1 dt$ fluye dentro del tubo a través de A_1 . Durante ese mismo lapso, un cilindro de volumen $dV_2 = A_2 v_2 dt$ sale del tubo a través de A_2 .

Consideremos primero el caso de un fluido incompresible cuya densidad ρ tiene el mismo valor en todos los puntos. La masa dm_1 que fluye al interior del tubo por A_1 en el tiempo dt es $dm_1 = \rho A_1 v_1 dt$. Así mismo, la masa dm_2 que sale por A_2 en el tiempo dt es $dm_2 = \rho A_2 v_2 dt$. En flujo permanente no existe acumulación de masa en el volumen de control, entonces la masa en los puntos 1 y 2 es la misma, es decir: $dm_1 = dm_2$

$$\rho A_1 v_1 dt = \rho A_2 v_2 dt \quad (1.2)$$

Como la densidad es constante y el valor de dt es bastante pequeño, la ecuación (1.2) puede convertirse en:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (1.3)$$

El producto $A v$ es la razón de cambio de volumen por unidad de tiempo $\frac{dV}{dt}$ y también se denomina caudal Ca

$$Ca = A v \quad (1.4)$$

La ecuación (1.4) indica que la razón de cambio de volumen por unidad de tiempo tiene el mismo valor en cualquier punto del tubo.

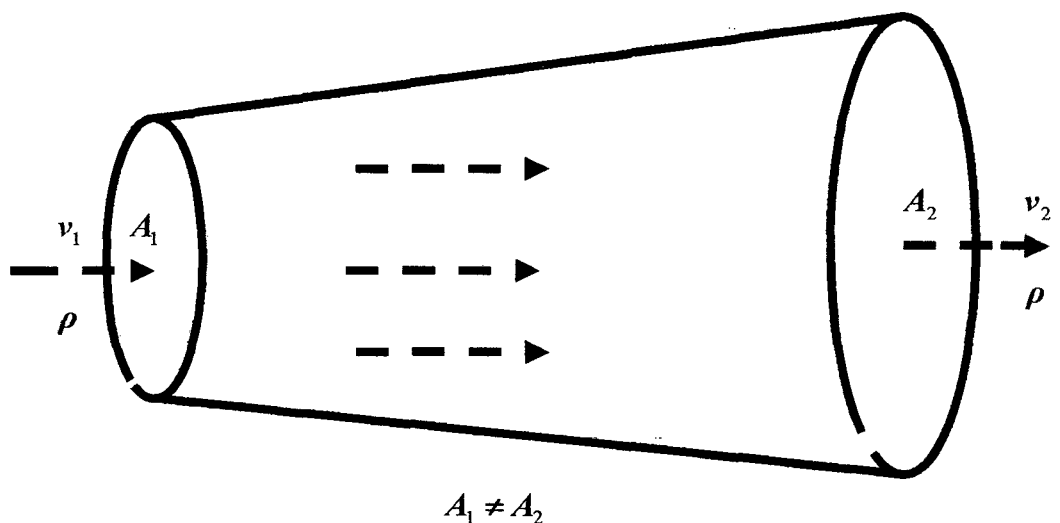


Figura 1.1. Esquema que ilustra la ecuación de continuidad.⁽⁹⁾

1.3: ECUACIÓN GENERAL DE ENERGÍA

La ecuación de energía, como se utiliza en el presente trabajo, es una expansión de la ecuación de Bernoulli, que hace posible resolver problemas en los que se presentan pérdidas adicionales de energía. La interpretación lógica de la ecuación de energía puede verse en la figura 1.2, que representa un sistema de flujo. Los términos E_1 y E_2 denotan la energía que posee el fluido por unidad de peso en las secciones 1 y 2, respectivamente.

También se muestran las adiciones (h_A), remociones (h_R) y pérdida de energía (h_L).

Para tal sistema la expresión del principio de conservación de energía es:

$$E_1 + h_A - h_R - h_L = E_2 \quad (1.5)$$

En forma general, la energía por unidad de peso que posee el fluido es:

$$E = \frac{P}{\gamma} + Z + \frac{v^2}{2g} \quad (1.6)$$

La ecuación (1.5) queda entonces:

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + h_A - h_R - h_L = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (1.7)$$

Esta es la forma de la ecuación de energía que se utiliza con mayor frecuencia en el presente trabajo. Al igual que con la ecuación de Bernoulli, cada término de la ecuación (1.7) representa una cantidad de energía por unidad de peso de fluido que fluye en el sistema. Las unidades SI típicas son N.m / N o metros; las unidades en el sistema Británico son lbf.- pie / lbf o pie. Es de suma importancia que la ecuación general de energía que se utiliza con mayor frecuencia esté escrita en la dirección de flujo, es decir, desde el punto de referencia, en la parte izquierda de la ecuación, al punto correspondiente, en el lado derecho. Los signos algebraicos juegan un papel crítico, debido a que el lado izquierdo de la ecuación (1.7) establece que un elemento de fluido que tenga una cierta cantidad de energía por unidad de peso en la sección 1, pueda tener una adición de energía ($+h_A$), una remoción de energía ($-h_R$) o una pérdida de energía ($-h_L$), antes de que alcance la sección 2. En tal punto contiene una cantidad diferente de energía por unidad de peso según lo que indican los términos de la parte derecha de la ecuación.

Por ejemplo en la figura 1.2, los puntos de referencia son 1 y 2, y en cada uno de estos se indican las cabezas de presión, de velocidad y elevación. Después de que el fluido abandona el punto 1, entra a la bomba, donde se le agrega energía. Un movilizador principal, que podría ser un motor eléctrico, hace funcionar la bomba y su movilizador transfiere energía al fluido ($+h_A$). Entonces el fluido fluye por un sistema de conductos compuesto por una válvula, codos y tramos de conducto en los que la energía se disipa, es decir, el fluido pierde energía ($-h_L$). Antes de alcanzar el punto 2, el fluido fluye a través de un motor de fluido (turbina) que retira algo de la energía para hacer funcionar un dispositivo externo ($-h_R$). La ecuación general de energía toma en cuenta todas estas energías. En un problema particular no todos los términos de la ecuación se requieren. Por ejemplo, si no hay un dispositivo mecánico entre las secciones de interés, los términos h_A y h_R serán cero, y pueden sacarse de la ecuación. Si las pérdidas de energía son tan pequeñas que pueden ser despreciadas, el término h_L puede eliminarse. Si existen estas dos condiciones, se puede ver que la ecuación (1.7) se reduce a la ecuación de Bernoulli.

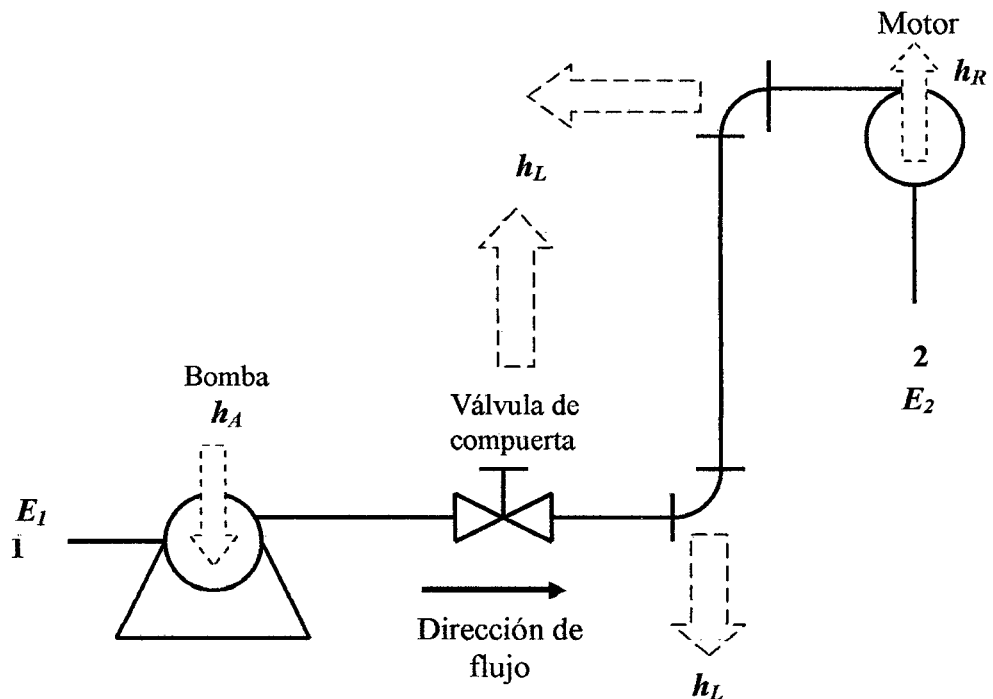


Figura 1.2. Sistema de flujo de fluido que ilustra la ecuación general de energía.⁽⁸⁾

1.4. PÉRDIDA DE ENERGÍA DEBIDO A LA FRICCIÓN, ACCESORIOS Y EN LECHOS POROSOS

1.4.1. PÉRDIDA DE ENERGÍA DEBIDO A LA FRICCIÓN

A medida que un fluido fluye por un conducto, tubo o algún otro dispositivo, ocurren pérdidas debido a la fricción interna en el fluido. Como se indica en la ecuación general de energía, tales pérdidas traen como resultado una disminución de la presión entre dos puntos del sistema de flujo. Es muy importante ser capaces de calcular la magnitud de dichas pérdidas de energía.

Una componente de pérdida de energía se debe a la fricción entre las paredes del conducto y el fluido en movimiento. La pérdida de energía por unidad de peso debido a la fricción, es proporcional al factor de fricción, la cabeza de velocidad y al cociente de la longitud entre el diámetro de la corriente del fluido.

En el caso de flujo en conductos y tubos, lo anterior se expresa de manera matemática en la ecuación de Darcy:

$$h_L = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g} \quad (1.8)$$

En la que:

h_L = Pérdida de energía por unidad de peso debido a la fricción (N.m / N)

L = Longitud de la corriente de fluido (m)

D = Diámetro del conducto (m)

v = Velocidad promedio del fluido (m/s)

f = Factor de fricción (sin dimensiones)

Para determinar el valor de f es necesario conocer lo siguiente:

1. Número de Reynolds

El número de Reynolds es una variable adimensional que define si el flujo de fluido se encuentra en régimen laminar, transición o turbulento (OCON J, TOJO G, 1986). Se puede evaluar mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Re} = \frac{v \times D}{\nu} \quad (1.9)$$

Donde: ν = Viscosidad cinemática del fluido (m^2/s).

2. Rugosidad relativa

La rugosidad relativa se define como D/ϵ , una alta rugosidad absoluta ϵ indica un valor bajo de D/ϵ , es decir, un conducto rugoso. Algunos textos utilizan otras convenciones para representar la rugosidad relativa, como ϵ/D o ϵ/r , en donde r es el radio del conducto.

3. Uso del diagrama de Moody

El diagrama de Moody se usa para determinar el valor del factor de fricción f en flujo turbulento, previamente conociéndose los valores del número de Reynolds y la rugosidad relativa. Por consiguiente, los datos básicos requeridos son el diámetro interior del conducto, el material del cual está hecho el conducto, la velocidad del fluido, el tipo de fluido y su temperatura con los cuales se puede encontrar la viscosidad. Véase la figura 1.3.

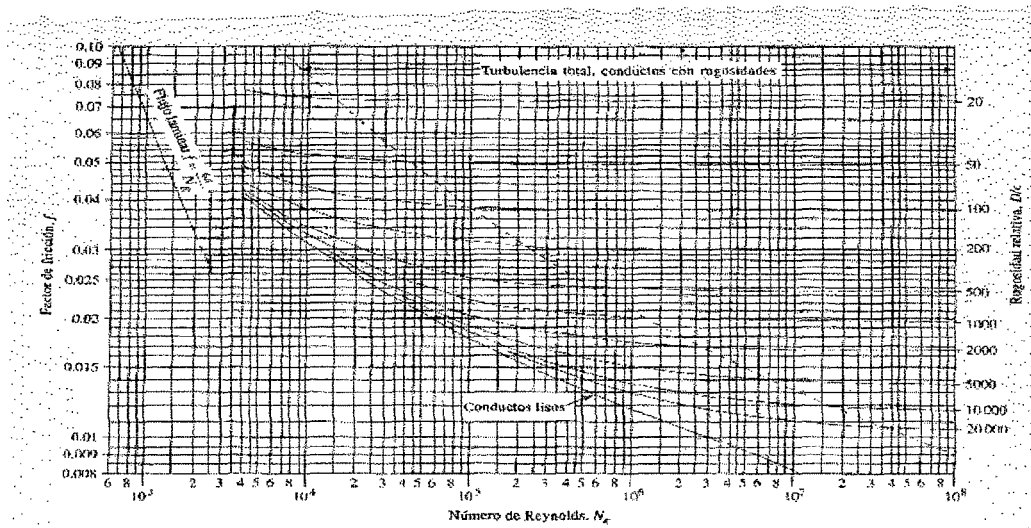


FIGURA 9.2 Diagrama de Moody. (Fuente: Pao, R.H.F. 1961. *Fluid Mechanics*, New York: John Wiley & Sons, p. 284.)

Figura 1.3. Diagrama de Moody.⁽⁸⁾

1.4.2. PÉRDIDA DE ENERGÍA DEBIDO A LOS ACCESORIOS

En la mayor parte de los sistemas de flujo, la pérdida de energía primaria se debe a la fricción del conducto, los demás tipos de pérdidas generalmente son pequeñas en comparación, y por consiguiente se hace referencia a ellas como pérdidas menores. Las pérdidas menores ocurren cuando hay un cambio en la sección cruzada de la trayectoria del fluido o en la dirección de flujo, o cuando la trayectoria del fluido se encuentra obstruida, como sucede con una válvula. La energía se pierde bajo éstas condiciones debido a fenómenos físicos bastantes complejos. La predicción teórica de la magnitud de estas pérdidas también es compleja, y por tanto, normalmente se usan los datos experimentales.

Para determinar la pérdida de energía a través de una válvula o junta, es necesario conocer lo siguiente:

1. Coeficiente de resistencia

Las pérdidas de energías son proporcionales a la cabeza de velocidad del fluido, al fluir éste alrededor de un codo o a través de una válvula. Los valores experimentales de pérdidas de energía generalmente se reportan en términos de un coeficiente de resistencia K , de la siguiente forma:

$$h_L = K \times \frac{v^2}{2g} \quad (1.10)$$

Se dispone de muchos tipos diferentes de válvulas y juntas de varios fabricantes para especificación e instalación en sistemas de flujo de fluidos. Las válvulas se utilizan para controlar la cantidad de flujo y pueden ser válvulas de globo, de ángulo, de mariposa, otros tipos de válvulas de verificación y muchas más.

El coeficiente de resistencia K se reporta en la forma:

$$K = (Le/D) \times f \quad (1.11)$$

2. Proporción de longitud equivalente

El valor de (Le/D) , llamado proporción de longitud equivalente, se reporta en la tabla 1.1 y se considera que es una constante para un tipo dado de válvula o junta. El valor de Le se denomina longitud equivalente y es la longitud del conducto recto del mismo diámetro nominal de la válvula, como si la válvula tendría la misma resistencia que el conducto.

Si se reemplaza la ecuación (1.11) en la ecuación (1.10) se tiene:

$$h_L = f \frac{Le}{D} \times \frac{v^2}{2g} \quad (1.12)$$



La ecuación (1.12), muestra que h_L es directamente proporcional a (Le/D) , y por lo tanto, depende de la complejidad de la trayectoria del fluido a través del dispositivo.

Cuadro 1.1. Resistencia en válvulas y juntas expresada como longitud equivalente ⁽⁸⁾

Tipo	Longitud equivalente en diámetros de conducto
Válvula de globo – completamente abierta	340
Válvula de compuerta – completamente abierta	8
– ¾ abierta	35
– ½ abierta	160
– ¼ abierta	900
Válvula de verificación – tipo giratorio	100
Válvula de verificación – tipo bola	150
Válvula de mariposa – completamente abierta	45
Codo estándar de 90°	30
Codo de radio largo de 90°	20
Codo de calle de 90°	16
Codo estándar de 45°	26
Codo de devolución cerrada	50
Té estándar – con flujo a través de un tramo	20
Té estándar – con flujo a través de una rama	60

1.4.3. PÉRDIDA DE ENERGÍA EN LECHOS POROSOS

La pérdida de energía por unidad de peso, para un fluido que se mueve en un lecho poroso, depende principalmente de la velocidad del fluido, la profundidad del lecho y el coeficiente de permeabilidad del lecho, tal como se muestra en la ecuación 1.13 y la figura 1.4.

$$h_L = \frac{v}{K_p} L \quad (1.13)$$

Donde:

h_L = Pérdida de energía por unidad de peso para el fluido en el lecho (m)

L = Profundidad del lecho (m)

v = Velocidad del fluido en el lecho (m/s)

K_p = Coeficiente de permeabilidad del lecho (m/s)

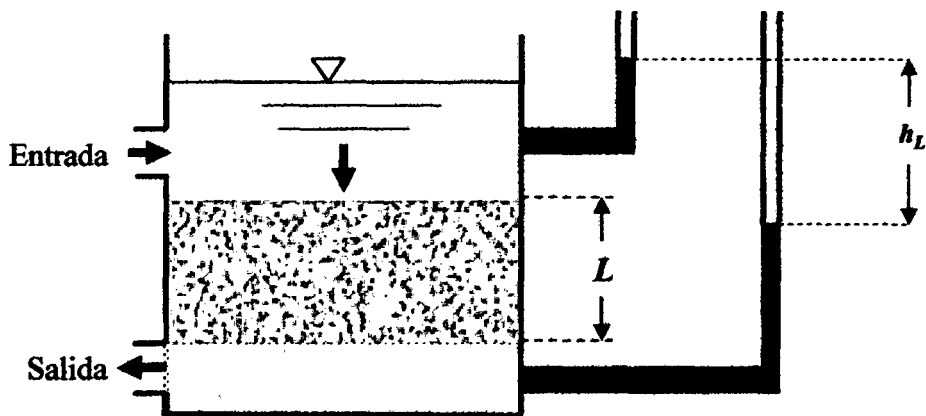


Figura 1.4. Medición de h_L para un fluido que se mueve en un lecho poroso

Fuente: Elaboración propia

1.5. DISEÑOS EXPERIMENTALES

1.5.1. CONCEPTO

Características de los diseños experimentales: Validez interna, externa, de constructo y estadística. Diseños experimentales con grupos de sujetos distintos. Diseños experimentales con los mismos sujetos. Diseños factoriales.

1.5.2. CARACTERÍSTICAS DE LA METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Definición: Un experimento es un estudio en el que al menos una variable es manipulada y las unidades son aleatoriamente asignadas a los distintos niveles o categorías de las variables manipuladas.

Características del diseño experimental:

1. Manipulación: es la intervención deliberada del investigador para provocar cambios en la v. dependiente.
2. Aleatorización: mayor tamaño de los efectos frente a la equiparación.

Todos los diseños experimentales se caracterizan por la manipulación, pero pueden ser clasificados atendiendo a la aleatorización en:

- Auténticamente experimentales.
- Cuasiexperimentales.

La aleatorización mide y reduce el error.

1.5.3. VENTAJAS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

1. Se elimina el efecto de las variables perturbadoras o extrañas, mediante el efecto de la aleatorización.
2. El control y manipulación de las variables predictorias clarifican la dirección y naturaleza de la causa.
3. Flexibilidad, eficiencia, simetría y manipulación estadística.

1.5.4. VIABILIDAD DE LOS DISEÑOS EXPERIMENTALES

1. Imposibilidad de manipular algunas variables.
2. Cuestiones éticas.
3. Practicabilidad.

1.5.5. INCONVENIENTES DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

1. Dificultad de elegibilidad y manejo de las variables de control.
2. Dificultad de disponer de muestras representativas.
3. Falta de realismo.

1.5.6. CALIDAD DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

1. Validez Interna.
2. Validez Externa.
3. Validez Ecológica.
4. Validez de Constructo.

1.5.6.1. VALIDEZ INTERNA

Es el grado en que los cambios observados se pueden atribuir a la manipulación experimental. Estudia hasta que punto una causa puede ser atribuida a un efecto.

Teniendo en cuenta la validez interna de mayor a menor grado los diseños los podemos clasificar en los siguientes grupos:

1. Experimentales auténticos: Verdaderos, puros, pues no tienen problemas de validez interna.

2. Cuasiexperimentales: No se pueden descartar la presencia de variables confundidoras, pues no es posible eliminarlas todas. El investigador sabe que A es causa de B, pero no está seguro que A también pueda ser causa de otros factores como C ó D.

3. No experimentales: Están cerca de los anteriores en cuanto a validez interna, aunque presentan más variables confundidoras, pueden ser:

3.1 Longitudinales: (Prospectivo / Retrospectivo)

3.2 Transversales.

Cuántas más variables entran en un diseño van restando validez interna.

Las variables confundidoras afectan al diseño, forman parte de las AMENAZAS a la validez interna.

1.5.6.2. VALIDEZ EXTERNA

Es el grado en que los resultados de un estudio pueden ser generalizados a muestras o condiciones espacio-temporales diferentes. Ej. “A” causa “B”, pero seguiría causando “B” con otros:

- Sujetos.
- Contexto ---- validez ecológica.
- Momentos.

Los estudios descriptivos (encuestas) son los que más se preocupan por la validez externa. La validez externa está afectada por los siguientes aspectos:

· Por la variable independiente. Es el nivel de operacionalización del v. Independiente.

· “Efecto Rosenthal”: es el efecto derivado de las expectativas, es decir, el efecto derivado de que se presupone o se espera que ocurra, cuando algo se espera un efecto favorece que se produzca. Afecta tanto a la variable interna como a la v. Externa.

· “Efecto Hawthorne”: son las expectativas que el sujeto tiene sobre si mismo, es el efecto de la autoexpectativa.

1.5.6.3. VALIDEZ ECOLÓGICA

Es aquella que se puede aplicar en distintos contextos. Ej. Los hospitales de EE.UU. no son iguales que los hospitales de España, por lo tanto lo que allí es válido puede no serlo aquí.

1.5.6.4. VALIDEZ DE CONSTRUCTO

Alude a la relación existente entre la v. Independiente que se manipula y el constructo teórico que se supone se manipula.

Representa principalmente dos amenazas:

1. Problemas en la definición operacional del constructo.
2. Poco desarrollo teórico del constructo.

1.5.7. TIPOS DE DISEÑOS EXPERIMENTALES

En todos hay manipulación, luego la clasificación se llevará a cabo en relación al grado de aleatorización. Se pueden distinguir dos grandes grupos:

1. Experimentales AUTENTICOS. Hay manipulación y aleatorización. Hay dos tipos básicos: * Con realización de medición “pre-test” y * Sin realización de medición “pre-test”.

2. CUASIEXPERIMENTALES O PRE-EXPERIMENTALES. Hay manipulación pero no hay aleatorización.

1.5.7.1. DISEÑO EXPERIMENTAL AUTENTICO

Presenta dos características importantes:

- Manipulación: es la intervención deliberada del investigador para provocar cambios en la v. dependiente.
- Aleatorización: mayor tamaño de los efectos frente a la equiparación.

Es aquel en el cuanto más aleatorización haya mejor.

1.5.7.1.1. CLASIFICACIÓN DE LOS DISEÑOS

En función de la variable independiente:

- Diseños simples.
- Diseños factoriales.

En función de la aplicación:

- Diseños experimentales con grupos de sujetos distintos.
- Diseños experimentales con los mismos sujetos.

En función de las variables dependientes:

- Diseños de medidas repetidas.

1.5.7.1.1.1. DISEÑOS COMPLEJOS O DISEÑOS FACTORIALES

Es un tipo de diseño experimental en el que hay más de una variable independiente. Cada variable recibe el nombre de factor. Su principal acción es que sirven para valorar el efecto de la interacción, es decir, saber el efecto combinado de las distintas variables. Cada variable recibe el nombre de factor y el número indica los niveles de cada variable.

Ejemplo: 2X2 (dos variables independientes con dos niveles cada una)

2X2X3 (tres variables independientes, dos de ellas con dos niveles y una con tres)

Ejemplo de un diseño complejo o factorial:

Hipótesis: Las personas que son distraídas, frente a las que no lo son, aguantan más el dolor

1.5.7.1.1.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS DISEÑOS COMPLEJOS O FACTORIALES

Un diseño complejo es mejor que dos diseños simples, ya que es el único que permite observar el comportamiento de una variable bajo todas las condiciones. PERMITE VALORAR EL EFECTO DE INTERACCIÓN (el efecto combinado de ambas variables), es decir, permite saber el efecto principal de A, el de B y el efecto combinado de ambos).

1.5.7.1.1.3. EXPERIMENTOS O ENSAYOS SECUENCIALES

Características:

Es un estudio en que los sujetos se asignan a los grupos poco a poco hasta tener todos los efectos que esperamos.

En el mundo de la química no hay más remedio que tener un grupo control y otro experimental. Esto puede plantear problemas éticos.

En estos estudios de antemano no asignamos los sujetos a los grupos, cuando el tratamiento es efectivo, se para el estudio para poder aplicar dicho tratamiento al resto de pacientes, no hace falta acabar el estudio. Así mismo si vemos que el tratamiento no es efectivo y está perjudicando al grupo experimental, se para no perjudicar más al grupo.

Por lo tanto podemos afirmar que los estudios están condicionado a los resultados que se van obteniendo.

Son un tipo de diseño particular porque lo que se estudia son fármacos. De antemano los sujetos no se asignan. Se hace poco a poco hasta que aparecen resultados. Se para el tratamiento cuando aparecen efectos adversos o el tratamiento resulta eficaz.

En estos experimentos, estudios o ensayos la continuidad no está asegurada, sino que depende y está condicionada por los resultados que van apareciendo. ⁽¹⁶⁾

1.6. PROCESO DE INTERCAMBIO IÓNICO

El intercambio iónico es una reacción química reversible, que tiene lugar cuando un ión de una disolución se intercambia por otro ión de igual signo que se encuentra unido a una partícula sólida inmóvil. Este proceso tiene lugar constantemente en la naturaleza, tanto en la materia inorgánica como en las células vivas.

Las resinas de intercambio iónico poseen un radical fijo y un ión móvil o ión de sustitución. El ión móvil es el ión que es intercambiado por iones que desean eliminarse de la solución y este intercambio sólo funciona entre iones de igual carga eléctrica: cationes por cationes y aniones por aniones.

En general las resinas de intercambio iónico operan en columnas, para favorecer el proceso de intercambio, parecido a la destilación o la destilación en bandejas. La reacción de intercambio se desplaza en el lecho de resina, generalmente hacia los niveles inferiores. Al producirse el intercambio iónico, la capacidad de la resina comienza a decrecer, debido a que posee una capacidad limitada para la remoción de iones de las soluciones y debido a esto en un momento dado habrá cedido la mayoría de sus iones de sustitución y se producirá un cierto pase de iones no deseados en el agua producida, cuando sucede esto se dice que esta resina está agotada o saturada de los iones que ha atrapado. Por este motivo, cuando se diseña una columna de intercambio iónico, se establece primero la concentración máxima admisible de iones indeseables en la salida del proceso. Cuando se llega a la concentración pre establecida, se debe proceder a regenerar la resina, para poderla utilizar en un nuevo ciclo.

1.7. RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO

Se considera una resina de intercambio iónico como una sustancia insoluble en agua, que puede intercambiar algunos de sus iones por iones cargados de forma semejante, contenidos en un medio con el que está en contacto.

La designación como una sustancia mejor que un compuesto puede incluir muchos intercambiadores algunos de ellos productos naturales que no tienen una composición bien definida. Además, la definición admite la posibilidad de que la resina pueda ser sólida o líquida. El término medio indica que el intercambio iónico puede tener lugar en disolución acuosa u orgánica, en sales fundidas o incluso en contacto con vapores. Generalmente se opera con un intercambiador sólido y una disolución acuosa.

Los suministros de agua natural contienen sales disueltas, las cuales se disocian en el agua para formar partículas con carga, conocidas como iones. Estos iones están presentes por lo general en concentraciones relativamente bajas, y permiten que el agua conduzca electricidad. Algunas veces se conocen como electrolitos. Estas impurezas iónicas pueden causar problemas en los sistemas de enfriamiento y calefacción, generación

de vapor y manufactura. Los iones comunes que se encuentran en la mayoría de las aguas incluyen los cationes de carga positiva; cationes que generan dureza en el agua (calcio y magnesio). Los aniones de carga negativa incluyen alcalinidad, sulfato, cloruro y silicio.

Las resinas de intercambio iónico son particularmente adecuadas para la eliminación de estas impurezas por varias razones: las resinas poseen una alta capacidad para los iones que se encuentran en bajas concentraciones, las resinas son estables y se regeneran fácilmente, los efectos de la temperatura son en su mayoría insignificantes, y el proceso es excelente tanto para grandes como pequeñas instalaciones, por ejemplo, desde suavizadores de agua para el hogar hasta grandes instalaciones de servicios. La mayor parte de los materiales de esferas de intercambio iónico se fabrican usando un proceso de polimerización de suspensión, que utiliza estireno y divinilbenzeno (DVB). El estireno y DVB, ambos líquidos en un principio, se colocan en un reactor químico con más o menos la misma cantidad de agua. Asimismo está presente un agente flotador para mantener todo disperso.

El reactor químico tiene un agitador que comienza a mezclar la solución compuesta por agua y la sustancia orgánica (estireno-DVB). El estireno-DVB comienza a formar grandes glóbulos de material, y al aumentarse la velocidad de agitación, los glóbulos se dividen en gotitas más pequeñas hasta alcanzar un tamaño más o menos de un milímetro.

En ese momento inicia la reacción de polimerización a través de la adición de peróxido de benzoilo, el cual hace que las moléculas de estireno-DVB formen esferas pequeñas de plástico. El divinilbenzeno es un agente entrecruzante que le proporciona a las esferas su fortaleza física, y sin el cual el estireno sería soluble en el agua.

La esfera de poliestireno-DVB necesita ser químicamente activada para funcionar como material de intercambio iónico. Los grupos activados son ligados para proporcionarle funcionalidad química a la esfera. Cada grupo activo posee una carga eléctrica fija, la cual es balanceada por un número equivalente de iones de carga opuesta y tienen la libertad de intercambiarse con otros iones de la misma carga. Las resinas catiónicas fuertes se forman

tratando a las esferas con ácido sulfúrico concentrado (un proceso conocido como sulfonación) para formar grupos sulfónicoácidos permanentes, de carga negativa, a través de las esferas. Aquí es importante el hecho de que los sitios de intercambio formados de tal manera se encuentren ubicados a través de la esfera. El proceso de intercambio iónico no es un fenómeno de superficie; más del 99% de la capacidad de un material de intercambio iónico se encuentra en el interior de la esfera.

Las resinas aniónicas fuertes se activan en un proceso de dos pasos que consiste en la clorometilación seguida de la aminación. Este proceso de dos pasos comienza con el mismo material de estireno-DVB que se usa para las resinas catiónicas. La única diferencia es que la cantidad de DVB que se utiliza es menor para permitir una esfera más porosa. El primer paso de la reacción es la ligación de un grupo de clorometilo a cada uno de los anillos de benceno en la estructura de la esfera. Este material plástico intermedio clorometilizado debe reaccionar con una amina en un proceso conocido como aminación. El tipo de amina utilizada determina la funcionalidad de la resina. Una amina comúnmente utilizada es la trimetilamina (TMA), que crea un intercambiador aniónico fuertemente básico de tipo 1. El uso de dimetiletanolamina (DMEA) producirá una resina aniónica de tipo 2.

Los requisitos básicos de los materiales de las esferas de intercambio iónico son la insolubilidad, el tamaño de la esfera, y su resistencia a las fracturas. La resina deberá ser insoluble bajo condiciones normales de funcionamiento.

Las esferas deberán tener dimensiones uniformes con un tamaño normal que varía entre 16 y 50 "US Mesh" (tamaño estadounidense de malla). El hinchamiento y contracción de la esfera de resina durante el agotamiento y la regeneración no deberán causar que revienten las esferas. Asimismo, una propiedad importante de las resinas de intercambio iónico es que el sitio activo se encuentra permanentemente ligado a la esfera.

Las resinas de intercambio iónico pueden ser fabricadas en una de dos estructuras físicas, gelatinosa o macroporosa. Las resinas gelatinosas son polímeros homogéneos entrecruzados y son las resinas más comúnmente disponibles. Éstas tienen sitios de

intercambio distribuidos de manera pareja a través de la esfera. La cantidad de entrecruzamiento de DVB que se utiliza en la síntesis de una esfera determina su fortaleza relativa. La resina catiónica de ácido fuerte que se usa para la suavización, la cual es el medio más común de intercambio iónico, consiste casi siempre de un material gelatinoso de 8% DVB. Se ha comprobado que la cantidad de DVB que contiene esta resina es la más económica en términos de precio de la resina y duración esperada de funcionamiento.

Actualmente se encuentran disponibles resinas con un contenido de DVB entre 2% y 20% y aún más. Un mayor contenido de DVB le da aun más fortaleza a la resina, pero el entrecruzamiento adicional puede obstruir la cinética, haciendo que la esfera sea demasiado resistente a la contracción e hinchamiento que son necesarios durante el funcionamiento normal.

Las resinas macroporosas fueron introducidas comercialmente en 1959 y están hechas con grandes poros que permiten el acceso a sitios interiores de intercambio. También se conocen como resinas macroreticulares o de poros fijos. Las resinas macroporosas son fabricadas a través de un proceso que deja una red de vías a través de la esfera.

Esta estructura con apariencia esponjosa permite que la porción activa de la esfera contenga un nivel elevado de entrecruzamiento de DVB sin afectar la cinética del intercambio. Desafortunadamente, también significa que la resina tiene una menor capacidad porque las esferas contienen menos sitios de intercambio. Los poros pueden ocupar entre 10% y 30% del polímero. Esto reduce proporcionalmente la capacidad de intercambio iónico.

Las resinas gelatinosas por lo general tienen mayores eficiencias de funcionamiento y son de menor costo. Un macroporo proporciona mejor estabilidad física, principalmente debido a su estructura con apariencia esponjosa, que libera la presión de mejor manera. Asimismo elimina parte del rompimiento que puede ocurrir debido a la presión osmótica. Mientras mayor sea el área en una resina aniónica macroporosa, mejor será su resistencia a la incrustación.

En una resina catiónica, un mayor nivel de entrecruzamiento proporciona mejor resistencia a la oxidación. Existen dos tipos principales de estructuras químicas, estirénicas y acrílicas. Los materiales a base de estireno descritos anteriormente son hidrocarburos aromáticos. Las resinas acrílicas son hidrocarburos de cadena recta basadas en poliacrilato y polimetacrilato. El DVB aún se utiliza como entrecruce en estas resinas, pero los acrílicos difieren de los estirénicos en que el sitio de intercambio activo es parte de la estructura física. Esto significa que sus estabilidades físicas y químicas están entrecruzadas. Cuando una resina acrílica se degrada químicamente, ocurre por lo general en el sitio de intercambio, que es el eslabón más débil. Esto destruye la estructura física. Cuando se oxida una resina acrílica, ésta se hinchará y ablandará. Otra desventaja de los materiales acrílicos es que no están totalmente aprobados por la Asociación de Alimentos y Drogas (FDA*) de USA. Por lo tanto, están por lo general limitados a aplicaciones industriales. Es de provecho usar los acrílicos en aplicaciones donde existen materias orgánicas, porque no causan tanta incrustación como los productos a base de estireno.

El tamaño real de las esferas es superior a 0.2 mm para que no puedan pasar a través de las crepinas del desmineralizador que son generalmente inferior a 1 mm. Véase la figura 1.5.

Las resinas de intercambio iónico pueden ser de los siguientes tipos:

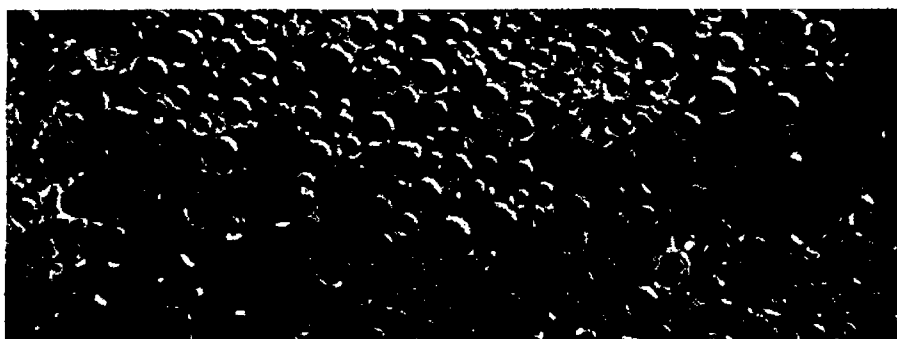


Figura 1.5. Resinas de intercambio iónico en forma de esferas (en la parte de arriba se muestra la catiónica y la parte de abajo la aniónica)

Fuente: Elaboración propia

1.7.1. RESINAS CATIONICAS DE ÁCIDOS DÉBILES

Estas resinas fijan los cationes de calcio, magnesio, sodio y potasio de los bicarbonatos y liberan ácido carbónico; los cationes unidos a los aniones sulfatos, cloruros y nitratos no son intercambiados.

Si se considera a las resinas de intercambio catiónico como $R-2H$, con radical fijo R y H como ión de sustitución, se tiene las siguientes reacciones (de acuerdo a los cationes presentes).



1.7.2. RESINAS CATIONICAS DE ÁCIDOS FUERTES

Estas resinas fijan los cationes que están unidos a los iones cloruros, nitratos, sulfatos y silicatos, quedando en el agua los ácidos de las sales inicialmente presentes en el agua, de acuerdo al siguiente detalle:





1.7.3. RESINAS ANIÓNICAS DE BASES DÉBILES

Estas resinas fijan los aniones de los ácidos fuertes como sulfatos, cloruros y nitratos, pero no los aniones débiles del ácido carbónico H_2CO_3 , ni del ácido silícico H_2SiO_3 .

Si se considera a las resinas de intercambio aniónico como $\mathbf{R} - 2\mathbf{OH}$, compuestas de un radical fijo \mathbf{R} y de un ión móvil constituido por el grupo \mathbf{OH} , se tiene las siguientes reacciones (de acuerdo a los aniones presentes).



1.7.4. RESINAS ANIÓNICAS DE BASES FUERTES

Estas resinas fijan los aniones de los ácidos débiles tales como el ácido carbónico y el ácido silícico. Las reacciones serían:



1.7.5. RESINAS CATIONICAS CICLO SODIO

Se considera a este tipo de resina como (\mathbf{XNa}) y es comúnmente utilizada para el ablandamiento de agua, siendo las reacciones de intercambio:



Al agua obtenida libre de iones calcio y magnesio, se denomina agua blanda. La dureza se expresa siempre en términos de carbonato de calcio (CaCO_3) o (MgCO_3) como partes por millón (ppm) o miligramos por litro (mg/lt). 1 ppm equivale a 1mg/lt.

1.8. REGENERACIÓN DE LAS RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO

La regeneración de las resinas de intercambio iónico es el proceso inverso del proceso de intercambio iónico y tiene por finalidad devolverle a la resina de intercambio iónico su capacidad inicial de intercambio.

Esto se realiza haciendo pasar soluciones que contengan el ión móvil original, el cual se deposita en la resina y desaloja los iones captados durante el agotamiento.

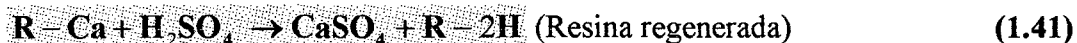
Para la regeneración de las resinas de intercambio iónico se usa:

- Sal común (cloruro de sodio) para regenerar resinas catiónicas de ácidos fuertes.
- Ácido clorhídrico o ácido sulfúrico (depende del costo y de la eficiencia): para regenerar resinas catiónicas de ácidos fuertes y resinas catiónicas de ácidos débiles.
- Hidróxido de sodio o hidróxido de amonio: para regenerar resinas aniónicas de bases fuertes y resinas aniónicas de bases débiles.

Una vez regenerada la resina está lista para un nuevo ciclo de intercambio iónico.

1.8.1. REGENERACIÓN DE RESINAS DE INTERCAMBIO CATIONICO

Cuando cualquiera de las resinas de intercambio catiónico débiles o fuertes ya no tienen iones hidrógeno para intercambiar, a estas resinas se les regenera haciendo pasar una solución de ácido (normalmente ácido sulfúrico), produciéndose las siguientes reacciones:



La regeneración se realiza normalmente en serie y la solución de ácido sulfúrico atraviesa sucesivamente la resina fuertemente ácida y la resina débilmente ácida. El exceso de ácido proveniente de la regeneración de la resina fuertemente ácida es suficiente para regenerar completamente la resina débilmente ácida.

1.8.2. REGENERACIÓN DE RESINAS DE INTERCAMBIO ANIÓNICO

Una vez que las resinas de intercambio aniónico débilmente y fuertemente básicas no tienen más iones OH^- que intercambiar con los aniones del agua, estas deben ser regeneradas. Su capacidad de intercambio les es devuelta haciendo pasar una solución de base fuerte (generalmente se emplea hidróxido de sodio), la cual atraviesa primero el intercambiador de las resinas aniónicas de base fuerte y luego el intercambiador de las resinas aniónicas de base débil. El exceso de soda proveniente de la regeneración de las resinas aniónicas de base fuerte es suficiente para regenerar completamente las resinas aniónicas de base débil. Se producirán las siguientes reacciones:

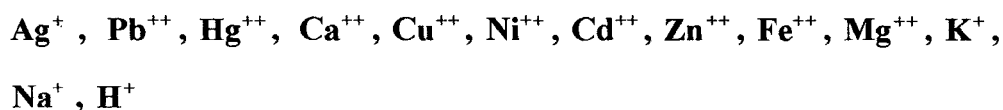




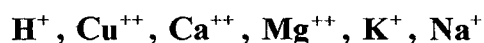
1.9. SELECTIVIDAD DE LAS RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO

Las resinas de intercambio iónico presentan diferentes selectividades hacia los iones. A continuación se detalla el orden de selectividad de las resinas de intercambio iónico, en orden decreciente (de mayor a menor selectividad):

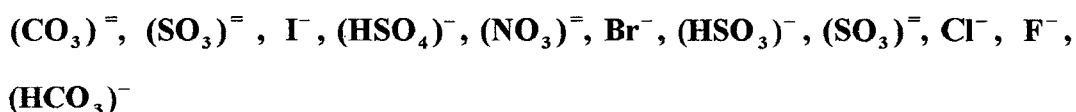
Resinas catiónicas de ácidos fuertes:



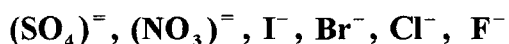
Resinas catiónicas de ácidos débiles:



Resinas aniónicas de bases fuertes:



Resinas aniónicas de bases débiles:



1.10. DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO DEL EQUIPO

El equipo que se diseña y construye en el presente trabajo, servirá principalmente para realizar el estudio del proceso de intercambio iónico. Cuando se trabaja en forma continua, este proceso implica una serie de operaciones, principalmente la de transporte de



fluidos, es por eso que en el diseño del equipo se considera una serie de componentes que se mencionan a continuación:

1.10.1. DESMINERALIZADOR

Como se puede ver en la figura 3.1, el desmineralizador está conformado por dos intercambiadores verticales de forma cilíndrica.

Al primer intercambiador se le denomina, intercambiador catiónico de ácido fuerte (*ICAF*) y al segundo, intercambiador aniónico de base fuerte (*IABF*).

El (*ICAF*) es un intercambiador catiónico y se diseña como parte del desmineralizador, porque contiene la columna de resina que fija los cationes de calcio, magnesio, sodio y potasio que están unidos a los iones cloruros, nitratos, sulfatos y silicatos, liberando también ácido carbónico y quedando en el agua los ácidos de las sales inicialmente presentes en el agua, tal como se muestra desde la ecuación (1.14), hasta la ecuación (1.33). Cabe aclarar que la resina catiónica de ácido débil, no puede fijar los iones que fija la resina catiónica de ácido fuerte, pero esta última si puede fijar los iones que fija la primera. Es decir, el intercambiador catiónico (*ICAF*) es más eficiente cuando se utiliza la resina catiónica de ácido fuerte. Bajo este criterio, es que se eligió la resina catiónica de ácido fuerte, para el primer intercambiador.

El (*IABF*) es un intercambiador aniónico y se diseña como parte del desmineralizador, porque contiene la columna de resina que fija los aniones de los ácidos fuertes como sulfatos, cloruros y nitratos, y a la vez los aniones de los ácidos débiles tales como el ácido carbónico y el ácido silícico, tal como se muestra desde la ecuación (1.34), hasta la (1.38). De igual forma que en el (*ICAF*), el (*IABF*) es más eficiente cuando se utiliza la resina aniónica de base fuerte.

1.10.2. INTERCAMBIADOR ABLANDADOR

Al intercambiador ablandador se le representa como (*ICA*), este intercambiador también tiene forma vertical cilíndrica. Véase la figura 3.2.

Se diseña como parte del equipo porque contiene la resina catiónica ciclo sodio (*XNa*). Esta resina fija los cationes de calcio y magnesio, que están unidos a los aniones carbonatos, reduciendo de este modo la dureza del agua, tal como se muestra en las ecuaciones (1.39) y (1.40).

Se puede ver además en las figuras 3.1 y 3.2, que cada intercambiador tiene una serie de válvulas, las cuales cumplen una función específica en las diferentes operaciones y procesos que se llevan a cabo en el equipo.

1.10.3. LÍNEA PARA ALIMENTACIÓN DE AGUA

Como se puede ver en la figura 3.3, este componente del equipo está constituido por tramos de tubería recta, válvulas esféricas y otros accesorios. Esta línea se diseña como parte del equipo porque tiene dos funciones importantes: **la primera**, es alimentar con agua al desmineralizador por medio del tramo de tubería en el que se indica el punto B_1 , y al (*ICA*) por medio del tramo de tubería en el que se indica el punto B_3 , para los procesos de desmineralizado y ablandamiento, respectivamente; **la segunda**, es alimentar con agua para el retrolavado de cada uno de los intercambiadores, (*ICAF*), (*IABF*) y (*ICA*), por medio de las válvulas V_3 (*ICAF*), V_3 (*IABF*) y V_3 (*ICA*), respectivamente.

1.10.4. LÍNEA PARA ALIMENTACIÓN DE QUÍMICOS

Se puede ver en la figura 3.4, que este componente del equipo está constituido por una electrobomba, tramos de tubería recta, válvulas esféricas y otros accesorios. Esta línea se diseña como parte del equipo, porque tiene la función de alimentar con soluciones químicas para la regeneración de las resinas de los tres intercambiadores, (*ICAF*), (*IABF*)

y (ICA), por medio del tramo de tubería donde se indican los puntos B, C y D, respectivamente.

1.10.5. TANQUE RESERVORIO

Este componente tiene la forma de un paralelepípedo y se muestra en la figura 3.5. Su función principal, es la contener a las soluciones que se utilizarán en el proceso de regeneración de las resinas de cada intercambiador. Para hacer más resistente a su estructura es que está reforzado con angulares de aluminio.

1.11. APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN GENERAL DE BALANCE DE MATERIA AL EQUIPO MODULAR

Esta ecuación se aplica al proceso de desmineralizado y ablandamiento, pero específicamente a elementos químicos como Mg^{++} , Ca^{++} y Cl^{-} . Para esto es necesario que se vean las figuras 1.6 y 1.7.

Al aplicar la ecuación de balance de materia, los términos de acumulación y consumo pasan a ser parte de un nuevo término, que en el presente trabajo se denomina masa de iones retenida en la resina.

Proceso de desmineralizado

La retención de magnesio en la resina catiónica, será igual a la masa de magnesio en la entrada del desmineralizador, menos la masa de magnesio a la salida del desmineralizador. Si se considera un tiempo de operación t , los términos de entrada, salida y retención serían:

$$\text{Masa de magnesio a la entrada del desmineralizador} = Ca_{ED} [Mg^{++}]_{ED} t$$

$$\text{Masa de magnesio a la salida del desmineralizador} = Ca_{SD} [Mg^{++}]_{SD} t$$

$$\text{Masa de magnesio retenida en la resina catiónica de ácido fuerte} = r_{Mg^{++}(ICAF)} t$$

Donde:

ED: Línea de entrada al desmineralizador

SD: Línea de salida del desmineralizador

Ca_{ED} : Caudal en *ED* (lt/min)

Ca_{SD} : Caudal en *SD* (lt/min)

$[Mg^{++}]_{ED}$: Concentración de magnesio en *ED* (mg /lt)

$[Mg^{++}]_{SD}$: Concentración de magnesio en *SD* (mg /lt)

$C.I._{Mg^{++}(ICAF)}$: Capacidad de Intercambio la masa de magnesio en el (*ICAF*)
(mg /min)

Entonces la ecuación de balance para este componente es:

$$C.I._{Mg^{++}(ICAF)} \times t = Ca_{ED} [Mg^{++}]_{ED} t - Ca_{SD} [Mg^{++}]_{SD} t \quad (1.50)$$

Como el flujo en el desmineralizador es continuo y el caudal no se distribuye, entonces $Ca_{ED} = Ca_{SD}$. El tiempo *t* se puede eliminar por ser un término común en ambos miembros de la ecuación (1.50). Entonces esta ecuación queda:

$$C.I._{Mg^{++}(ICAF)} = Ca_{SD} \left([Mg^{++}]_{ED} - [Mg^{++}]_{SD} \right) \quad (1.51)$$

En el presente trabajo se considera que el agua cruda a tratar en el desmineralizador, contiene en mayor cantidad a los iones calcio, magnesio y cloro, en comparación con los iones de sodio, potasio, hierro, níquel, flúor y otros.

Procediendo de la misma forma para el calcio:

$$C.I._{Ca^{++}(ICAF)} = Ca_{SD} \left([Ca^{++}]_{ED} - [Ca^{++}]_{SD} \right) \quad (1.52)$$

Donde:

$[Ca^{++}]_{ED}$: Concentración de calcio en *ED* (mg /lt)

$[Ca^{++}]_{SD}$: Concentración de calcio en *SD* (mg /lt)

$C.I._{Ca^{++}(ICAF)}$: Capacidad de Intercambio la masa de calcio en el (*ICAF*) (mg /min)

El cloro es retenido en el (*IABF*). Si se procede de la misma forma que en el calcio y magnesio se tiene:

$$C.I._{Cl^{-}(ICAF)} = Ca_{SD} \left([Cl^{-}]_{ED} - [Cl^{-}]_{SD} \right) \quad (1.53)$$

Donde:

$[Cl^{-}]_{ED}$: Concentración de cloro en *ED* (mg /lt)

$[Cl^{-}]_{SD}$: Concentración de cloro en *SD* (mg /lt)

$C.I._{Cl^{-}(ICAF)}$: Capacidad de Intercambio la masa de cloro en el (*IABF*) (mg /min)

Los iones calcio, magnesio y cloro, se encuentran en el agua cruda en forma de $CaCO_3$, $MgCO_3$, $CaSO_4$, $MgSO_4$, $CaCl_2$, $MgCl_2$

Entonces, la velocidad de retención con respecto a la masa total en el (*ICAF*), se puede evaluar de la siguiente forma:

$$C.I._{(ICAF)} = C.I._{CaCO_3(ICAF)} + C.I._{MgCO_3(ICAF)} + C.I._{MgSO_4(ICAF)} + C.I._{CaSO_4(ICAF)} \quad (1.54)$$

El término $r_{CaCO_3(ICAF)}$, se denomina velocidad de consumo, de la masa de $CaCO_3$ en (ICAF)

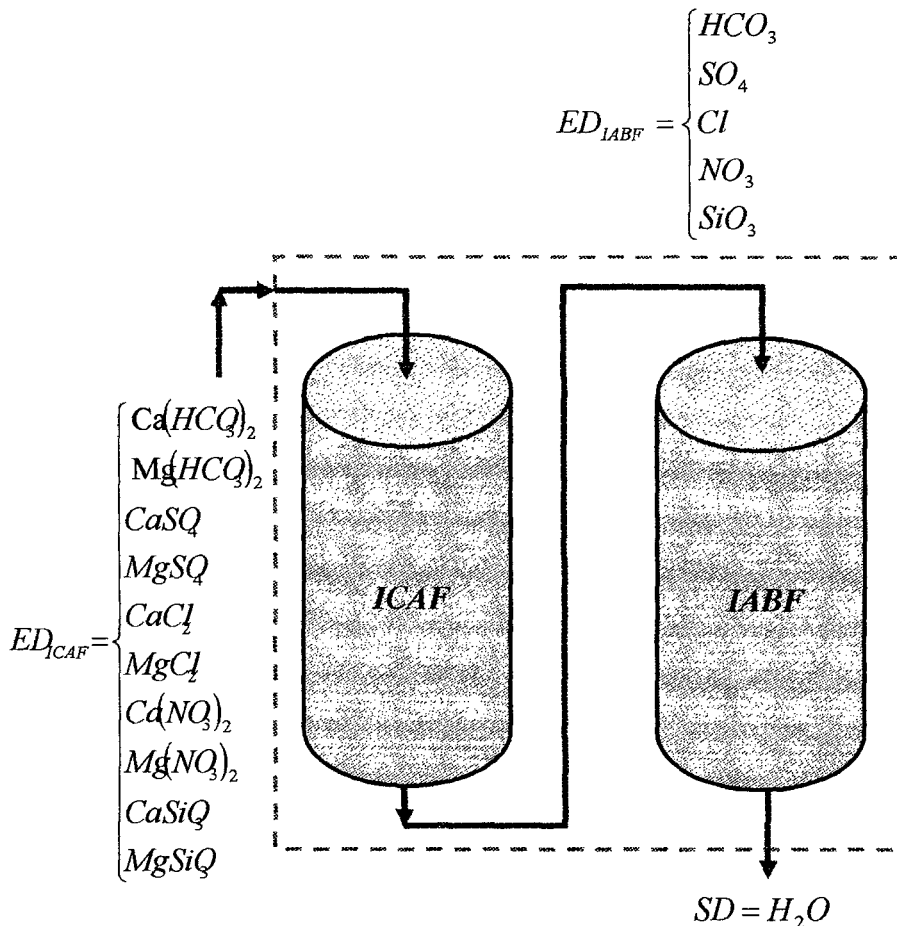


Figura 1.6. Esquema para el balance de materia en el proceso de desmineralizado

Fuente: Elaboración propia

Proceso de ablandamiento

El proceso de ablandamiento, se realiza exclusivamente para reducir la dureza del agua, como bien se sabe esta dureza está presente en el agua en forma de $CaCO_3$ y $MgCO_3$. Para aplicar la ecuación de balance de materia en este proceso, se tiene en cuenta la figura 1.7 y se procede de la misma forma que en el desmineralizador.

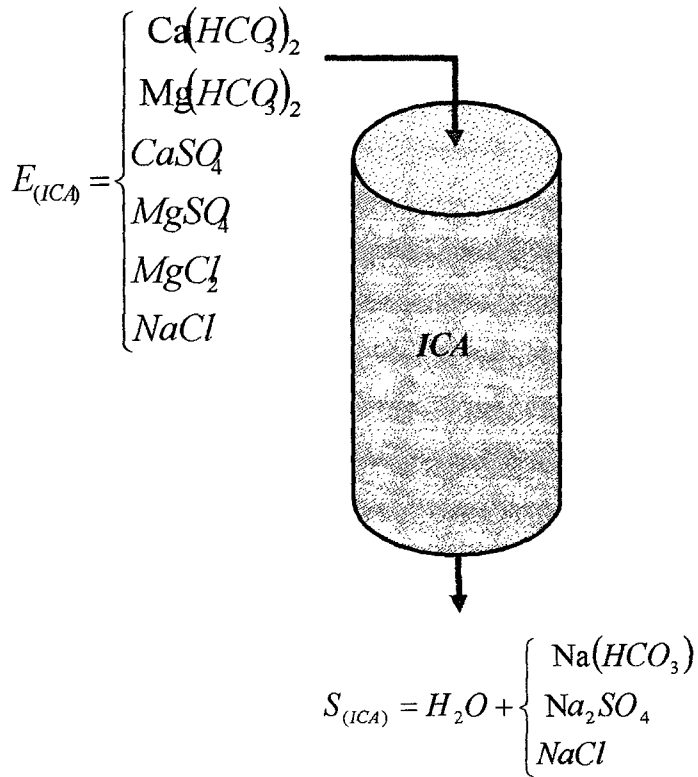


Figura 1.7. Esquema para el balance de materia en el proceso de ablandamiento

Fuente: Elaboración propia

$$C I_{\text{Ca}^{++}(ICA)} = C a_{S(ICA)} \left([\text{Ca}^{++}]_{E(ICA)} - [\text{Ca}^{++}]_{S(ICA)} \right) \quad (1.55)$$

$$C I_{\text{Mg}^{++}(ICA)} = C a_{S(ICA)} \left([\text{Mg}^{++}]_{E(ICA)} - [\text{Mg}^{++}]_{S(ICA)} \right) \quad (1.56)$$

Donde:

$E_{(ICA)}$: Línea de entrada al intercambiador ablandador

$S_{(ICA)}$: Línea de salida del intercambiador ablandador

$C a_{S(ICA)}$: Caudal en el intercambiador ablandador (lt/min)



$[Ca^{++}]_{E(ICA)}$: Concentración de calcio en $E(ICA)$ (mg /lt)

$[Ca^{++}]_{S(ICA)}$: Concentración de calcio en $S(ICA)$ (mg /lt)

$C.I._{Ca^{++}(ICA)}$: Capacidad de Intercambio la masa de calcio en el (ICA)
(mg /min)

$[Mg^{++}]_{E(ICA)}$: Concentración de magnesio en $E(ICA)$ (mg /lt)

$[Mg^{++}]_{S(ICA)}$: Concentración de magnesio en $S(ICA)$ (mg /lt)

$C.I._{Mg^{++}(ICA)}$: Capacidad de Intercambio la masa de magnesio en el (ICA)
(mg /min)

Las ecuaciones (1.55) y (1.56), también se pueden representar en función de las concentraciones de $CaCO_3$ y $MgCO_3$ tal como se muestra a continuación:

$$C.I._{CaCO_3(ICA)} = Ca_{S(ICA)} \left([CaCO_3]_{E(ICA)} - [CaCO_3]_{S(ICA)} \right) \quad (1.57)$$

$$C.I._{MgCO_3(ICA)} = Ca_{S(ICA)} \left([MgCO_3]_{E(ICA)} - [MgCO_3]_{S(ICA)} \right) \quad (1.58)$$

1.12. VARIABLES MÁS IMPORTANTES PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

1.12.1. VOLUMEN INTERNO DE CADA INTERCAMBIADO

Para calcular el volumen de cada intercambiador, se opera de la siguiente manera y se aplica la siguiente ecuación:

$$V_{I.I} = A \times l \quad (1.59)$$

Donde:

$V_{I.I.}$: Volumen del intercambiador Iónico. (m^3)

A : Área del tubo PVC que se empleo. (m^2)

l : Longitud del tubo PVC que se empleó. (m)

1.12.2. VOLUMEN DE LA RESINA DE CADA INTERCAMBIADOR

A esta variable se le denota como V_R . Se considera que el volumen de la resina debe ser el 60% de $V_{I.I.}$, es decir:

$$V_{I.I.} = 0.6V_R \Rightarrow V_R = \frac{V_{I.I.}}{0.6} \quad (1.60)$$

1.12.3. ALTURA DE LA RESINA EN CADA INTERCAMBIADOR

Como los intercambiadores tienen forma cilíndrica, el diámetro la altura y el volumen estarán relacionados mediante la siguiente fórmula:

$$V_R = \frac{\pi}{4} D_i^2 H_R \quad (1.61)$$

Donde:

V_R : Volumen interior de la resina en cada intercambiador (m^3)

D_i : Diámetro interior de cada intercambiador (m)

H_R : Altura interior de la resina en cada intercambiador (m)

1.12.4. RANGO DE CAUDAL QUE PRODUCE LA ELECTROBOMBA

Esta variable es de suma importancia, porque debe adecuarse al caudal que se requiere para el proceso de regeneración de la resina en cada intercambiador. En la figura

A1 se puede ver la curva de operación de la electrobomba, en ella se muestra la representación gráfica del caudal versus la altura dinámica.

1.13. VARIABLES MÁS IMPORTANTES EN LAS OPERACIONES Y PROCESOS A LLEVARSE A CABO EN EL EQUIPO MODULAR

Los procesos más importantes que se llevan a cabo en el equipo modular son el desmineralizado y el ablandamiento.

1.13.1. VARIABLES MÁS IMPORTANTES EN EL DESMINERALIZADO

Estas variables se pueden ver en la sección 1.10, desde la ecuación (1.51), hasta la ecuación (1.54)

1.13.2. VARIABLES MÁS IMPORTANTES EN EL ABLANDAMIENTO

Estas variables se pueden ver en la sección 1.10, desde la ecuación (1.55), hasta la ecuación (1.58)

1.13.3. EFICIENCIA PROMEDIO EN EL DESMINERALIZADO

La eficiencia promedio en el proceso de desmineralizado se denota como $E_{f(D)}$ y se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$E_{f(D)} = \frac{1}{3} \left[\frac{([Mg^{++}]_{ED} - [Mg^{++}]_{SD}) + ([Ca^{++}]_{ED} - [Ca^{++}]_{SD})}{[Mg^{++}]_{ED} + [Ca^{++}]_{ED}} + \frac{([Cl^-]_{ED} - [Cl^-]_{SD})}{[Cl^-]_{ED}} \right] \times 100 \quad (1.62)$$

1.13.4. EFICIENCIA PROMEDIO EN EL ABLANDAMIENTO

La eficiencia promedio en el proceso de ablandamiento se denota como $E_{f(ICA)}$ y se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$E_{f(ICA)} = \frac{1}{2} \left[\frac{([Mg^{++}]_{E(ICA)} - [Mg^{++}]_{S(ICA)})}{[Mg^{++}]_{E(ICA)}} + \frac{([Ca^{++}]_{E(ICA)} - [Ca^{++}]_{S(ICA)})}{[Ca^{++}]_{E(ICA)}} \right] \times 100 \quad (1.63)$$

Se debe tener en cuenta que las concentraciones de calcio y magnesio se pueden expresar en función de la concentración del carbonato de calcio, es decir:

$$[Mg^{++}] = \frac{24}{115} [MgCO_3] \quad (1.64)$$

$$[Ca^{++}] = \frac{40}{100} [CaCO_3] = \frac{2}{5} [CaCO_3] \quad (1.65)$$

CAPÍTULO II: CÁLCULOS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

2.1. CÁLCULOS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

2.1.1. CÁLCULO DEL VOLUMEN INTERNO DE CADA INTERCAMBIADOR

Para el cálculo del volumen de los intercambiadores se determina haciendo uso de la ecuación (1.59), para la cual tomamos características tanto del área y longitud del tubo de PBC que son los siguientes:

$$D = 0,156 \text{ m}$$

$$l = 0,54 \text{ m}$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$A = \frac{\pi \times (0,156 \text{ m})^2}{4}$$

$$A = 0,01911 \text{ m}^2$$

$$V_{I.I.} = A \times l$$

$$V_{I.I.} = 0,01911 \text{ m}^2 \times 0,54 \text{ m}$$

$$V_{I.I.} = 0,010319 \text{ m}^3$$

$$V_{I.I.} = 10,319 \text{ L}$$

2.1.2. CÁLCULO DEL VOLUMEN DE LA RESINA DE CADA INTERCAMBIADOR

Aplicando la ecuación (1.60), se tiene:

$$V_{I.I.} = 0,6 \times V_R$$

$$V_{\bar{R}} = 10,319 \times 0,6 = 6 \text{ L}$$

2.1.3. CÁLCULO DE LA ALTURA DE CADA INTERCAMBIADOR

En este caso se eligió que el diámetro nominal de cada intercambiador debe ser 6 pulgadas. Comercialmente, se puede encontrar tuberías PVC SAP de este diámetro. Midiendo el diámetro interior correspondiente a las 6 pulgadas de diámetro nominal, se tiene que $D_i = 0.154 \text{ m}$

Despejando H_i de la ecuación (1.61), se tiene:

$$H_i = \frac{4V_i}{\pi D_i^2} = \frac{4 \times 0.010319 \text{ m}^3}{\pi \times (0.154 \text{ m})^2} = 0.554 \text{ m} \approx 0.55 \text{ m}$$

La altura interior de cada intercambiador debe ser 0.54m

Para el acondicionamiento de cada intercambiador, se recomienda que las alturas de gravilla y de la cámara de expansión deben ser el 10% y 30% de la altura del intercambiador, respectivamente. Para esto véase la figura 2.1.

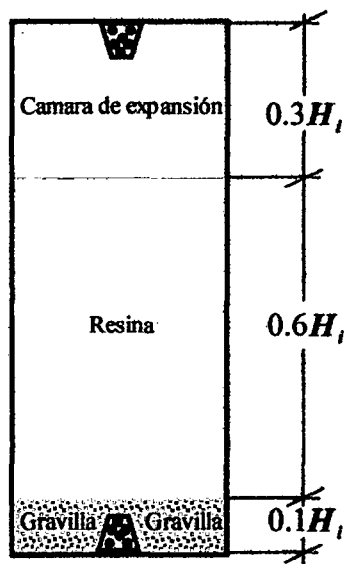


Figura 2.1. Esquema para el acondicionamiento de un intercambiador

Fuente: Elaboración propia

2.2. CALCULO DE OPERACIÓN

2.2.1. CALCULO DEL INTERCAMBIADOR IÓNICO – CATIONICO (ICAF)

Datos de Proceso:

$$Q = 1 - 5 \text{ g/min} \times \text{ft}^3$$

$$C.l. = 1,8 \text{ eq/L}_{\text{res}} \times \text{min}$$

$$V = 6 \text{ L}_{\text{res}}$$

$$C = 22.11 \text{ ppm}$$

Datos de Lavado:

$$Q = 6,35 - 8,375 \text{ g/min} \times \text{ft}^2$$

$$L = 0,6 \text{ m}$$

$$V = 6 \text{ L}_{\text{res}}$$

$$t = 5 - 20 \text{ min}$$

$$Q_1 = 9 \text{ L/min}$$

$$D = \frac{1}{2} \text{ plg}$$

Datos de Regeneración:

$$Q = 0,2 - 0,8 \text{ g/min} \times \text{ft}^3$$

$$t = 30 \text{ min}$$

$$\% = 0,5 - 5 \text{ de } H_2SO_4$$

$$\rho = 1,84 \text{ gr/ml}$$

$$\% = 98 \text{ de } H_2SO_4$$

2.2.1.1. CALCULOS DEL PROCESO

2.2.1.1.1. CALCULO DEL CAUDAL

$$\text{Promedio} = \frac{1 + 5}{2}$$

$$\text{Promedio} = 3 \text{ g/min} \times \text{ft}^3$$

$$Q = 3 \frac{g}{min \times ft^3} \times \frac{3,785 L}{1g} \times \frac{1 ft^3}{28,316 L} \times 6 L$$

$$Q = 2,40606 \frac{L_{H_2O}}{min} \times \frac{1 m^3}{1000 L}$$

$$Q = 2,40606 \times 10^{-3} \frac{m^3}{min}$$

2.2.1.1.2. CALCULO DE LA VELOCIDAD DEL FUJO

$$D = \frac{1}{2} plg \times \frac{0,0254 m}{1 plg}$$

$$D = 0,0127 m$$

$$A = \frac{\pi \times D^2}{4}$$

$$A = \frac{\pi \times (0,0127)^2}{4}$$

$$A = 1,26677 \times 10^{-4} m^2$$

$$Q = V \times A$$

$$v = \frac{Q}{A}$$

$$v = \frac{2,40606 \times 10^{-3} m^3/min}{1,26677 \times 10^{-4} m^2}$$

$$v = 0,31656 m/seg$$

2.2.1.1.3. CALCULO DE LA CAPACIDAD DE INTERCAMBIO IÓNICO (C.I.)

$$C.I. = 1,8 \frac{eq}{L_{resi} \times min} \times 6 L_{resi}$$

$$C.I. = 10,8 eq$$

2.2.1.1.4. CALCULO DE LA CONCENTRACIÓN DEL AGUA DE LA RED (eq)

$$C_{H_2O} = 22,11 ppm$$

$$C_{H_2O} = 22,11 \frac{mgr}{L} \times \frac{1 gr}{1000 mgr}$$

$$C_{H_2O} = 22,11 \times 10^{-3} gr/L$$

$$eq = \frac{C}{M/\theta}$$

$$eq = \frac{22,11 \times 10^{-3}}{100/2}$$

$$eq = 4,422 \times 10^{-3} \text{ eq/L}$$

2.2.1.1.5. CALCULO DE LA CANTIDAD DE AGUA A TRATAR

$$V = \frac{C.I.}{eq_{\text{agua}}}$$

$$V = \frac{10,8 \text{ eq}}{4,422 \times 10^{-3} \text{ eq/L}}$$

$$V = 24423,338 \text{ L}_{H_2O}$$

2.2.1.1.6. CALCULO DEL TIEMPO DE SATURACIÓN

$$Q = \frac{V}{t}$$

$$t = \frac{V}{Q}$$

$$t = \frac{24423,338 \text{ L}_{H_2O}}{2,40606 \text{ L}_{H_2O}/\text{min}}$$

$$t = 10150,777 \text{ min}$$

2.2.1.2. CALCULOS DEL LAVADO

2.2.1.2.1. CALCULO DEL CAUDAL

$$\text{Promedio} = \frac{6,35 + 8,375}{2}$$

$$\text{Promedio} = 7,3625 \text{ g/min} \times \text{ft}^2$$

$$A_{\text{resi}} = \frac{V_{\text{resi}}}{L_{\text{resi}}}$$

$$A_{\text{resi}} = \frac{6 \times 10^{-3} \text{ m}^3}{0,6 \text{ m}}$$



$$A_{\text{resil}} = 0,01 \text{ m}^2$$

$$Q = 7,3625 \frac{g}{\text{min} \times \text{ft}^2} \times \frac{3,785 \text{ L}}{1g} \times \frac{1 \text{ ft}^2}{(0,3048 \text{ m})^2}$$

$$Q = 299,95856 \frac{\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{min} \times \text{m}^2_{\text{resil}}} \times 0,01 \text{ m}^2_{\text{resil}}$$

$$Q = 2,99958 \frac{\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{min}}$$

2.2.1.2.2. CALCULO DEL TIEMPO

$$\text{Promedio} = \frac{5 + 20}{2}$$

$$\text{Promedio} = 12,5 \text{ min}$$

2.2.1.2.3. CALCULO DEL VOLUMEN DE AGUA A UTILIZAR

$$V = Q \times t$$

$$V = 2,99958 \frac{\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{min}} \times 12,5 \text{ min}$$

$$V = 37,49475 \text{ L}_{\text{H}_2\text{O}}$$

2.2.1.3. CALCULOS DEL REGENERADO

2.2.1.3.1. CALCULO DEL CAUDAL

$$\text{Promedio} = \frac{0,2 + 0,8}{2}$$

$$\text{Promedio} = 0,5 \text{ g/min} \times \text{ft}^3$$

$$Q = 0,5 \frac{g}{\text{min} \times \text{ft}^3} \times \frac{3,785 \text{ L}}{1g} \times \frac{1 \text{ ft}^3}{28,316 \text{ L}} \times 6 \text{ L}$$

$$Q = 0,40101 \frac{\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{min}}$$

2.2.1.3.2. TIEMPO DE REGENERACIÓN

$$t = 30 \text{ min}$$

2.2.1.3.3. CALCULO DEL VOLUMEN A UTILIZAR

$$V = Q \times t$$

$$V = 0,40101 \frac{L_{H_2O}}{min} \times 30 \text{ min}$$

$$V = 12,0303 L_{H_2O}$$

2.2.1.3.4. CALCULO DE LA CANTIDAD DE H₂SO₄

$$\%V = \frac{V_{sot}}{V_{sol}} \times 100$$

$$V_{sot} = \frac{V_{sol} \times \%V}{100}$$

$$V_{sot} = \frac{12,0303 \times 2,75}{100}$$

$$V_{sot} = 0,3308 L \text{ de } H_2SO_4 \text{ puro}$$

$$\rho = \frac{w}{V}$$

$$w = \rho \times V$$

$$w = 1,84 \frac{gr}{ml} \times 0,3308 \times 1000 \text{ ml}$$

$$w = 608,672 \text{ gr de } H_2SO_4 \text{ puro}$$

$$\%P = \frac{P_{sot}}{P_{sol}} \times 100$$

$$P_{sol} = \frac{P_{sot}}{\%P} \times 100$$

$$P_{sol} = \frac{608,672 \text{ gr de } H_2SO_4}{98} \times 100$$

$$P_{sol} = 621,0939 \text{ gr de } H_2SO_4 \text{ concentrado}$$

$$\rho = \frac{w}{V}$$

$$V = \frac{w}{\rho}$$

$$V = \frac{621,0939 \text{ gr}}{1,84 \text{ gr/ml}}$$

$$V = 337,551 \text{ ml de } H_2SO_4 \text{ concentrado}$$

2.2.2. CALCULO DEL INTERCAMBIADOR IÓNICO – ANIÓNICO (IABF)

Datos de Proceso:

$$Q = 1 - 5 \text{ g/min} \times ft^3$$

$$C.I. = 1,3 \text{ meq/L}_{resid} \times \text{min}$$

$$V = 6 \text{ L}_{resid}$$

$$C = 22.11 \text{ ppm}$$

Datos de Lavado:

$$Q = 2 - 3 \text{ g/min} \times ft^2$$

$$L = 0,6 \text{ m}$$

$$V = 6 \text{ L}_{resid}$$

$$t = 5 - 20 \text{ min}$$

$$Q_1 = 9 \text{ L/min}$$

$$D = \frac{1}{2} plg$$

Datos de Regeneración:

$$Q = 0,25 - 0,50 \text{ g/min} \times ft^3$$

$$t = 30 - 60 \text{ min}$$

$$\% = 4 - 6 \text{ de Solucion de NaOH}$$

$$\% = 99 \text{ en peso de NaOH}$$

$$\rho = 2,13 \text{ gr/ml}$$

2.2.2.1. CALCULOS DEL PROCESO

2.2.2.1.1. CALCULO DEL CAUDAL

$$\text{Promedio} = \frac{1 + 5}{2}$$

$$\text{Promedio} = 3 \text{ g/min} \times \text{ft}^3$$

$$Q = 3 \frac{\text{g}}{\text{min} \times \text{ft}^3} \times \frac{3,785 \text{ L}}{1 \text{ g}} \times \frac{1 \text{ ft}^3}{28,316 \text{ L}} \times 6 \text{ L}$$

$$Q = 2,40606 \frac{\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}}$$

$$Q = 2,40606 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

2.2.2.1.2. CALCULO DE LA VELOCIDAD DEL FUJO

$$D = \frac{1}{2} \text{ plg} \times \frac{0,0254 \text{ m}}{1 \text{ plg}}$$

$$D = 0,0127 \text{ m}$$

$$A = \frac{\pi \times D^2}{4}$$

$$A = \frac{\pi \times (0,0127)^2}{4}$$

$$A = 1,26677 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$Q = V \times A$$

$$v = \frac{Q}{A}$$

$$v = \frac{2,40606 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}}{1,26677 \times 10^{-4} \text{ m}^2}$$

$$v = 0,31656 \text{ m/seg}$$

2.2.2.1.3. CALCULO DE LA CAPACIDAD DE INTERCAMBIO IÓNICO (C.I.)

$$C.I. = 1,3 \frac{\text{eq}}{\text{L}_{\text{resi}} \times \text{min}} \times 6 \text{ L}_{\text{resi}}$$

$$C.I. = 7,8 \text{ eq}$$

2.2.2.1.4. CALCULO DE LA CONCENTRACIÓN DEL AGUA DE LA RED (eq)

$$C_{H_2O} = 22,11 \text{ ppm}$$

$$C_{H_2O} = 22,11 \frac{\text{mgr}}{\text{L}} \times \frac{1 \text{ gr}}{1000 \text{ mgr}}$$

$$C_{H_2O} = 22,11 \times 10^{-3} \text{ gr/L}$$

$$eq = \frac{C}{M/\theta}$$

$$eq = \frac{22,11 \times 10^{-3}}{100/2}$$

$$eq = 4,422 \times 10^{-4} \text{ eq/L}$$

2.2.2.1.5. CALCULO DE LA CANTIDAD DE AGUA A TRATAR

$$V = \frac{C.I.}{eq_{agua}}$$

$$V = \frac{7,8 \text{ eq}}{4,422 \times 10^{-4} \text{ eq/L}}$$

$$V = 17639,077 \text{ L}_{H_2O}$$

2.2.2.1.6. CALCULO DEL TIEMPO DE SATURACIÓN

$$Q = \frac{V}{t}$$

$$t = \frac{V}{Q}$$

$$t = \frac{17639,077 \text{ L}_{H_2O}}{2,40606 \text{ L}_{H_2O}/\text{min}}$$

$$t = 7331,104 \text{ min}$$

2.2.2.2. CALCULOS DEL LAVADO

2.2.2.2.1. CALCULO DEL CAUDAL

$$Promedio = \frac{2 + 3}{2}$$

$$\text{Promedio} = 2,5 \text{ g/min} \times \text{ft}^2$$

$$A_{\text{resi}} = \frac{V_{\text{resi}}}{L_{\text{resi}}}$$

$$A_{\text{resi}} = \frac{6 \times 10^{-3} \text{ m}^3}{0,6 \text{ m}}$$

$$A_{\text{resi}} = 0,01 \text{ m}^2$$

$$Q = 2,5 \frac{\text{g}}{\text{min} \times \text{ft}^2} \times \frac{3,785 \text{ L}}{1 \text{ g}} \times \frac{1 \text{ ft}^2}{(0,3048 \text{ m})^2}$$

$$Q = 101,8535 \frac{\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{min} \times \text{m}^2_{\text{resi}}} \times 0,01 \text{ m}^2_{\text{resi}}$$

$$Q = 1,018535 \frac{\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{min}}$$

2.2.2.2.2. CALCULO DEL TIEMPO

$$\text{Promedio} = \frac{5 + 20}{2}$$

$$\text{Promedio} = 12,5 \text{ min}$$

2.2.2.2.3. CALCULO DEL VOLUMEN DE AGUA A UTILIZAR

$$V = Q \times t$$

$$V = 1,018535 \frac{\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{min}} \times 12,5 \text{ min}$$

$$V = 12,7317 \text{ L}_{\text{H}_2\text{O}}$$

2.2.2.3. CALCULOS DEL REGENERADO

2.2.2.3.1. CALCULO DEL CAUDAL

$$\text{Promedio} = \frac{0,25 + 0,5}{2}$$

$$\text{Promedio} = 0,375 \text{ g/min} \times \text{ft}^2$$

$$Q = 0,375 \frac{g}{min \times ft^3} \times \frac{3,785 L}{1g} \times \frac{1 ft^3}{28,316 L} \times 6 L$$

$$Q = 0,300757 \frac{L_{H_2O}}{min}$$

2.2.2.3.2. TIEMPO DE REGENERACIÓN

$$Promedio = \frac{30 + 60}{2}$$

$$Promedio = 45 \text{ min}$$

2.2.2.3.3. CALCULO DEL VOLUMEN A UTILIZAR

$$V = Q \times t$$

$$V = 0,300757 \frac{L_{H_2O}}{min} \times 45 \text{ min}$$

$$V = 13,53406 L_{H_2O}$$

2.2.2.3.4. CALCULO DE LA CANTIDAD DE NaOH

$$\%V = \frac{V_{sot}}{V_{sol}} \times 100$$

$$V_{sot} = \frac{V_{sol} \times \%V}{100}$$

$$V_{sot} = \frac{13,534 \times 5}{100}$$

$$V_{sot} = 0,6767 \text{ L de NaOH puro}$$

$$\rho = \frac{w}{V}$$

$$w = \rho \times V$$

$$w = 2,13 \frac{gr}{ml} \times 0,6767 \times 1000 \text{ ml}$$

$$w = 1441,371 \text{ gr de NaOH puro}$$

$$\%P = \frac{P_{sot}}{P_{sol}} \times 100$$

$$P_{sol} = \frac{P_{sot}}{\%P} \times 100$$

$$P_{sol} = \frac{1441,371 \text{ gr de } H_2SO_4}{99} \times 100$$

$$P_{sol} = 1455,9303 \text{ gr de soda caustica.}$$

2.2.3. CALCULO DEL ABLANDADOR (ICA)

Datos de Proceso:

$$Q = 1 - 6 \text{ g/min} \times ft^3$$

$$C.I. = 2 \text{ meq/L}_{res} \times \text{min}$$

$$V = 6 L_{res}$$

$$C = 22.11 \text{ ppm}$$

Datos de Lavado:

$$Q = \text{g/min} \times ft^2$$

$$L = 0,6 \text{ m}$$

$$V = 6 L_{res}$$

$$t = \text{min}$$

$$Q_1 = 9 \text{ L/min}$$

$$D = \frac{1}{2} plg$$

Datos de Regeneración:

$$Q = \text{g/min} \times ft^3$$

$$t = \text{min}$$

$$\% = \text{de NaOH}$$



2.2.3.1. CALCULOS DEL PROCESO

2.2.3.1.1. CALCULO DEL CAUDAL

$$Promedio = \frac{1 + 6}{2}$$

$$\text{Promedio} = 3,5 \text{ g/min} \times \text{ft}^3$$

$$Q = 3,5 \frac{\text{g}}{\text{min} \times \text{ft}^3} \times \frac{3,785 \text{ L}}{1 \text{ g}} \times \frac{1 \text{ ft}^3}{28,316 \text{ L}} \times 6 \text{ L}$$

$$Q = 2,80707 \frac{\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}}$$

$$Q = 2,80707 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

2.2.3.1.2. CALCULO DE LA VELOCIDAD DEL FUJO

$$D = \frac{1}{2} \text{ plg} \times \frac{0,0254 \text{ m}}{1 \text{ plg}}$$

$$D = 0,0127 \text{ m}$$

$$A = \frac{\pi \times D^2}{4}$$

$$A = \frac{\pi \times (0,0127)^2}{4}$$

$$A = 1,26677 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$Q = V \times A$$

$$v = \frac{Q}{A}$$

$$v = \frac{2,80707 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}}{1,26677 \times 10^{-4} \text{ m}^2}$$

$$v = 0,36932 \text{ m/seg}$$

2.2.3.1.3. CALCULO DE LA CAPACIDAD DE INTERCAMBIO IÓNICO (C.I.)

$$C.I. = 2 \frac{\text{eq}}{\text{L}_{\text{rest}} \times \text{min}} \times 6 \text{ L}_{\text{rest}}$$

$$C.I. = 12 \text{ eq}$$

2.2.3.1.4. CALCULO DE LA CONCENTRACIÓN DEL AGUA DE LA RED (eq)

$$C_{H_2O} = 22,11 \text{ ppm}$$

$$C_{H_2O} = 22,11 \frac{\text{mgr}}{\text{L}} \times \frac{1 \text{ gr}}{1000 \text{ mgr}}$$

$$C_{H_2O} = 22,11 \times 10^{-3} \text{ gr/L}$$

$$eq = \frac{C}{\frac{M}{\theta}}$$

$$eq = \frac{22,11 \times 10^{-3}}{100/2}$$

$$eq = 4,422 \times 10^{-4} \text{ eq/L}$$

2.2.3.1.5. CALCULO DE LA CANTIDAD DE AGUA A TRATAR

$$V = \frac{C.I.}{eq_{\text{agua}}}$$

$$V = \frac{12 \text{ eq}}{4,422 \times 10^{-4} \text{ eq/L}}$$

$$V = 27137,042 \text{ L}_{H_2O}$$

2.2.3.1.6. CALCULO DEL TIEMPO DE SATURACIÓN

$$Q = \frac{V}{t}$$

$$t = \frac{V}{Q}$$

$$t = \frac{27137,042 \text{ L}_{H_2O}}{2,80707 \text{ L}_{H_2O}/\text{min}}$$

$$t = 9667,39 \text{ min}$$

2.2.3.2. CALCULOS DEL LAVADO

2.2.3.2.1. CALCULO DEL CAUDAL

$$\text{Promedio} = \frac{2 + 8}{2}$$

$$\text{Promedio} = 5 \text{ g/min} \times \text{ft}^2$$

$$A_{\text{res}} = \frac{V_{\text{res}}}{L_{\text{res}}}$$

$$A_{\text{res}} = \frac{6 \times 10^{-3} \text{ m}^3}{0,6 \text{ m}}$$

$$A_{\text{res}} = 0,01 \text{ m}^2$$

$$Q = 5 \frac{\text{g}}{\text{min} \times \text{ft}^2} \times \frac{3,785 \text{ L}}{1 \text{ g}} \times \frac{1 \text{ ft}^2}{(0,3048 \text{ m})^2}$$

$$Q = 203,7070 \frac{\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{min} \times \text{m}^2_{\text{res}}}$$

$$Q = 2,03707 \frac{\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{min}}$$

2.2.3.2.2. CALCULO DEL TIEMPO

$$\text{Promedio} = \frac{20 + 30}{2}$$

$$\text{Promedio} = 25 \text{ min}$$

2.2.3.2.3. CALCULO DEL VOLUMEN DE AGUA A UTILIZAR

$$V = Q \times t$$

$$V = 2,03707 \frac{\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{min}} \times 25 \text{ min}$$

$$V = 50,927 \text{ L}_{\text{H}_2\text{O}}$$

2.2.3.3. CALCULOS DEL REGENERADO

2.2.3.3.1. CALCULO DEL CAUDAL

$$Promedio = \frac{0,3 + 0,5}{2}$$

$$Promedio = 0,4 \text{ g/min} \times \text{ft}^3$$

$$Q = 0,4 \frac{\text{g}}{\text{min} \times \text{ft}^3} \times \frac{3,785 \text{ L}}{1 \text{ g}} \times \frac{1 \text{ ft}^3}{28,316 \text{ L}} \times 6 \text{ L}$$

$$Q = 0,3208 \frac{\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{min}}$$

2.2.3.3.2. TIEMPO DE REGENERACIÓN

$$Promedio = \frac{30 + 40}{2}$$

$$Promedio = 35 \text{ min}$$

2.2.3.3.3. CALCULO DEL VOLUMEN A UTILIZAR

$$V = Q \times t$$

$$V = 0,300757 \frac{\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{min}} \times 45 \text{ min}$$

$$V = 11,228 \text{ L}_{\text{solución}}$$

2.2.3.3.4. CALCULO DE LA CANTIDAD DE NaCl

Componentes de la Sal:

Yodo: 40 ppm

Flúor: 250 ppm

NaCl: el resto.

Tomamos como base de cálculo una bolsa de sal que contiene 500 gr.

$$40 \text{ ppm} = 40 \frac{\text{mg}}{\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}} = 0,04 \text{ gr}$$

$$250 \text{ ppm} = 250 \frac{\text{mg}}{\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}} = 0,25 \text{ gr}$$

Cantidad de NaCl presente en la sal es:

$$\text{gr}_{\text{NaCl}} = 500 \text{ gr} - 0,04 \text{ gr} - 0,25 \text{ gr}$$

$$\text{gr}_{\text{NaCl}} = 499,71 \text{ gr}$$

Porcentaje de pureza del NaCl en la sal es:

$$\% \text{NaCl} = \frac{499,71 \text{ gr}}{500 \text{ gr}} \times 100$$

$$\% \text{NaCl} = 99,942 \%$$

$$\%V = \frac{V_{\text{sol}}}{V_{\text{sol}}} \times 100$$

$$V_{\text{sol}} = \frac{V_{\text{sol}} \times \%V}{100}$$

$$V_{\text{sol}} = \frac{11,228 \times 10}{100}$$

$$V_{\text{sol}} = 1,1228 \text{ L de NaCl puro}$$

$$\rho = \frac{w}{V}$$

$$w = \rho \times V$$

$$w = 2,16 \frac{\text{gr}}{\text{ml}} \times 1,1228 \times 1000 \text{ ml}$$

$$w = 2425,248 \text{ gr de NaCl puro}$$

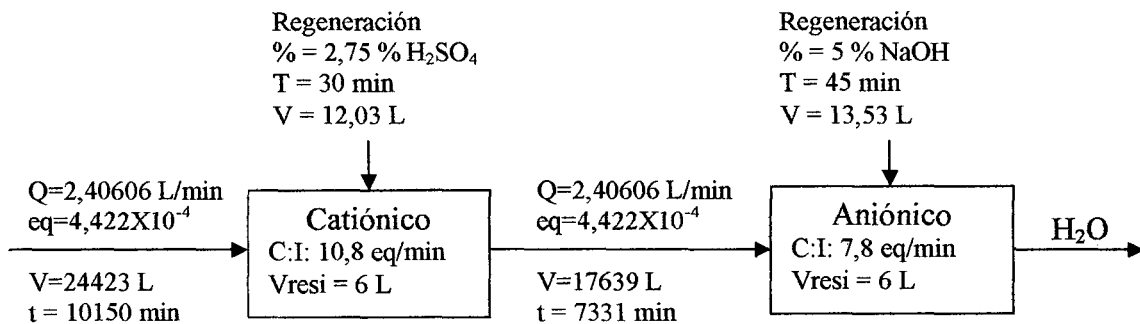
$$\%P = \frac{P_{\text{sol}}}{P_{\text{sol}}} \times 100$$

$$P_{\text{sol}} = \frac{P_{\text{sol}}}{\%P} \times 100$$

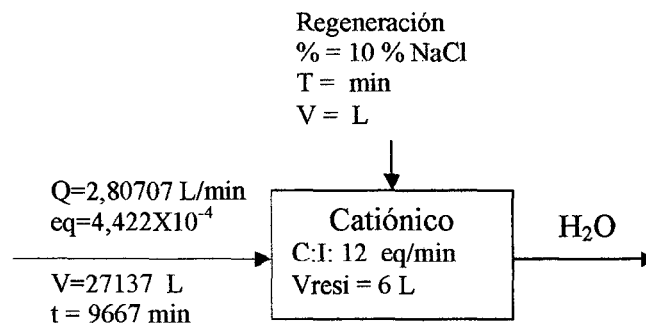
$$P_{\text{sol}} = \frac{2425,248 \text{ gr de NaCl}}{99,942} \times 100$$

$$P_{\text{sol}} = 2426,655 \text{ gr de sal}$$

2.3. DIAGRAMA DE BLOQUE DEL EQUIPO MODULAR DE INTERCAMBIO IÓNICO



2.4. DIAGRAMA DE BLOQUE DEL ABLANDADOR



CAPÍTULO III: CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DEL SISTEMA

3.1. MATERIALES Y EQUIPOS EMPLEADOS

1 electrobomba de ½ Hp
1 tubería de 1 pulgada de diámetro (PVC SAP)
3 tubos de 1/2 pulgada de diámetro (PVC SAP)
1 llave termomagnética de 2x16 amperios
1 caja para sobre poner la llave termomagnética
3 metros de cable vulcanizado 2x14 AWG
23 válvulas esféricas de PVC para tubería de 1/2 pulgada
1 válvula check para tubería de 1/2 de diámetro (vertical con canastilla)
2 grifos PVC de ½ pulg
51 adaptadores PVC para tubería de 1/2 pulgada
3 reducciones PVC de 1 a 1/2 pulgada
33 codos de 90° PVC de 1/2 pulgada
21 tés PVC para tubería de 1/2 pulgada
1 Cruz con rosca de 1/2 pulgada
1 unión universal PVC para tubería de 1/2 pulgada
2 adaptadores PVC para tubería de 1 pulgada
1 té PVC para tubería de 1 pulgada
1 codo de 90° PVC de 1 pulgada
2 niples PVC de 1/2 pulgada
2 uniones universales PVC para tubería de 1 pulgada
1 tubería PVC SAP de 6 pulg
Un galón de pintura esmalte color gris
Un galón de pintura esmalte color verde
6 litros de resina catiónica de acido fuerte
6 litros de resina catiónica de base fuerte
6 litros de resina catiónica de ciclo de sodio

- 1 frasco de pegamento para tubo
- 5 carretes de cinta teflón
- Estructura metálica

3.2. DETALLE DE LOS COMPONENTES PRINCIPALES DEL EQUIPO

3.2.1. DETALLE DEL DESMINERALIZADOR

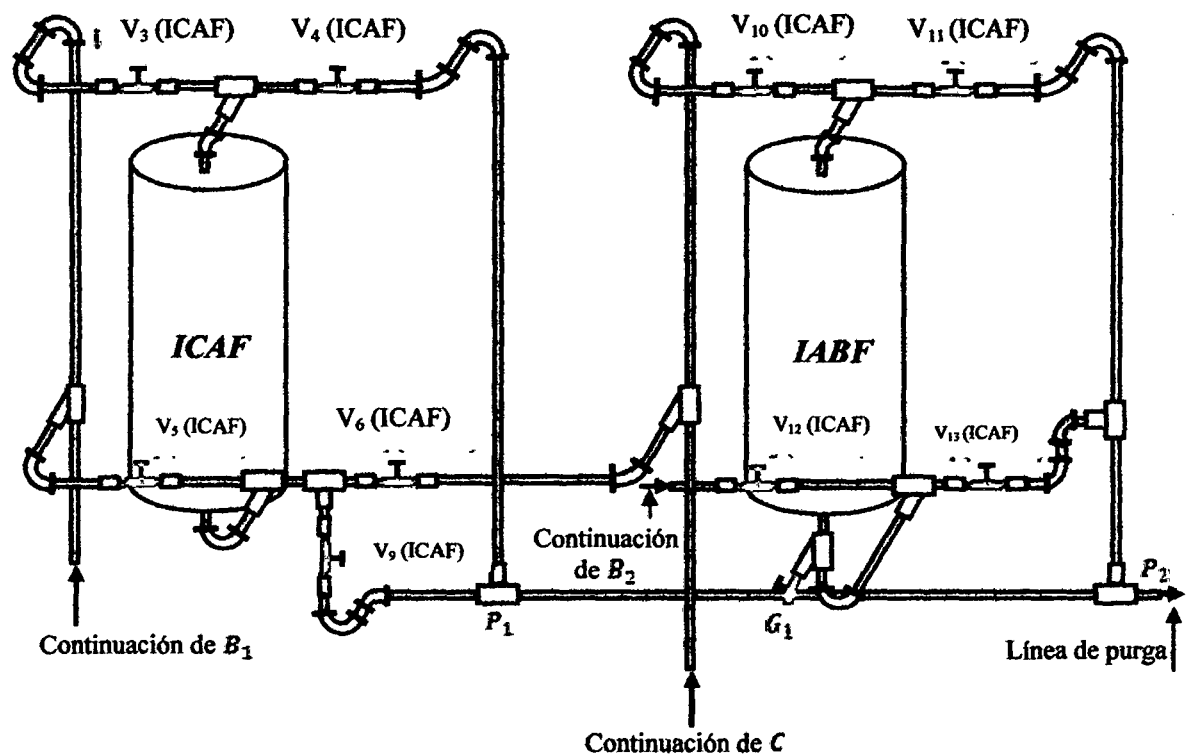


Figura 3.1. Detalle del desmineralizador

Fuente: Elaboración propia

3.2.2. DETALLE DEL INTERCAMBIADOR ABLANDADOR

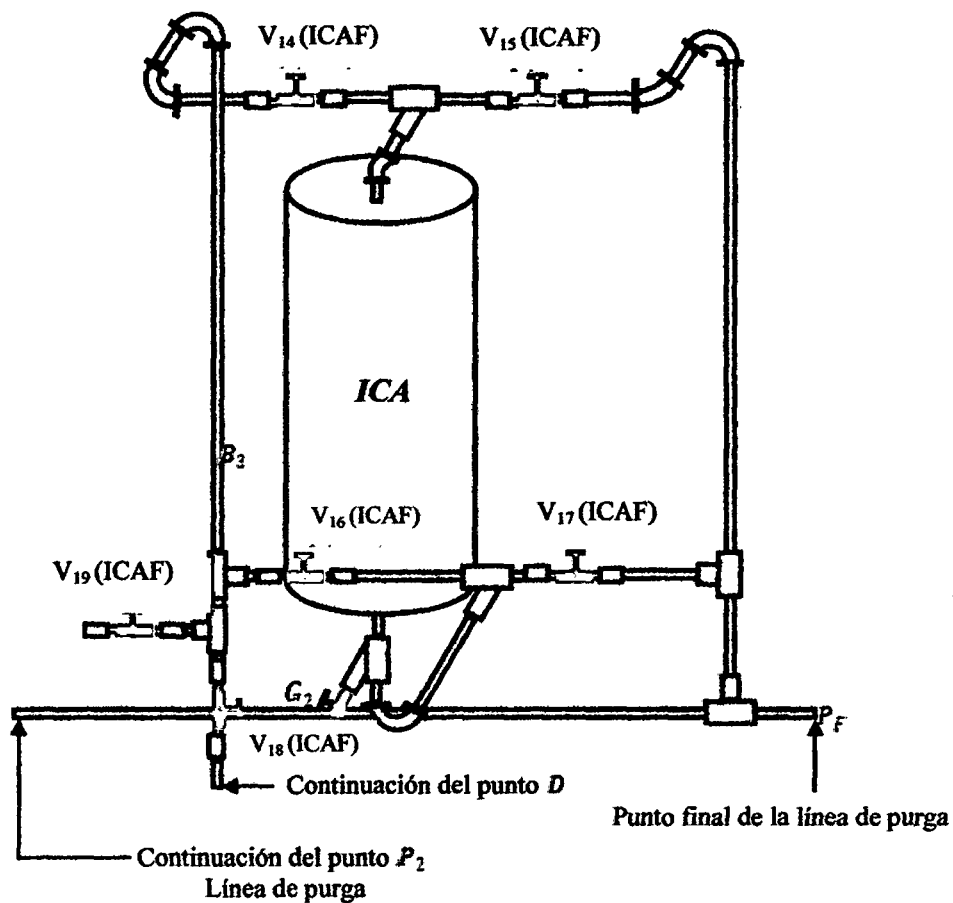


Figura 3.2. Detalle del intercambiador ablandador

Fuente: Elaboración propia

3.2.3. DETALLE DE LA LÍNEA PARA ALIMENTACIÓN DE AGUA

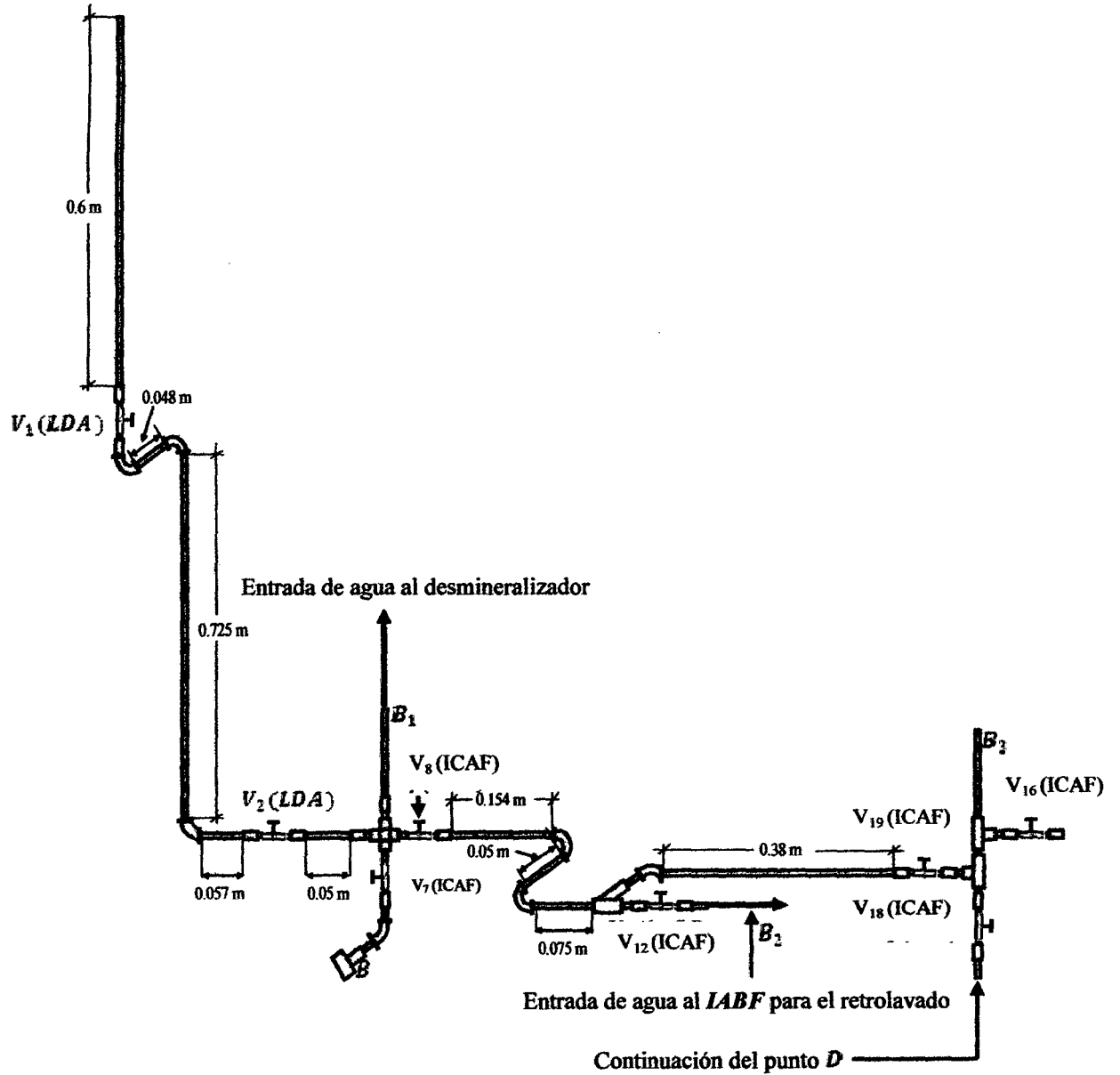


Figura 3.3. Detalle de la línea para alimentación de agua

Fuente: Elaboración propia

3.2.4. DETALLE DE LA LÍNEA PARA ALIMENTACIÓN DE QUÍMICOS

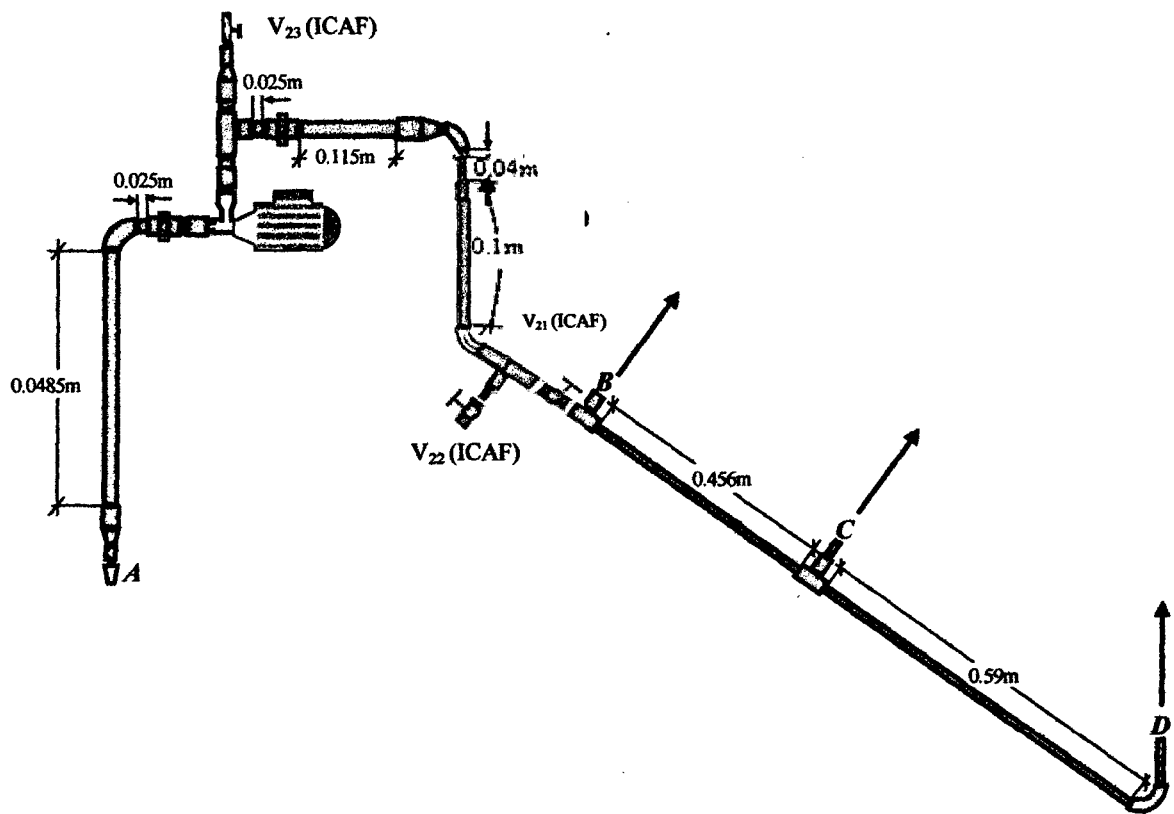


Figura 3.4. Detalle de la línea para alimentación de químicos

Fuente: Elaboración propia

3.2.5. DETALLE PARA EL TANQUE RESERVORIO

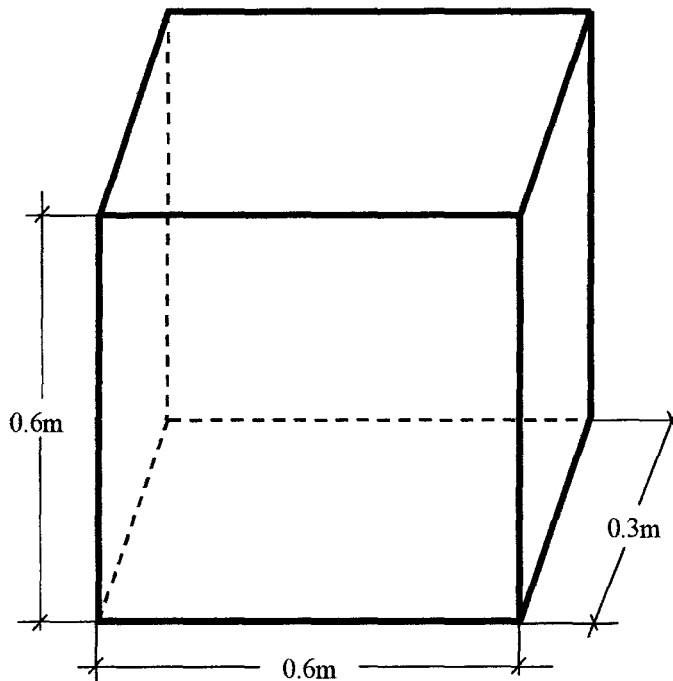


Figura 3.5. Detalle para el tanque reservorio

Fuente: Elaboración propia

3.3. ESPECIFICACIÓN DE LOS COMPONENTES PRINCIPALES DEL EQUIPO MODULAR

DESMINERALIZADOR

(ICAF)

Material: PVC SAP cédula 10

Diámetro nominal: 6 pulg

Espesor: 2mm

Diámetro interior: 0.154m

Altura interior: 0.54m

(IABF)

Material: PVC SAP cédula 10

Diámetro nominal: 6 pulg

Espesor: 2mm

Diámetro interior: 0.154m

Altura interior: 0.54m

Tubería recta

Material: PVC SAP cédula 10

Diámetro nominal: 1/2 pulgada

Longitud total: 5m

Válvula esférica

Material: PVC SAP cédula 10

Diámetro nominal: 1/2 pulgada

Cantidad: 9

Codo de 90°

Material: PVC SAP cédula 10

Diámetro nominal: 1/2 pulgada

Cantidad: 17

Te

Material: PVC SAP cédula 10

Diámetro nominal: 1/2 pulgada

Cantidad: 10

Adaptador

Material: PVC SAP cédula 10

Diámetro nominal: 1/2 pulgada

Cantidad: 19

Grifo

Material: PVC SAP cédula 10

Diámetro nominal: 1/2 pulgada

Cantidad: 1

INTERCAMBIADOR ABLANDADOR

(ICA)

Material: PVC SAP cédula 10

Diámetro nominal: 6 pulg

Espesor: 2mm

Diámetro interior: 0.154m

Altura interior: 0.54m

Tubería recta

Material: PVC SAP cédula 10

Diámetro nominal: 1/2 pulgada

Longitud total: 2m

Válvula esférica

Material: PVC SAP cédula 10

Diámetro nominal: 1/2 pulgada

Cantidad: 6

Codo de 90°

Material: PVC SAP cédula 10

Diámetro nominal: 1/2 pulgada

Cantidad: 6

Te

Material: PVC SAP cédula 10
Diámetro nominal: 1/2 pulgada
Cantidad: 7

Adaptador

Material: PVC SAP cédula 10
Diámetro nominal: 1/2 pulgada
Cantidad: 13

Grifo

Material: PVC SAP cédula 10
Diámetro nominal: 1/2 pulgada
Cantidad: 1

LÍNEA PARA ALIMENTACIÓN DE AGUA**Tubería recta**

Material: PVC SAP cédula 10
Diámetro nominal: 1/2 pulgada
Longitud total: 3m

Válvula esférica

Material: PVC SAP cédula 10
Diámetro nominal: 1/2 pulgada
Cantidad: 8

Codo de 90°

Material: PVC SAP cédula 10
Diámetro nominal: 1/2 pulgada
Cantidad: 7

Te

Material: PVC SAP cédula 10
Diámetro nominal: 1/2 pulgada
Cantidad: 4

Adaptador

Material: PVC SAP cédula 10
Diámetro nominal: 1/2 pulgada
Cantidad: 16

Cruz con rosca

Material: PVC SAP cédula 10
Diámetro nominal: 1/2 pulgada
Cantidad: 1

Niple

Material: PVC SAP cédula 10
Diámetro nominal: 1/2 pulgada
Cantidad: 2

LÍNEA PARA ALIMENTACIÓN DE QUÍMICOS**Tubería recta de 1 pulg**

Material: PVC SAP cédula 10
Diámetro nominal: 1 pulgada
Longitud total: 0.65m

Tubería recta de 1/2 pulg

Material: PVC SAP cédula 10
Diámetro nominal: 1/2 pulgada
Longitud total: 2m

Válvula check

Material: Broce grafitado

Diámetro nominal: 1/2 pulgada

Cantidad: 1

Válvula esférica

Material: PVC SAP cédula 10

Diámetro nominal: 1/2 pulgada

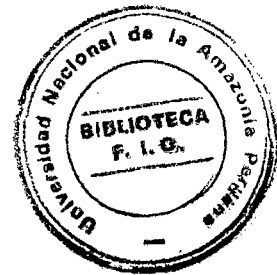
Cantidad: 2

Codo de 90° de 1 pulg

Material: PVC SAP cédula 10

Diámetro nominal: 1 pulgada

Cantidad: 1



Codo de 90° de 1/2 pulg

Material: PVC SAP cédula 10

Diámetro nominal: 1/2 pulgada

Cantidad: 3

Te de 1 pulg

Material: PVC SAP cédula 10

Diámetro nominal: 1 pulgada

Cantidad: 1

Te de 1/2 pulg

Material: PVC SAP cédula 10

Diámetro nominal: 1/2 pulgada

Cantidad: 2

Unión universal de 1 pulg

Material: PVC SAP cédula 10

Diámetro nominal: 1 pulgada

Cantidad: 2

Unión universal de 1/2 pulg

Material: PVC SAP cédula 10

Diámetro nominal: 1/2 pulgada

Cantidad: 1

Adaptador de 1 pulg

Material: PVC SAP cédula 10

Diámetro nominal: 1 pulgada

Cantidad: 2

Adaptador de 1/2 pulg

Material: PVC SAP cédula 10

Diámetro nominal: 1/2 pulgada

Cantidad: 4

Válvula esférica

Material: PVC SAP cédula 10

Diámetro nominal: 1/2 pulgada

Cantidad: 2

Reducción de 1 a 1/2 pulgada

Material: PVC SAP cédula 10

Cantidad: 3

3.4. DISPOSICIÓN ADECUADA DEL EQUIPO EN EL LABORATORIO

El equipo se debe instalar en un ambiente donde un grupo de 10 personas como máximo puedan realizar la práctica cómodamente, para eso este ambiente debe tener por lo menos las siguientes dimensiones:

Largo: 3m

Ancho: 3m

Alto: 3m

Además este ambiente debe contar un grifo para la alimentación de agua cruda al equipo, y un desagüe para la purga de los productos cuando se haga la desmineralización, ablandamiento, regeneración de la resina y el retrolavado en cada uno de los intercambiadores.

Se debe tener una línea de corriente, exclusiva para la electrobomba, donde el voltaje sea 220 Voltios

CAPÍTULO IV: EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN DEL EQUIPO

4.1. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO

El funcionamiento del equipo, se describe en los procesos de desmineralizado, ablandamiento y regeneración de la resina en cada intercambiador. También se describe en la operación de retrolavado.

DESMINERALIZADO

La operación de transporte de fluidos en este proceso se inicia cuando se abren las válvulas V_1 y V_2 y se cierran las válvulas V_7 y V_8 , de esta forma el agua cruda fluye a través del tramo de tubería donde se encuentra el punto B_1 y entra al desmineralizador.

El agua cruda entra al desmineralizador, inicialmente por el (*ICAF*), para esto las válvulas V_3 y V_6 deben estar abiertas y las válvulas V_4 , V_5 y V_9 deben estar cerradas. En el (*ICAF*) se reducen los cationes de las sales presentes en el agua cruda. El agua cruda sale del (*ICAF*) por medio de la válvula V_6 y entra al (*IABF*) para lo cual las válvulas V_1 deben estar abierta y las válvulas V_{20} , V_{11} , V_{12} y V_{13} deben estar cerradas. El producto se obtiene abriendo el grifo G_1 . En el (*IABF*) se reducen los aniones de las sales presentes en el agua cruda. Todas las otras válvulas que no se mencionan deben estar cerradas.

ABLANDAMIENTO

La operación de transporte de fluidos en este proceso se inicia cuando se abren las válvulas V_1 , V_2 , V_8 , V_{19} y V_{14} , y se cierran las válvulas V_7 , V_3 , V_5 , V_{12} , V_{15}

V_{16} , V_{17} , y V_{18} de esta forma el agua cruda fluye a través del tramo de tubería donde se encuentra el punto B_3 y entra al (*ICA*).

Al entrar el agua cruda al (*ICA*), las válvulas V_{14} deben estar abierta y las válvulas V_{15} , V_{16} , V_{17} y V_{18} deben estar cerradas. En el (*ICAF*) se reducen los cationes de calcio y magnesio presentes en el agua cruda en forma de carbonato de calcio y magnesio. El agua cruda sale del (*ICA*) por medio del grifo G_2 . Todas las otras válvulas que no se mencionan deben estar cerradas.

REGENERACIÓN

ICAF

Para este proceso, inicialmente se debe preparar una solución de ácido sulfúrico en el tanque reservorio, después se debe prender la electrobomba y se inicia la operación de transporte de fluidos. La solución de ácido sulfúrico se bombea desde el punto *A* al (*ICAF*), pasando por el tramo donde se indica el punto *B*, para esto las válvulas V_{22} , V_{21} (*debe estar abierta solo la mitad*), V_7 , V_3 y V_9 , deben estar abiertas y las válvulas V_{23} , V_{24} , V_8 , V_5 , V_4 , V_6 , V_{11} , V_{13} , V_{17} y V_{15} deben estar cerradas. El ácido sulfúrico entra al (*ICAF*) por medio de la válvula V_3 y sale por la válvula V_9 hasta la línea de purga en el punto P_1 , así hasta llegar al punto P_F . En este proceso, el ácido sulfúrico reacciona con los cationes que se encuentran retenidos en la resina, tal como se muestra desde la ecuación (1.41) hasta la ecuación (1.44). Todas las otras válvulas que no se mencionan deben estar cerradas.

IABF

Para este proceso, inicialmente se debe preparar una solución de hidróxido de sodio en el tanque reservorio, después se debe prender la electrobomba y se inicia la operación de transporte de fluidos. La solución de hidróxido de sodio se bombea desde el

punto *A* al (*IABF*), pasando por el tramo donde se indica el punto *C*, para esto las válvulas V_{22} , V_{21} (*debe estar abierta solo la mitad*) V_{20} , V_{10} , y V_{13} deben estar abiertas y las válvulas V_{23} , V_7 , V_{18} , V_6 , V_{11} , V_{12} , V_9 , V_4 , V_{17} , V_{15} y G_1 deben estar cerradas. El hidróxido de sodio entra al (*IABF*) por medio de la válvula V_{10} y sale por la válvula V_{13} hasta la línea de purga en el punto P_2 , así hasta llegar al punto P_F . En este proceso, el hidróxido de sodio reacciona con los aniones que se encuentran retenidos en la resina, tal como se muestra desde la ecuación (1.45) hasta la ecuación (1.49). Todas las otras válvulas que no se mencionan deben estar cerradas.

ICA

Para este proceso, inicialmente se debe preparar una solución de cloruro de sodio en el tanque reservorio, después se debe prender la electrobomba y se inicia la operación de transporte de fluidos. La solución de cloruro de sodio se bombea desde el punto *A* al (*ICA*), pasando por el tramo donde se indica el punto *D*, para esto las válvulas V_{22} , V_{21} (*debe estar abierto hasta la mitad*), V_{18} , V_{14} y V_{17} deben estar abiertas y las válvulas V_{23} , V_7 , V_{20} , V_{19} , V_{16} , V_{15} , V_4 , V_9 , V_{11} , V_{13} y G_2 deben estar cerradas. El cloruro de sodio entra al (*ICA*) por medio de la válvula V_{14} y sale por la válvula V_{17} hasta la línea de purga, así hasta llegar al punto P_F . En este proceso, el cloruro de sodio reacciona con los cationes que se encuentran retenidos en la resina. Todas las otras válvulas que no se mencionan deben estar cerradas.

LAVADO

ICAF

Para este proceso, inicialmente se debe tener a disposición agua destilada en el tanque reservorio, después se debe prender la electrobomba y se inicia la operación de transporte de fluidos. El agua destilada se bombea desde el punto *A* al (*ICAF*). La operación de transporte de fluidos se inicia cuando se abren las válvulas

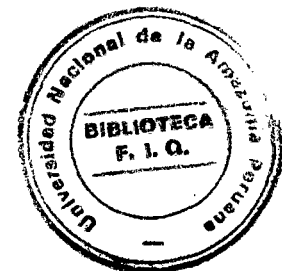
V_{22} (debe estar abierta solo la mitad), V_{21} (debe estar abierto hasta la mitad), V_7 , V_3 y V_9 , deben estar abiertas y las válvulas V_{23} , V_2 , V_8 , V_5 , V_4 , V_6 , V_{11} , V_{13} , V_{17} y V_{15} deben estar cerradas. El agua entra al (ICAF) por medio de la válvula V_3 y sale por la válvula V_9 hasta la línea de purga en el punto P_1 , así hasta llegar al punto P_F . Todas las otras válvulas que no se mencionan deben estar cerradas.

IABF

Para este proceso, inicialmente se debe tener a disposición agua destilada en el tanque reservorio, después se debe prender la electrobomba y se inicia la operación de transporte de fluidos. El agua destilada se bombea desde el punto A al (ICAF) pasando por el tramo donde se indica el punto C . La operación de transporte de fluidos se inicia cuando se abren las válvulas V_{22} (debe estar abierta solo la mitad), V_{21} (debe estar abierto solo la mitad), V_{20} , V_{10} , y V_{13} deben estar abiertas y las válvulas V_{23} , V_7 , V_{18} , V_6 , V_{11} , V_{12} , V_9 , V_4 , V_{17} , V_{15} y G_1 deben estar cerradas. El agua destilada entra al (IABF) por medio de la válvula V_{10} y sale por la válvula V_{13} hasta la línea de purga en el punto P_2 , así hasta llegar al punto P_F . Todas las otras válvulas que no se mencionan deben estar cerradas.

ICA

Para este proceso, inicialmente se debe tener a disposición agua destilada en el tanque reservorio, después se debe prender la electrobomba y se inicia la operación de transporte de fluidos. El agua destilada se bombea desde el punto A al (ICA), pasando por el tramo donde se indica el punto D , para esto las válvulas V_{22} (debe estar abierta solo la mitad) V_{21} (debe estar abierto solo la mitad), V_{18} , V_{14} y V_{17} deben estar abiertas y las válvulas V_{23} , V_7 , V_{20} , V_{19} , V_{16} , V_{15} , V_4 , V_9 , V_{11} , V_{13} y G_2 deben estar cerradas. El agua destilada entra al (ICA) por medio de la válvula V_{14} y sale por la válvula V_{17} hasta la línea de purga, así hasta llegar al punto P_F . Todas las otras válvulas que no se mencionan deben estar cerradas.



4.2. ENSAYOS Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Se realizó una prueba del equipo modular, en la cual se hizo pasar agua cruda por el desmineralizador y el intercambiador ablandador. Los resultados de esta prueba se muestran en la siguiente sección.

4.3. DISEÑO EXPERIMENTAL PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL EQUIPO MODULAR

El diseño experimental empleado corresponde a un diseño factorial con puntos específicos representados por variables, este caso fueron Caudal, Concentración y Eficiencia.

Los ensayos fueron realizados de manera aleatoria para minimizar el error en la secuencia de experimentación, las condiciones de ensayo se muestran en el cuadro 4.1. del Intercambiador Iónico y el cuadro 4.2. son del Ablandador.

Las variables tales como la temperatura y pH no son tomados en cuenta debido a que no juegan un papel predominante; es decir no alteran en el intercambio iónico, ya que las resinas tanto el Catiónico como el Aniónico (del desmineralizador) y el Ablandador pueden trabajar a temperaturas mayores al del ambiente, y a pH que están en el rango de 0-13.

Para medir las concentraciones tuvimos que tomar muestras tanto de la toma de agua que viene de la red, como de los productos obtenidos en los grifos G_1 (del Desmineralizador) y G_2 (del Ablandador), y se los llevaron a las instalaciones de SEDALORETO para los respectivos análisis arrojando los resultados que están plasmados en los cuadros 4.1. y 4.2.

Cuadro N° 4.1.: Ensayos en el Desmineralizador

DESMINERALIZADO				
Ensayos	Variables	Entrada	Salida	% Eficiencia
M ₁	Caudal L/min	1	1	80,74
	[CaCO ₃] mg/L	14,53	2,18	
	[MgCO ₃] mg/L	7,53	3,22	
	[Cl] mg/L	0,1	0	
M ₂	Caudal L/min	2	2	83,85
	[CaCO ₃] mg/L	14,53	1,5	
	[MgCO ₃] mg/L	7,53	2,87	
	[Cl] mg/L	0,1	0	
M ₃	Caudal L/min	3	3	94,95
	[CaCO ₃] mg/L	14,53	0,56	
	[MgCO ₃] mg/L	7,53	0,85	
	[Cl] mg/L	0,1	0	
M ₄	Caudal L/min	4	4	89,84
	[CaCO ₃] mg/L	14,53	0,86	
	[MgCO ₃] mg/L	7,53	1,85	
	[Cl] mg/L	0,1	0	
M ₅	Caudal L/min	5	5	85,38
	[CaCO ₃] mg/L	14,53	1,84	
	[MgCO ₃] mg/L	7,53	2,35	
	[Cl] mg/L	0,1	0	

Cuadro N° 4.2.: Ensayos en el Ablandador

ABLANDADOR				
Ensayos	Variables	Entrada	Salida	% Eficiencia
M ₁	Caudal L/min	1	1	72,3
	[CaCO ₃] mg/L	14,53	1,97	
	[MgCO ₃] mg/L	7,53	3,15	
M ₂	Caudal L/min	2	2	77,15
	[CaCO ₃] mg/L	14,53	1,43	
	[MgCO ₃] mg/L	7,53	2,70	
M ₃	Caudal L/min	3	3	89,03
	[CaCO ₃] mg/L	14,53	0,97	
	[MgCO ₃] mg/L	7,53	1,15	
M ₄	Caudal L/min	4	4	82,76
	[CaCO ₃] mg/L	14,53	1,17	
	[MgCO ₃] mg/L	7,53	1,94	
M ₅	Caudal L/min	5	5	76,73
	[CaCO ₃] mg/L	14,53	1,92	
	[MgCO ₃] mg/L	7,53	2,51	

Gracias a estos ensayos experimentales podemos obtener datos reales y así determinar el mejor diseño de operación para optimizar el rendimiento del Desmineralizador y del Ablandador, siendo lo más recomendable trabajar a condiciones en las que se trabajó la M₃, con las cuales todos los cálculos están desarrollados en el Capítulo II en función de la muestra 3.

4.4. CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

DESMINERALIZADO

En la prueba que se hizo los resultados fueron:

Caudal en el proceso de desmineralizado: $Ca_{SD} = 2,4060 \text{ lt /min}$

Concentración de carbonato de calcio en la entrada del desmineralizador:

$$[CaCO_3]_{ED} = 14,53 \text{ mg /lt}$$

Concentración de carbonato de calcio a la salida del desmineralizador:

$$[CaCO_3]_{SD} = 0,56 \text{ mg /lt}$$

Concentración de carbonato de magnesio en la entrada del desmineralizador:

$$[MgCO_3]_{ED} = 7.53 \text{ mg /lt}$$

Concentración de carbonato de magnesio a la salida del desmineralizador:

$$[MgCO_3]_{SD} = 0,85 \text{ mg /lt}$$

Concentración de cloruro en la entrada del desmineralizador:

$$[Cl^-]_{ED} = 0.1 \text{ mg /lt}$$

Concentración de cloruro a la salida del desmineralizador:

$$[Cl^-]_{SD} = 0 \text{ mg /lt}$$

Se aplican las ecuaciones (1.64) y (1.65), para expresar estos resultados en función de las concentraciones de los cationes Ca^{++} y Mg^{++}

Concentración de calcio en la entrada del desmineralizador:

$$[\text{Ca}^{++}]_{ED} = \frac{14.53 \times 2}{5} \text{ mg/lt} = 5.812 \text{ mg/lt}$$

Concentración de calcio a la salida del desmineralizador:

$$[\text{Ca}^{++}]_{SD} = \frac{0.56 \times 2}{5} \text{ mg/lt} = 0.224 \text{ mg/lt}$$

Concentración de magnesio en la entrada del desmineralizador:

$$[\text{Mg}^{++}]_{ED} = \frac{24 \times 7.53}{115} \text{ mg/lt} = 1.5715 \text{ mg/lt}$$

Concentración de magnesio a la salida del desmineralizador:

$$[\text{Mg}^{++}]_{SD} = \frac{24 \times 0.85}{115} \text{ mg/lt} = 0.1774 \text{ mg/lt}$$

Aplicando la ecuación (1.62)

$$E_{f(D)} = \frac{1}{3} \left[\frac{(1.5715 - 0.1774)}{1.5715} + \frac{(5.812 - 0.224)}{5.812} + \frac{(0.1 - 0)}{0.1} \right] \times 100 = 94.95\%$$

ABLANDAMIENTO

En la prueba que se hizo los resultados fueron:

Caudal en el proceso de ablandamiento: $Ca_{S(ICA)} = 2,80707 \text{ lt /min}$

Concentración de carbonato de calcio en la entrada del ablandador:

$$[CaCO_3]_{E(ICA)} = 14.53 \text{ mg /lt}$$

Concentración de carbonato de calcio a la salida del ablandador:

$$[CaCO_3]_{S(ICA)} = 0.97 \text{ mg /lt}$$

Concentración de carbonato de magnesio en la entrada del ablandador:

$$[MgCO_3]_{E(ICA)} = 7.53 \text{ mg /lt}$$

Concentración de carbonato de magnesio a la salida del ablandador:

$$[MgCO_3]_{S(ICA)} = 1.15 \text{ mg /lt}$$

Se aplican las ecuaciones (1.64) y (1.65), para expresar estos resultados en función de las concentraciones de los cationes Ca^{++} y Mg^{++}

Concentración de calcio en la entrada del desmineralizador:

$$[Ca^{++}]_{E(ICA)} = \frac{14.53 \times 2}{5} \text{ mg/ lt} = 5.812 \text{ mg/ lt}$$

Concentración de calcio a la salida del desmineralizador:

$$[Ca^{++}]_{S(ICA)} = \frac{0.97 \times 2}{5} \text{ mg/ lt} = 0.388 \text{ mg/ lt}$$

Concentración de magnesio en la entrada del desmineralizador:

$$[\text{Mg}^{++}]_{E(ICA)} = \frac{24 \times 7.53}{115} \text{ mg/lit} = 1.5715 \text{ mg/lit}$$

Concentración de magnesio a la salida del desmineralizador:

$$[\text{Mg}^{++}]_{S(ICA)} = \frac{24 \times 1.15}{115} \text{ mg/lit} = 0.24 \text{ mg/lit}$$

Aplicando la ecuación (1.63)

$$E_{f(ICA)} = \frac{1}{2} \left[\frac{(1.5715 - 0.24)}{1.5715} + \frac{(5.812 - 0.388)}{5.812} \right] \times 100 = 89.03\%$$

De los resultados obtenidos, se puede observar lo siguiente:

- De los cálculos que se hizo haciendo uso de las ecuaciones (1.62) y (1.63), se puede ver que la eficiencia promedio en el desmineralizado y ablandamiento son 94.95% y 89.03%, respectivamente.

4.5. MANUAL DE INSTRUCCIONES PARA EL FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO MODULAR

- Para realizar cualquier práctica en el equipo modular, se debe revisar la sección 3.2 y leerse la descripción del funcionamiento del equipo (sección 4.1). En esta última sección se describe detalladamente cómo se realizan las operaciones para cada uno de los procesos que se llevan a cabo en el equipo modular.
- Para calcular la eficiencia promedio en el proceso de desmineralizado, se hace uso de la ecuación (1.65), para esto se debe conocer las concentraciones de los iones, calcio, magnesio y cloro, a la entrada y salida del desmineralizador.

- Para calcular la eficiencia promedio en el proceso de ablandamiento, se hace uso de la ecuación (1.66), para esto se debe conocer las concentraciones de los iones, calcio y magnesio, a la entrada y salida del intercambiador ablandador.

4.6. HIGIENE Y SEGURIDAD INDUSTRIAL

- Al realizar las prácticas en el equipo modular, procurar estar con la vestimenta adecuada, es decir usar mandil
- Al realizar el prendido de la electrobomba, realizarlo con las manos secas y así evitar electrocutarse
- Cuando se tenga que regenerar la resina en cada intercambiador, al final de este proceso se debe dejar el tanque reservorio limpio y seco, esto con el fin de que no sea criadero de larvas y zancudos

CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE COSTO

5.1. COSTO DE DISEÑO

Cuadro N° 5.1: Costo de diseño

SERVICIO	CANTIDAD	P. UNITA (S/.)	P. TOTAL (S/.)
Dibujo del equipo	1	200	200
Consultoría y asesoramiento	-	2000	2000
TOTAL			2200

Fuente: Elaboración propia

5.2. COSTO DE CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN

Cuadro N° 5.2: Costo de construcción e instalación

SERVICIO	P. UNITA (S/.)	P. TOTAL (S/.)
Estructura metálica	200	200
Tanque reservorio	150	150
Instalación de los intercambiadores	100	100
TOTAL		450

Fuente: Elaboración propia

5.3. COSTO DE MATERIALES

Cuadro N° 5.3: Costo de materiales

ARTÍCULO	CANTIDAD	P. UNITA (S/.)	P. TOTAL (S/.)
Electrobomba	1	450	450
Varilla de aluminio	2	15	30
Tubería de 1 "	1	21	21
Tubería de 6 "	1	150	150
Tubería de 1/2 "	3	14	42
Llave termomagnética	1	55	55
Caja para llave termomagnética	1	3	3
Cable vulcanizado	3	4.5	13.5
Válvula esférica de 1/2"	23	5	115
Válvula check de 1/2"	1	35	35
Grifo PVC de 1/2"	2	5	10
Adaptador de 1/2"	51	1	51
Reducción de 1 a 1/2"	3	1.5	4.5
Codo de 90° de 1/2"	33	1	33
Te de 1/2"	21	1.5	31.5
Cruz con rosca de 1/2" y dos niples de 1/2"	-	5	5
Unión universal PVC de 1/2"	1	4	4
Adaptador de 1"	2	2	4
Codo de 90° de 1"	1	2	2
Te de 1"	1	2	2
Unión universal PVC de 1"	2	6	12
Resina catiónica de ácido fuerte	6	60	360
Resina aniónica de base fuerte	6	60	360
Resina catiónica de ciclo de sodio	6	60	360
NaOH	-	7.5	7.5
Sal	-	2.5	2.5
Cinta teflón y pegamento y total de pintura	-	60	60
Estructura metálica y tanque reservorio	-	350	350
u TOTAL			2573.5

ente: Elaboración propia

5.4. OTROS COSTOS

Cuadro N° 5.4: Otros costos

ARTÍCULO	CANTIDAD	P. UNITA (S/.)	P. TOTAL (S/.)
Copias	5	20	100
Impresiones	8	20	160
Pasajes y otros gastos	-	300	300
Gastos de ensayo y prueba	3	100	300
TOTAL			860

Fuente: Elaboración propia

5.5. COSTO TOTAL

$$C \text{ TOTAL (S.)} = 2200 + 450 + 2573.5 + 860 = 6083.5$$

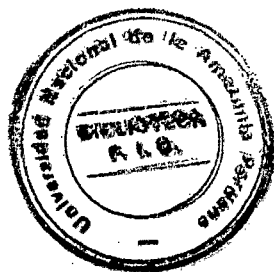
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- 1.** Se diseñó, construyó e instaló un equipo modular de intercambio iónico para el Laboratorio de Procesos y Operaciones Unitarias de la FIQ-UNAP
- 2.** Se determinó las variables más importantes de diseño y construcción del equipo modular, esto se puede ver en la sección 1.12, para los cuales se realizaron los cálculos respectivos tal como se muestra en la sección 2.2.
- 3.** Se determinó las variables más importantes en las operaciones y procesos a llevarse a cabo en el equipo modular, esto se puede ver en la sección 1.13, para los cuales se realizaron los cálculos respectivos tal como se muestra en la sección 4.2.
- 4.** Se seleccionó el tipo de resina adecuada para cada intercambiador, esto se hace mención en la sección 1.10
- 5.** Se seleccionó el material adecuado para la construcción del equipo modular, esto se puede ver detalladamente la sección 3.3.
- 6.** Se realizó un análisis de costos tal como se muestra en el capítulo 5, esto permitirá tener una idea de cuánto es la inversión para construir un equipo similar

6.2. RECOMENDACIONES

1. Antes de empezar a desarrollar la práctica en el equipo, se recomienda que se lea los aspectos que se mencionan en la sección 4.1
2. Se recomienda tener muy en cuenta los aspectos de higiene y seguridad industrial
3. Se recomienda aplicar la ecuación general de balance de materia, para el caso de otros iones como del potasio, sodio, fierro, sulfatos y nitratos
4. Se recomienda que se aplique la ecuación general de balance de energía en el proceso de regeneración, para cada uno de los intercambiadores. Esto permitirá establecer cuál debe ser el caudal de trabajo en este proceso
5. Se recomienda abordar otros desafíos con respecto al estudio del proceso de intercambio iónico, como por ejemplo el estudio cinético de las reacciones químicas de cada uno de los procesos que se llevan a cabo en el equipo modular



REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

1. **FOUST. A, WENZEL. L.** Principios de operaciones unitarias. México. Editorial Continental. (2001)
2. **TREYBAL. R.** Operaciones de transferencia de masa. Madrid. Editorial Mc Graw Hill. (2005).
3. **Unidad de Intercambio Iónico.** [en línea]. Cordoba-Argentina: Tecnología Educativa S. A.; 1996. [14 de febrero del 2010]. URL disponible en: <http://www.tecnoedu.com/Armfield/W9.php>.
4. **Ablandamiento de Agua.** [en línea]. Holanda: Water Treatment Solutions LENNTECH; 2008. [13 de noviembre del 2009]. URL disponible en: <http://www.lenntech.es/procesos/ablandamiento/preguntas-mas-frecuentes/faq-ablandamiento-agua.htm>.
5. **VOIGT. R, BORNSCHEIN.** Trabajo de tecnología farmacéutica. Zaragoza. Editorial Acribia. (2003).
6. **Lopez, V. Ramirez, S.** Alternativa de Tratamiento de Agua para caldero. [Tesis Pre-Grado]. Iquitos. Universidad Nacional de la Amazonía Peruana. 2002
7. **ARMAS. E, RABINES H.** Diseño, Construcción e Instalación de un Reactor Catiónico para el Laboratorio de Procesos y Operaciones Unitarias. [Tesis Pre-Grado]. Iquitos. Universidad Nacional de la Amazonía Peruana; 2000
8. **MOTT. R.** Mecánica de fluidos aplicada. Editorial Mc Graw Hill. (2002).
9. **GEANKOPLIS. C J.** Procesos de transporte y operaciones unitarias. México. Editorial Continental, S.A de C.V. (2001).
10. **NALCO CHEMICAL COMPANY.** Manual de tratamiento de aguas para caldero. (2003).

- 11. Jimenez Ortiz R. Reátegui Noriega E. Tanchiva Prenon F.** Diseño, Construcción E Instalación de un Equipo Modular de Adsorción para Producir Agua de Mesa. [Tesis Pre-Grado]. Iquitos. Universidad Nacional de la Amazonía Peruana. 2008.
- 12. Perry, R.H., Green, D.W.** *Manual del ingeniero químico*. Madrid. McGraw-Hill; 2001.
- 13. Intercambiador Iónico.** [en línea]. Madrid: Universidad Autónoma de Madrid; 1998. [13 de noviembre del 2009]. URL disponible en: http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/mgilarra/experimentacionIQII/Intercambiadorionico2006.pdf.
- 14. Intercambiador Iónico.** [en línea]. Madrid: Universidad Autónoma de Madrid; 1998. [13 de noviembre del 2009]. URL disponible en: http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/mgilarra/experimentacionIQII/Intercambiadorionico2006.pdf
- 15. Intercambio Iónico.** [en línea]. Madrid: Universidad Autónoma de Madrid; 1998. [2 de diciembre del 2009]. URL disponible en: http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/mgilarra/experimentacionIQII/Intercambioionico2006.pdf.
- 16. Metodología de la Investigación.** [en línea]. Honcode; 2008. [08 de julio del 2010]. URL disponible en: http://perso.wanadoo.es/aniorte_nic/apunt_metod_investigac4_5.htm#Cuasiexperimental.

BIBLIOGRAFÍA

- **Ablandamiento de Agua.** [en línea]. Holanda: Water Treatment Solutions LENNTECH; 2008. [13 de noviembre del 2009]. URL disponible en: <http://www.lenntech.es/procesos/ablandamiento/preguntas-mas-frecuentes/faq-ablandamiento-agua.htm>.
- **ARMAS. E, RABINES H.** Diseño, Construcción e Instalación de un Reactor Catiónico para el Laboratorio de Procesos y Operaciones Unitarias. [Tesis Pre-Grado]. Iquitos. Universidad Nacional de la Amazonía Peruana; 2000
- **FOUST. A, WENZEL. L.** Principios de operaciones unitarias. México. Editorial Continental. (2001)
- **GEANKOPLIS. C J.** Procesos de transporte y operaciones unitarias. México. Editorial Continental, S.A de C.V. (2001).
- **Intercambiador Iónico.** [en línea]. Madrid: Universidad Autónoma de Madrid; 1998. [13 de noviembre del 2009]. URL disponible en: http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/mgilarra/experimentacionIQII/Intercambiador_ionico2006.pdf.
- **Intercambiador Iónico.** [en línea]. Madrid: Universidad Autónoma de Madrid; 1998. [13 de noviembre del 2009]. URL disponible en: http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/mgilarra/experimentacionIQII/Intercambiador_ionico2006.pdf
- **Intercambio Iónico.** [en línea]. Madrid: Universidad Autónoma de Madrid; 1998. [2 de diciembre del 2009]. URL disponible en: http://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/mgilarra/experimentacionIQII/Intercambio_ionico2006.pdf.

- **Jimenez Ortiz R. Reátegui Noriega E. Tanchiva Prenon F.** Diseño, Construcción E Instalación de un Equipo Modular de Adsorción para Producir Agua de Mesa. [Tesis Pre-Grado]. Iquitos. Universidad Nacional de la Amazonía Peruana. 2008.
- **Lopez, V. Ramirez, S.** Alternativa de Tratamiento de Agua para caldero. [Tesis Pre-Grado]. Iquitos. Universidad Nacional de la Amazonía Peruana. 2002
- **Metodología de la Investigación.** [en línea]. Honcode; 2008. [08 de julio del 2010]. URL disponible en: http://perso.wanadoo.es/aniorte_nic/apunt_metod_investigac4_5.htm#Cuasiexperimental.
- **MOTT. R.** Mecánica de fluidos aplicada. Editorial Mc Graw Hill. (2002).
- **NALCO CHEMICAL COMPANY.** Manual de tratamiento de aguas para caldero. (2003).
- **Perry, R.H., Green, D.W.** *Manual del ingeniero químico*. Madrid. McGraw-Hill; 2001.
- **TREYBAL. R.** Operaciones de transferencia de masa. Madrid. Editorial Mc Graw Hill. (2005).
- **Unidad de Intercambio Iónico.** [en línea]. Cordoba-Argentina: Tecnología Educativa S. A.; 1996. [14 de febrero del 2010]. URL disponible en: <http://www.tecnoedu.com/Armfield/W9.php>.
- **VOIGT. R, BORNSCHEIN.** Trabajo de tecnología farmacéutica. Zaragoza. Editorial Acribia. (2003).

ANEXOS



ANEXO 1: Curva de operación de la electrobomba

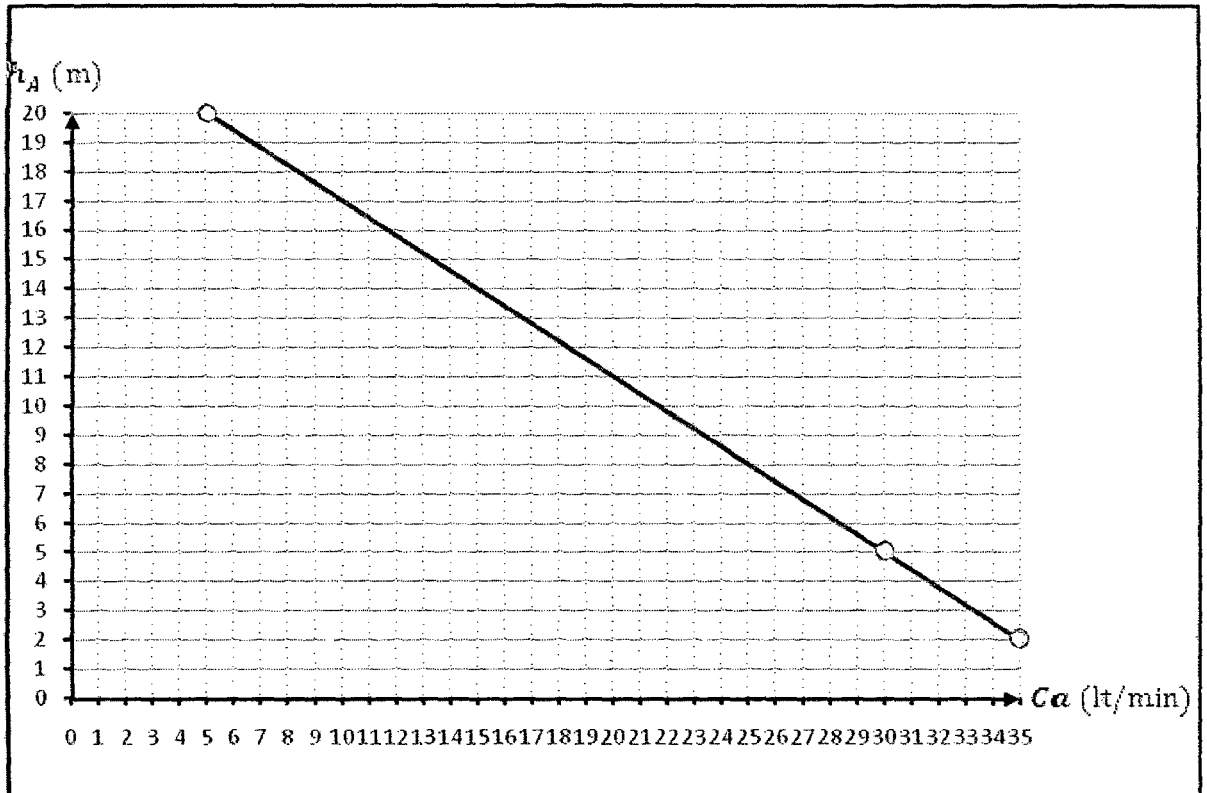


Figura A1. Curva de operación de la electrobomba

Fuente: Placa de la electrobomba

ANEXO 2: Simbología utilizada en el detalle de los componentes del equipo modular

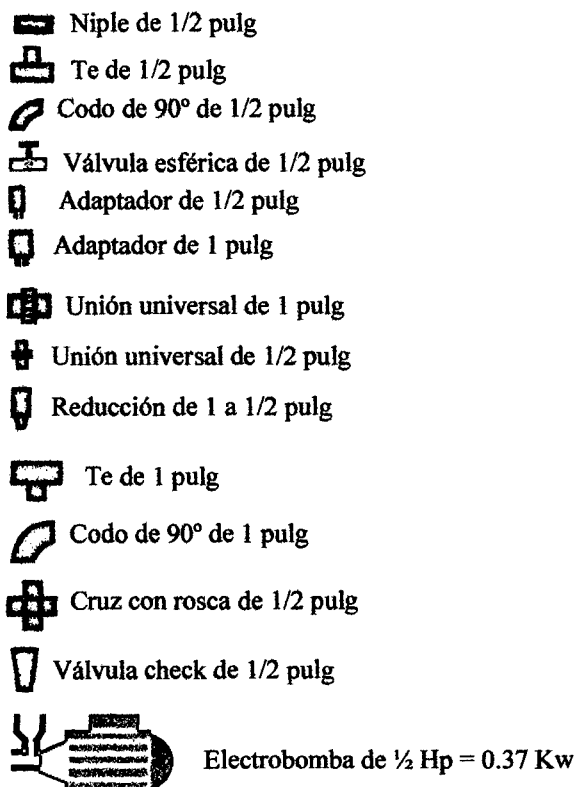


Figura A2. Simbología utilizada en el detalle de los componentes del equipo modular

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 3: Algunas propiedades fisicoquímicas de la resina en cada intercambiador proveniente del fabricante.

Resina catiónica de ácido fuerte (ICAF)

Tipo: Purolite C-100H

Divinilbenceno: 8%

Rango de pH: 0-14

Regeneración: Se utiliza soluciones de ácido sulfúrico o ácido clorhídrico

Temperatura de operación máxima: 140°C

Capacidad de Intercambio es 1,8 eq/L*min

Caudal de operación es de 1 – 5 g/min*ft³

Caudal del lavado es 6,35 – 8,375 g/min*ft²

Tiempo de lavado es de 5 – 20 min

Caudal de regeneración es de 0,2 – 0,8 g/min*ft³

Tiempo de regeneración es 30 min

Porcentaje del H₂SO₄ es de 0,5 – 5

Resina aniónica de base fuerte (IABF)

Tipo: Purolite A-400

Estructura de matriz polimérica: Poliestireno entrecruzado con divinilbenceno

Rango de pH: 0-13

Regeneración: Se utiliza soluciones de hidróxido de sodio

Capacidad de Intercambio es 1,3 eq/L*min

Caudal de operación es de 1 – 5 g/min*ft³

Caudal del lavado es 2 – 3 g/min*ft²

Tiempo de lavado es de 5 – 20 min

Caudal de regeneración es de 0,25 – 0,5 g/min*ft³

Tiempo de regeneración es 30 – 60 min

Porcentaje del NaOH es de 4 – 6

Resina catiónica ciclo de sodio (ICA)

Tipo: Lewatit S-1467

Rango de pH: 0-14

Regeneración: Se utiliza una solución de cloruro de sodio

Capacidad de Intercambio es 2 eq/L*min

Caudal de operación es de 1 - 6 g/min*ft³

Caudal del lavado es 2 - 10 g/min*ft²

Tiempo de lavado es de 30 - 50 min

Caudal de regeneración es de 5 - 20 lb/min*ft³

Tiempo de regeneración es min

Porcentaje del NaCl es de 8 - 12

ANEXO 4: Fotos de la construcción del equipo modular de intercambio iónico



Figura A.4.1.: Preparación del intercambiador



Figura A.4.2.: Uniendo las partes



Figura A.4.3.: Colocando la resina



Figura A.4.4.: Colocando la resina



Figura A.4.5.: Intercambiador iónico

ANEXO 5: Fotos del equipo modular de intercambio iónico construido y ubicado en la Planta Piloto de Alcohol

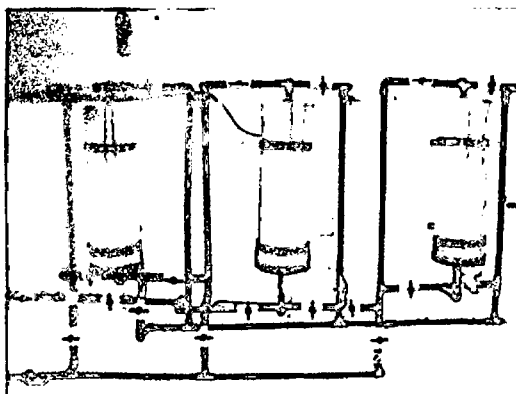


Figura A.5.1.: Equipo Modular

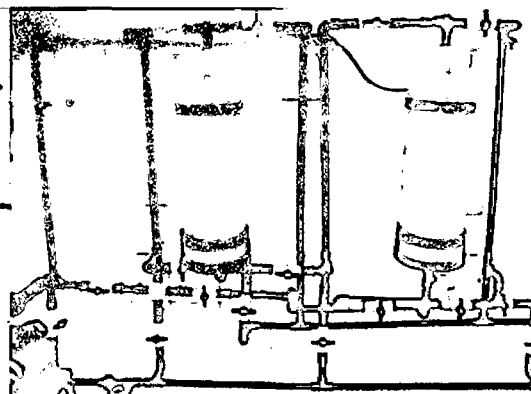


Figura A.5.2.: Intercambiador Iónico

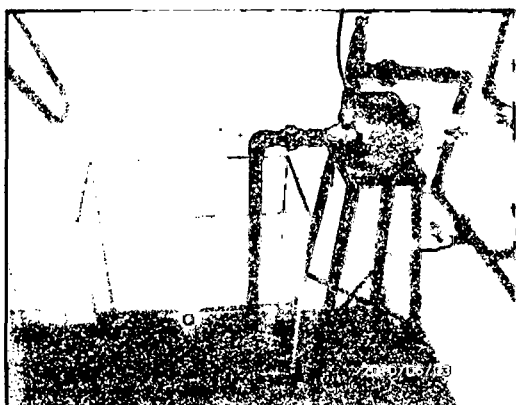


Figura A.5.3.: Línea de las Sus. Químicas

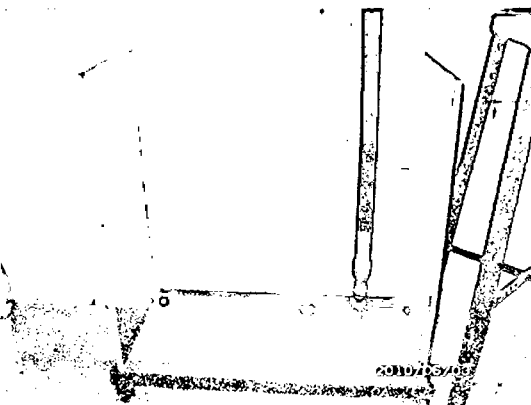


Figura A.5.4.: Tanque

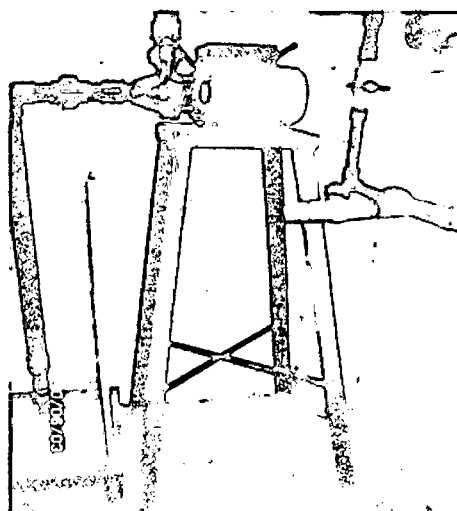


Figura A.5.5.: Electrobomba