

INTRODUCCIÓN

Todo balance de masa o de energía realizado para un sistema particular, debe tomar en consideración, previamente, el estado en el que opera dicho sistema y cuáles son las variables involucradas más importantes. Si el sistema se encuentra operando en estado no estacionario, deben establecerse claramente los parámetros que varían con el tiempo y en qué proporción, si la variación es muy pequeña en un período de tiempo considerable, el modelo puede simplificarse asumiendo que se comporta en estado estacionario.

Los balances no estacionarios macroscópicos pueden obtenerse por la integración de las ecuaciones de conservación que describen la variación de la velocidad, temperatura y concentración con respecto al tiempo y la posición en el sistema. Estas ecuaciones aplicadas son las Leyes de la conservación de la masa, energía y cantidad de movimiento, las cuales involucran la entrada y salida de masa, energía o momento a un sistema, la acumulación de las mismas y, en caso de ocurrir reacción química, la velocidad de aparición y desaparición de los reactivos y productos.

Mediante la aplicación de balances en un sistema, es posible obtener las expresiones matemáticas de la variación de una propiedad o parámetro respecto al tiempo, de manera que se hace posible predecir su comportamiento teórico. Los balances en estado no estacionario tienen gran aplicación en la resolución de problemas en la industria y en la simulación de procesos. Generalmente, se presentan estados no estacionarios en los procesos continuos, por el contrario, los procesos discontinuos puede considerarse que operan en condiciones estacionarias, de forma de simplificar los cálculos, sin embargo se debe considerar que durante el arranque y detenimiento de un proceso *batch* o por carga, ocurre la acumulación de masa o la variación de algún otro parámetro en función del tiempo. En las operaciones de transferencia de masa, es la concentración de determinada sustancia, la variable más importante respecto al tiempo.

Es evidente que el estudio de un proceso involucra directamente la aplicación de las leyes de continuidad, las cuales permiten describir el modelo y por lo tanto efectuar los cambios adecuados con los que se logre optimizar el proceso.

El objetivo de esta experiencia es estudiar en forma práctica el comportamiento de sistemas en estado no estacionario y comparar dicho comportamiento con el esperado a partir de los modelos matemáticos teóricos que los definen. Particularmente se estudiará el vaciado y llenado de tanque así como la variación de la concentración de azúcar en un sistema de tanques conectados en serie.

Para el cumplimiento satisfactorio del objetivo general se determinara la variación de la altura del líquido en función del tiempo para el llenado y vaciado de un tanque, en forma experimental, teórica con fricción y teórica sin fricción, así como la variación de la velocidad de descarga experimental y teórica en función de la altura del nivel de líquido en el tanque, y la variación de la concentración de azúcar en los tanques (2 y 3) en función del tiempo.

Para ello se dispone de un equipo constituido por tres tanques cilíndricos, abiertos a la atmósfera; dos de ellos colocados en serie, un rotámetro y una bomba centrífuga. La experiencia se divide en tres etapas: en la primera etapa, se determina el tiempo de vaciado de uno de los tanques desde una altura máxima a una altura mínima, previamente establecida. Este luego se divide en 17 partes iguales, con los cuales se mide la variación de altura del fluido, desde el nivel inicial hasta el final, para cada fracción de tiempo calculada. La segunda parte de la experiencia, corresponde al llenado de un tanque, en el cual se determina la variación de altura del tanque con respecto al tiempo. Para ello, a partir de los datos obtenidos en la primera etapa se calcula el flujo de entrada del tanque superior (T2), de manera de alcanzar las condiciones estacionarias, adicionalmente se calcula la fracción de tiempo (se divide este en 17 partes iguales) teórico para determinar la variación del nivel de líquido en el tanque (T2). Para realizar la última parte de la experiencia, debe calcularse el tiempo para el cual el sistema alcanza condiciones estacionarias de concentración, este es fraccionado en 15 partes. Se añaden 2Kg de

azúcar al tanque superior (T2) y se determina la concentración de los dos tanques de estudio (T2 y T3) para cada fracción de tiempo calculado, para ello se toman muestras de las soluciones y se analizan con un refractómetro de Abbe.

Esta experiencia es de gran importancia ya que el Ingeniero Químico debe someter a estudio sistemas cuyas condiciones varían con el tiempo, por lo tanto es fundamental la comprensión de las variables y procesos involucrados para que estos sistemas alcancen condiciones estacionarias.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación se presentan los análisis de las tablas y gráficas correspondientes a los resultados obtenidos en la experiencia realizada:

✓ Vaciado de tanques

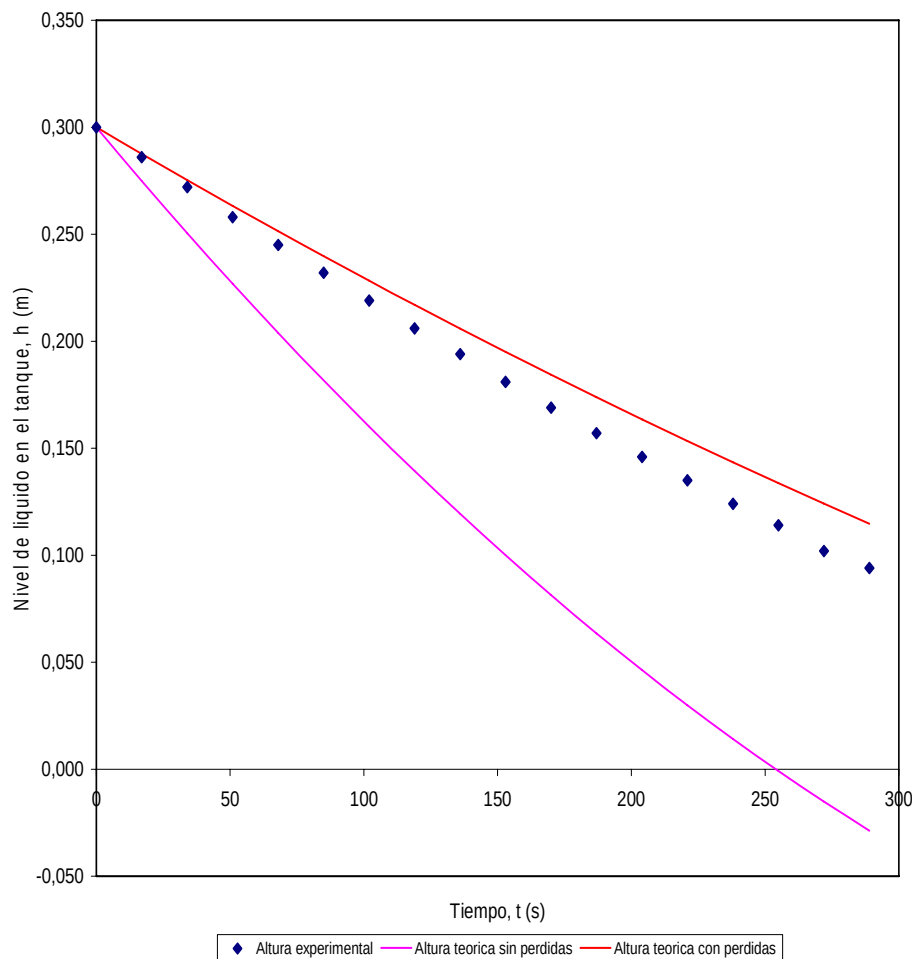
En la tabla N° 1, se comparan los valores experimentales y teóricos de la variación del nivel de líquido en el tanque (T2) en función del tiempo de vaciado.

Tabla N° 1: Variación del nivel de líquido en el tanque 2 en función del tiempo de vaciado

Tiempo de vaciado, t_v (s)	Nivel del líquido en el tanque 2 experimental h_e (m)	Nivel del líquido en el tanque 2 teórico con fricción, h_{tc} (m)	Nivel del líquido en el tanque 2 teórico sin fricción, h_{ts} (m)	Desviación con fricción, D_c (%)	Desviación sin fricción, D_s (%)
0	0,30	0,30	0,30	0,00	0,00
17	0,29	0,29	0,27	0,54	4,04
34	0,27	0,28	0,25	1,21	8,58
51	0,26	0,26	0,23	2,00	13,73
68	0,25	0,25	0,20	2,55	20,15
85	0,23	0,24	0,18	3,23	27,69
102	0,22	0,23	0,16	4,06	36,72
119	0,21	0,22	0,14	5,06	47,77
136	0,19	0,21	0,12	5,77	62,56
153	0,18	0,19	0,10	7,18	81,00
170	0,17	0,18	0,08	8,30	---
187	0,16	0,17	0,06	9,66	---
204	0,15	0,16	0,05	10,68	---
221	0,14	0,15	0,03	11,96	---
238	0,12	0,14	0,01	13,53	---
255	0,11	0,13	0,00	14,70	---
272	0,10	0,12	-0,02	17,82	---
289	0,09	0,11	-0,03	18,06	---

En la tabla N° 1, se aprecia que los valores experimentales se asemejan a los valores teóricos tomando en cuenta las pérdidas por fricción, llegándose a alcanzar la máxima desviación de 18,06%, caso contrario se observa en los valores obtenidos teóricamente sin tomar en cuenta dichas pérdidas, debido a que se obtienen desviaciones mayores al 100% en el intervalo de tiempo de [170,289] s. Además es de notar que se obtuvieron alturas teóricas negativas, debido que para un tiempo superior a 255 s, el tanque se a vaciado completamente.

Para ilustrar los datos obtenidos en la tabla N° 1, se muestra la siguiente gráfica de la variación del nivel de líquido en el tanque (T2) en función del tiempo de descarga:



Gráfica N° 1: Variación del nivel de líquido en el tanque 2 con respecto al tiempo de vaciado

En la gráfica N° 1 puede observarse la variación del nivel del líquido con respecto al tiempo cuando el tanque superior (T2) es vaciado. Se observa que las curvas tienen la misma tendencia, es decir, el nivel de líquido en el tanque disminuye a medida que transcurre el tiempo.

Comparando ambas curvas teóricas se hace evidente que para que el fluido alcance una misma altura requiere mayor tiempo cuando se consideran las pérdidas por fricción. Esto se debe a que los accesorios y tuberías provocan la disminución de la energía del flujo y por lo tanto le restan velocidad, en cambio cuando no se consideran pérdidas, se está asumiendo que el sistema es ideal y por lo tanto no hay pérdidas de energía. Nótese la similitud de las curvas de los resultados experimentales y teóricos considerando pérdidas, esta semejanza es debido a que el sistema en estudio posee accesorios que provocan pérdidas de energía.

En el gráfico se observan dos peculiaridades, la primera corresponde a que la curva que representa la altura teórica considerando las pérdidas esta por encima de la teórica sin pérdidas esto es como consecuencia a que la primera toma en cuenta las condiciones mas desfavorables del sistema que es la debida a las pérdidas ocasionadas por los diversos accesorios mientras que la última se asocia a un proceso ideal. La segunda peculiaridad es que la curva de los resultados teóricos sin pérdidas adquiere con el tiempo resultados negativos. Esto es un hecho curioso, pues se sabe que cuando la altura es cero el tanque se vacía completamente, no obstante los valores negativos no tienen significado real y pueden ser adjudicados a que para una cantidad de fluido que circula, el tiempo de vaciado sin considerar las pérdidas es mucho menor al del caso real y que por lo tanto el tanque teóricamente ya se ha vaciado cuando no se consideran las pérdidas, para tiempos en los que sigue ocurriendo el vaciado realmente.

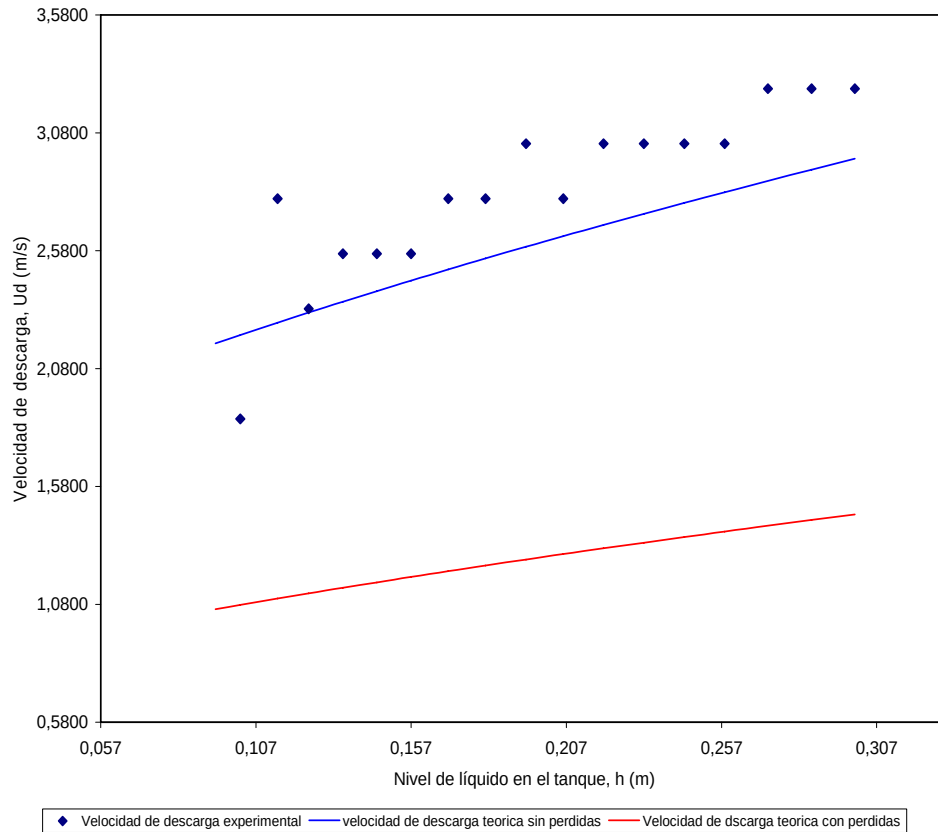
En la tabla N° 2, se comparan la valores experimentales y teóricos de la variación de la velocidad de descarga en el tanque (T2) en función del tiempo de vaciado.

Tabla N° 2: Variación de la velocidad de descarga en el tanque 2 en función del tiempo de vaciado

Tiempo de vaciado, t_v (s)	Velocidad de descarga experimental U_{de} (m/s)	Velocidad de descarga teórica con fricción, U_{dc} (m/s)	Velocidad de descarga teórica sin fricción, U_{ds} (m/s)	Desviación con fricción, D_c (%)	Desviación sin fricción, D_s (%)
0	0,00	1,46	2,97	100,00	100,00
17	3,27	1,44	2,92	---	11,77
34	3,27	1,41	2,88	---	13,60
51	3,27	1,39	2,83	---	15,54
68	3,03	1,37	2,78	---	9,04
85	3,03	1,34	2,74	---	10,88
102	3,03	1,32	2,69	---	12,81
119	3,03	1,29	2,64	---	14,85
136	2,80	1,27	2,60	---	7,85
153	3,03	1,24	2,55	---	19,11
170	2,80	1,22	2,50	---	12,00
187	2,80	1,20	2,45	---	14,17
204	2,57	1,17	2,41	---	6,58
221	2,57	1,15	2,36	---	8,62
238	2,57	1,13	2,32	---	10,78
255	2,33	1,10	2,27	---	2,59
272	2,80	1,08	2,22	---	26,01
289	1,87	1,06	2,19	76,23	14,63

En la tabla N° 2 se observa que los valores de velocidad de descarga obtenidos de forma experimental difieren muy poco de los valores teóricos sin considerar las pérdidas, esto se evidencia debido a que el valor de desviación mas alto obtenido fue de 26%, sucede lo contrario al considerar las pérdidas debido a que se obtienen desviaciones en general mayores del 100 % excepto para el último tiempo en el que fue de un 76%. Cabe destacar que para un tiempo 0 s como no existe aún la descarga la desviación resulta del 100% en ambos casos.

A continuación se muestra la gráfica N° 2, en la que se aprecia la variación de la velocidad de descarga en función del tiempo:



Gráfica N° 2: Variación de la velocidad de descarga con respecto al nivel de líquido en el tanque

La gráfica N° 2 ilustra la variación de la velocidad de descarga en función de el nivel de fluido en el tanque. Se observa que la curva de resultados experimentales se encuentra por encima de las curvas obtenidas por los datos teóricos, además estas curvas tienen una tendencia creciente, lo que indica que a medida que disminuye el nivel del líquido en el tanque la velocidad de descarga decrece. Comparando las curvas obtenidas teóricamente, se puede observar que se alcanzan las mayores velocidades cuando no se consideran las pérdidas, pues este caso es ideal, es decir, no se considera la resistencia ofrecida por los accesorios al fluido, caso contrario sucede cuando se consideran las pérdidas en el sistema, pues se observa que se obtiene las velocidades más bajas, debido que los accesorios generan resistencia al fluido, restando así velocidad.

En la tabla N° 3, se comparan la valores experimentales y teóricos de los tiempos de descarga correspondientes al tanque 2 tomando en cuenta o despreciando las pérdidas por fricción.

TABLA N° 3: Tiempos de descarga experimental y teórico (con y sin fricción)

Tiempo experimental de descarga, t_v (s)	Tiempo teórico de descarga sin pérdidas, t_{Vs} (s)	Tiempo teórico de descarga con pérdidas, t_{Vc} (s)	Desviación sin pérdidas, D_{Vs} (%)	Desviación con pérdidas, D_{Vc} (%)
289,00	316,98	646,96	8,83	55,33

En la tabla N° 3, se comparan los tiempos de descarga experimentales y teóricos del fluido con y sin considerar las pérdidas por fricción. También se reportan los porcentajes de desviación experimentales con respecto a los tiempos teóricos.

Se observa que el tiempo experimental es más cercano al tiempo teórico sin considerar las perdidas, esto se evidencia debido a que se obtuvo una desviación del 8,83%; resultado ilógico, pues el valor obtenido experimentalmente debería acercarse al valor obtenido considerando las pérdidas, sin embargo esto puede atribuirse a los posibles errores aleatorios y/o sistemáticos personales e instrumentales involucrados, aunado a esto se aprecia que el tiempo teórico de descarga con pérdidas es mayor que el que no considera las mismas, lo cual resulta razonable debido a que existe pérdida de energía por parte del fluido y por ende el tiempo de descarga es mayor.

✓ Llenado de tanques

En la tabla N° 4, se compara el nivel del líquido en el tanque 2 obtenido en forma experimental con el teórico considerando y despreciando las pérdidas por fricción.

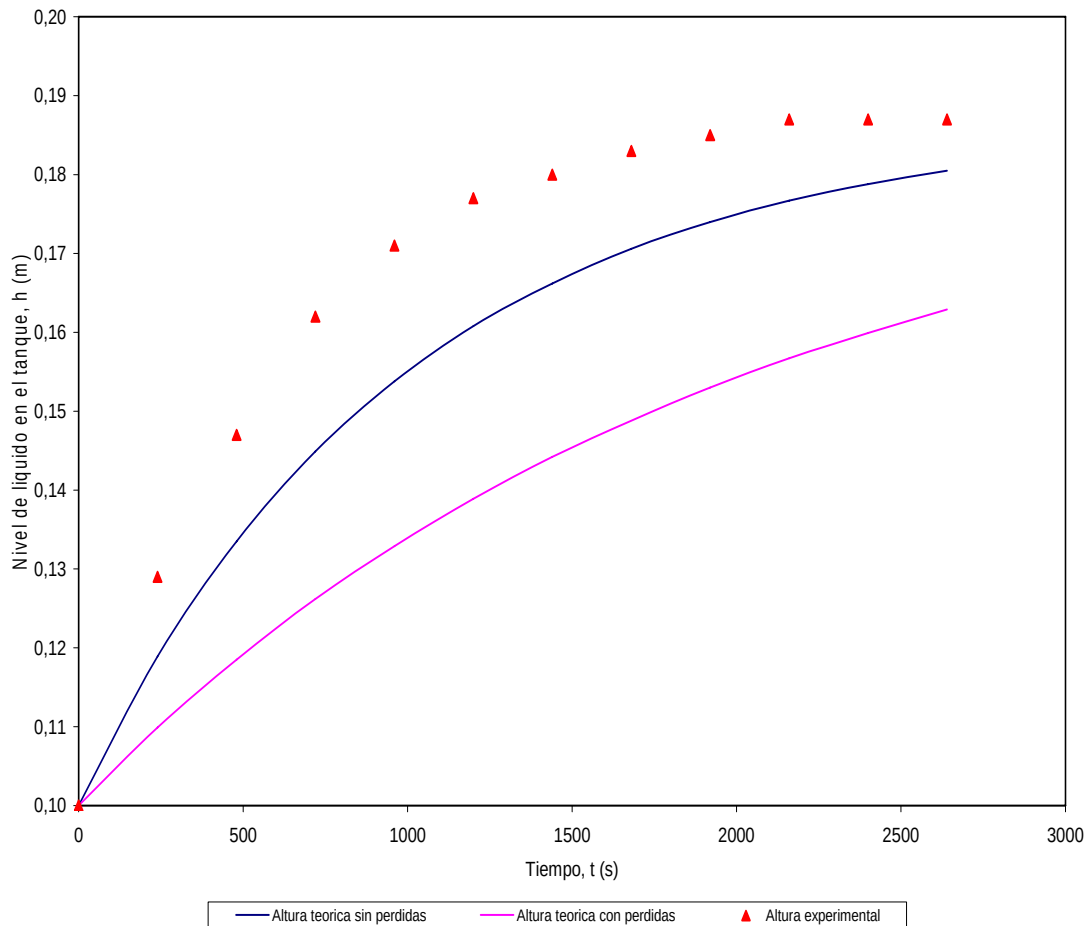
Tabla N° 4: Variación del nivel del líquido en el tanque 2 en función del tiempo de llenado

Tiempo de llenado, t_{ll} (s)	Nivel del líquido en el tanque 2 experimental h_e (m)	Nivel del líquido en el tanque 2 teórico con fricción, h_{tc} (m)	Nivel del líquido en el tanque 2 teórico sin fricción, h_{ts} (m)	Desviación con fricción, D_c (%)	Desviación sin fricción, D_s (%)
0	0,100	0,100	0,100	0,00	0,00
240	0,129	0,110	0,119	8,86	8,49
480	0,147	0,119	0,134	16,48	10,11
720	0,162	0,126	0,145	21,90	11,80
960	0,171	0,133	0,154	23,11	11,18
1200	0,177	0,139	0,161	22,75	10,07
1440	0,180	0,144	0,166	20,97	8,30
1680	0,183	0,149	0,171	19,61	7,27
1920	0,185	0,153	0,174	18,06	6,32
2160	0,187	0,157	0,177	16,95	5,83
2400	0,187	0,160	0,179	14,79	4,59
2640	0,187	0,163	0,181	14,79	3,60

En la tabla N° 4 se aprecia que el nivel del líquido obtenido experimentalmente en el tanque 2 comparándolo con los valores obtenidos teóricamente con y sin fricción, son parecidos razón, por lo que las desviaciones obtenidas son pequeñas, siendo las más elevadas las correspondientes a 23,11% y 11,80%, tomando y no en cuenta las pérdidas por fricción, respectivamente.

Se puede observar que el nivel de líquido alcanzado despreciando las pérdidas resulta ser mayor que al considerarlas, lo cual resulta ilógico, pues debido que las pérdidas de energía por parte del fluido influye en la velocidad de descarga (asiéndola menor que sin considerando pérdidas), esto hace que el nivel de líquido alcanzado en el tanque considerando las pérdidas sea mayor para un mismo instante de tiempo.

En la siguiente gráfica se ilustra el comportamiento de la altura de líquido alcanzado en el proceso de llenado al transcurrir el tiempo.



Gráfica N° 3: Variación del nivel de líquido en el tanque 2 con respecto al tiempo de llenado

En la gráfica N° 3 se ilustra como varia el nivel de líquido en el tanque en función del tiempo, en donde las tres curvas presentan la misma tendencia creciente, existiendo un aumento brusco en el intervalo de tiempo $[0,1200]$ s y tendiendo a ser constante a partir del 1200 s transcurridos, es decir, que a medida que transcurre el tiempo el nivel del líquido aumenta, siendo la curva experimental donde se aprecia claramente el tiempo en que se llega a las condiciones estacionarias, además se aprecia que esta curva se encuentra por encima de las curvas obtenidas teóricamente, esto se debe

a que los datos experimentales involucren las pérdidas por fricción reales generadas en el sistema lo que hace que las altura obtenidas sean superiores.

En la tabla N° 5, se compara el tiempo experimental con los tiempos teóricos de llenado considerando y despreciando las pérdidas por fricción

TABLA N° 5: Tiempos de llenado experimental y teórico (con y sin fricción)

Tiempo experimental de llenado, t_{ll} (s)	Tiempo teórico de llenado sin pérdidas, t_{lls} (s)	Tiempo teórico de llenado con pérdidas, t_{llc} (s)	Desviación sin pérdidas, D_{lls} (%)	Desviación con pérdidas, D_{llc} (%)
2640	5149,2	5010,2	49	47

En la tabla N° 5 se observa que el tiempo experimental en relación al teórico con pérdidas presentó una desviación del 47%, el cual es menor que el obtenido sin considerar las pérdidas, resultando ser de 49%, lo que evidencia que el sistema no se comporta idealmente. Se aprecia que el tiempo teórico prácticamente es el doble que el tiempo experimental, debido que se requiere menor lapso para alcanzar las condiciones estacionarias.

En cuanto a los tiempos teóricos de llenado tomando en cuenta las pérdidas se observa un valor menor que cuando se despreciaban, lo cual no es correcto, ya que este último debería ser mas bajo, debido que no influyen las pérdidas de energía generadas por la fricción los diversos accesorios.

✓ Variación de la concentración de dos tanques conectados en serie

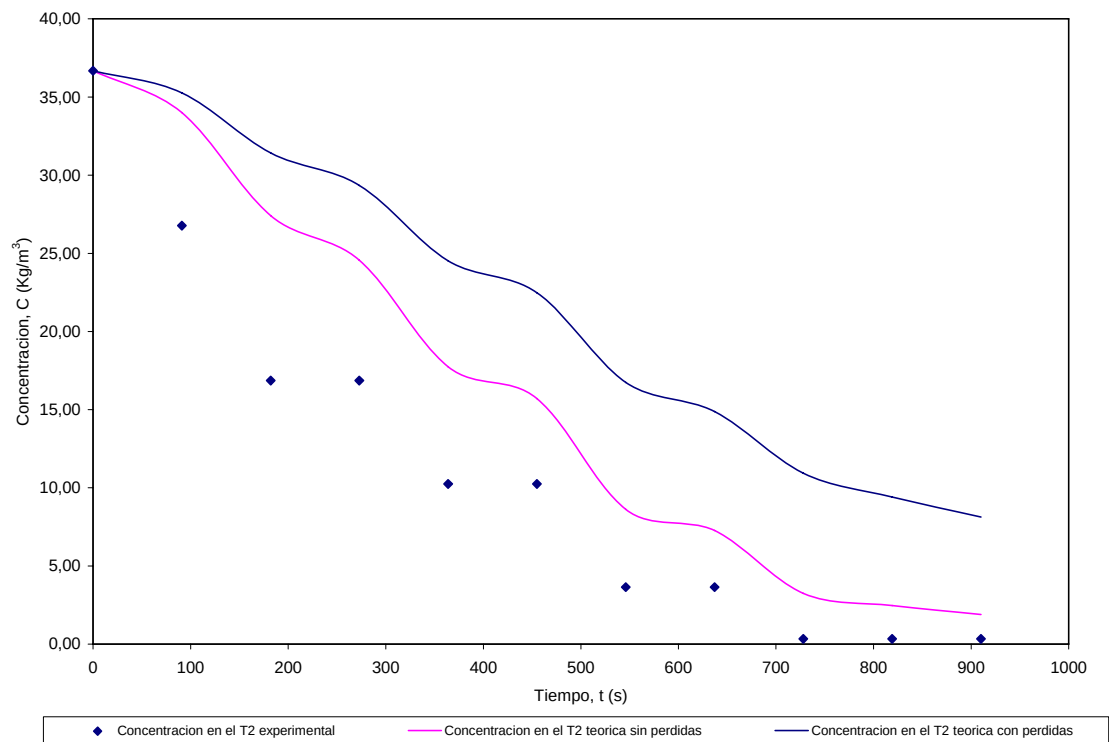
En la tabla N° 6, se compara la variación de la concentración de azúcar en el tanque 2 obtenidas de forma experimental con las teóricas con y sin fricción.

TABLA N° 6: Variación de la concentración en el tanque 2 con respecto al tiempo

Tiempo, t (s)	Concentración en el tanque 2 experimental C_e (Kg/m ³)	Concentración en el tanque 2 teórico con fricción, C_{tc} (Kg/m ³)	Concentración en el tanque 2 teórico sin fricción, C_{ts} (Kg/m ³)	Desviación con fricción, D_c (%)	Desviación sin fricción, D_s (%)
0	36,68	36,68	36,68	0,00	0,00
91	26,77	35,27	34,00	24,10	21,27
182	16,85	31,42	27,41	46,37	38,51
273	16,85	29,34	24,55	42,56	31,36
364	10,24	24,52	17,74	58,22	42,24
455	10,24	22,48	15,71	54,43	34,79
546	3,63	16,75	8,62	78,29	57,83
637	3,63	14,87	7,27	75,56	50,02
728	0,33	10,93	3,25	96,98	89,84
819	0,33	9,41	2,46	96,49	86,58
910	0,33	8,12	1,88	95,93	82,48

En la tabla N° 6 se observa que la concentración experimental con respecto a los teóricos con fricción presenta una mayor desviación (0-96,98) % en comparación con los que desprecian la fricción (0-89,84) %, a su vez se aprecia que en las concentraciones teóricas tomando en cuenta las pérdidas por fricción presenta una concentración de azúcar mayor en comparación con la que la desprecia las pérdidas, para un mismo instante de tiempo.

En la siguiente gráfica se aprecia el comportamiento de la variación de la concentración de azúcar en el tanque superior (T2) con respecto al tiempo.



Gráfica N° 4: Variación de la concentración de azúcar en el tanque 2 con respecto al tiempo

La grafica N° 4 muestra como varia la concentración en el tanque 2 a medida que transcurre el tiempo, en donde se observa que las curvas muestran una tendencia a decrecer, lo que significa que la concentración de azúcar disminuye a medida que transcurre el tiempo.

La curva teórica sin considerar las pérdidas presenta una menor concentración en comparación con la que toma en cuenta a estas, en un mismo instante de tiempo, esto se debe a que la velocidad de descarga en el tanque tomando en cuenta las pérdidas es menor que despreciándolas, lo que hace que el tiempo de permanencia del azúcar en el tanque sea mayor. En cuanto a la curva experimental esta se asemeja a la curva teórica sin pérdidas, lo cual no corresponde a lo esperado ya que debería tener valores cercanos a la curva teórica que considera las pérdidas.

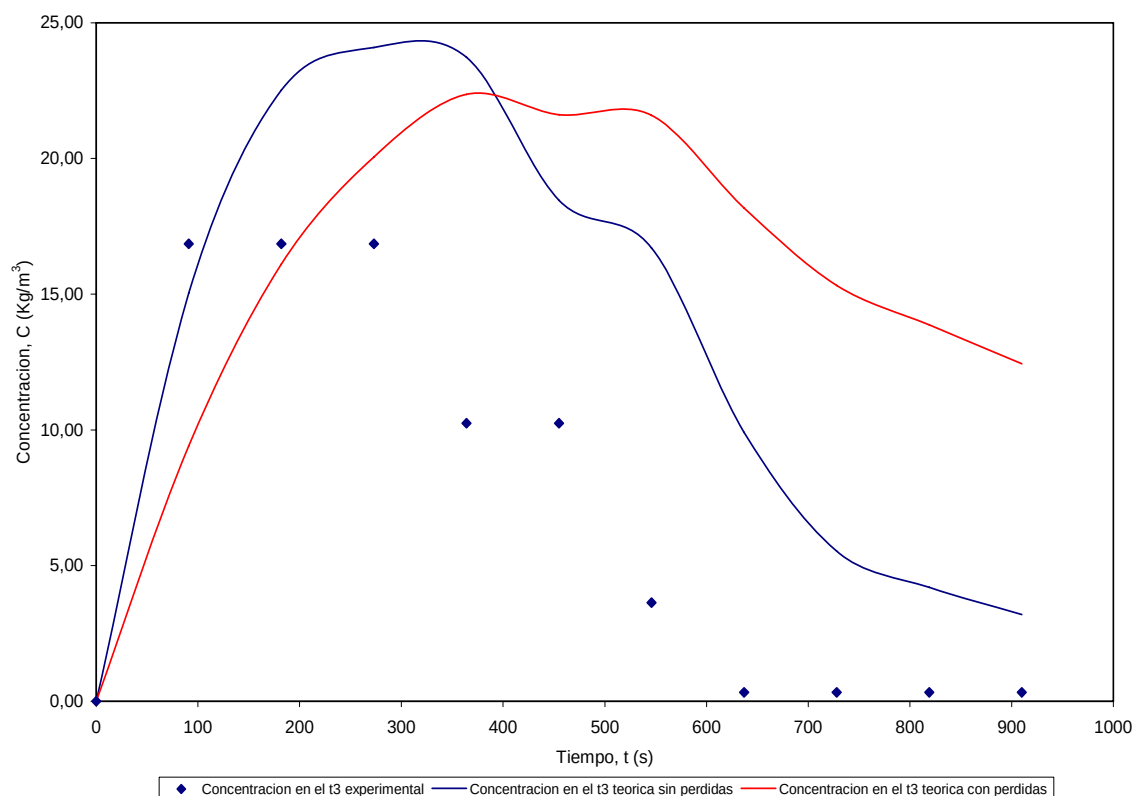
En la tabla N° 7, se compara la variación de la concentración de azúcar en el tanque 3 obtenidas de forma experimental con las teóricas con y sin fricción.

TABLA N° 7: Variación de la concentración en el tanque 3 con respecto al tiempo

Tiempo, t (s)	Concentración en el tanque 3 experimental C_e (Kg/m ³)	Concentración en el tanque 3 teórico con fricción, C_{tc} (Kg/m ³)	Concentración en el tanque 3 teórico sin fricción, C_{ts} (Kg/m ³)	Desviación con fricción, D_c (%)	Desviación sin fricción, D_s (%)
0	0,00	0	0	0,00	0
91	16,85	9,41	15,04	79,02	12,03
182	16,85	16,11	22,52	4,64	25,16
273	16,85	20,05	24,09	15,96	30,04
364	10,24	22,37	23,73	54,20	56,83
455	10,24	21,61	18,46	52,60	44,50
546	3,63	21,59	16,70	83,17	78,24
637	0,33	18,18	9,91	98,18	96,67
728	0,33	15,32	5,53	97,84	94,03
819	0,33	13,87	4,20	97,62	92,14
910	0,33	12,44	3,19	97,35	89,65

En la tabla N° 7 se observa que la concentración experimental con respecto a los teóricos con fricción presenta una mayor desviación (0-98,18)% en comparación con los que desprecian la fricción (0-96,67)%, a su vez se aprecia que las concentraciones teóricas en la que toma en cuenta las pérdidas por fricción aumentan bruscamente a medida que transcurre el tiempo hasta que llega a un máximo en 455 s, y a partir de este comienza a disminuir, del mismo modo sucede con la concentración teórica que desprecia las pérdidas y los datos obtenidos experimentalmente.

En la siguiente gráfica se aprecia la variación de la concentración de azúcar en el tanque 3 en función del tiempo.



Gráfica N° 5: Variación de la concentración de azúcar en el tanque 3 con respecto al tiempo

La grafica N° 5 ilustra como varia la concentración del tanque 3 en función del tiempo a medida que se agrega la solución de azúcar. La tendencia de las curvas muestra que cuando la solución de azúcar comienza a ser añadida la concentración del tanque aumenta hasta un punto en el que disminuye ligeramente y se estabiliza. Este comportamiento es lógico y se debe a que inicialmente el tanque 2 le suministra al tanque 3 (el cual no tenía azúcar) la solución de alta concentración, esto causa el aumento abrupto de la concentración en el tanque 3. A medida que transcurre el tiempo en el tanque 2 se diluye la azúcar y por lo tanto al tanque 3 le llega solución menos concentrada, esto produce la leve disminución de la concentración de este tanque hasta el punto en que se estabiliza y llega a las condiciones estacionarias. Cabe destacar que las desviaciones obtenidas en los cálculos de concentración, muy probablemente se deban a errores aleatorios y sistemáticos instrumentales, particularmente debidos al refractómetro de Abbe.

En la siguiente tabla, se compara el tiempo experimental con los tiempos teóricos considerando y despreciando las pérdidas por fricción en el que se alcanzan las condiciones estacionarias.

TABLA N° 8: Tiempos experimental y teórico (con y sin fricción) en que se alcanzan las condiciones estacionarias

Tiempo experimental, t (s)	Tiempo teórico sin pérdidas, t_s (s)	Tiempo teórico con pérdidas, t_c (s)	Desviación sin pérdidas, D_s (%)	Desviación con pérdidas, D_c (%)
910	1443	2953	37	69

En la tabla N° 8 se aprecia que el valor de tiempo experimental es menor a los calculados teóricamente, esto se debe a que se requiere de menos tiempo para alcanzar las condiciones estacionarias en el sistema, además este tiempo se acerca más al tiempo teórico calculado sin considerar las pérdidas por fricción, no significa esto que el sistema se comporte de manera de ideal, pues como se sabe este posee accesorios que generan pérdidas de energía.

CONCLUSIONES

Una vez expuestos los resultados obtenidos y hecho los análisis pertinentes, es posible llegar a las siguientes conclusiones:

1. Se requiere más tiempo para el vaciado de un tanque cuando se consideran las pérdidas por fricción. En cambio el tiempo es menor para el caso ideal, en el que no se incluyen pérdidas.
2. La velocidad de descarga se ve reducida debido a los accesorios presentes en el sistema, pues estos ofrecen resistencia al movimiento y por lo tanto el fluido circulante pierde energía.
3. No existen los casos ideales en los que no ocurre ningún tipo de pérdida debida a la fricción, estos casos se alejan de la realidad y sólo son de utilidad como primera aproximación en algunos cálculos matemáticos.
4. Las pérdidas por fricción influyen directamente en el tiempo en el que un sistema alcanza condiciones estacionarias.
5. Es posible alcanzar condiciones estacionarias en un tanque o sistema similar en el se lleve a cabo un llenado y vaciado simultaneo, esta condición se alcanzará cuando el caudal de entrada al tanque sea igual al de descarga y por lo tanto el nivel de fluido permanezca constante.
6. La concentración de una solución, contenida en un tanque con una salida de solución y entrada de agua, disminuye con el tiempo por efectos de dilución.
7. La concentración del tanque inferior de la experiencia aumenta cuando se añade solución concentrada, luego disminuye al alcanzar el sistema condiciones estacionarias, y por último permanece constante.

RECOMENDACIONES

A continuación se presentan algunas recomendaciones con las que se espera lograr un mejor desarrollo de la práctica así como la obtención de resultados más satisfactorios:

1. Realizar el mantenimiento pertinente a todo el sistema y equipos involucrados en la experiencia. Particularmente limpiar el sistema de tanques y tuberías con la finalidad de remover las posibles incrustaciones que se hayan podido formar en dicho sistema.
2. Hacer una evaluación del sistema y realizar aquellas modificaciones que permitan alcanzar realmente condiciones estacionarias durante la experiencia y por lo tanto obtener resultados más satisfactorios.
3. Modificar las cintas métricas e indicadores de nivel de fluido en los tanques, de manera de facilitar las lecturas.
4. Proveer al laboratorio de más recipientes para tomar muestras de solución, de esta forma se evitan mediciones apresuradas que pueden traer como consecuencia errores en los resultados y adicionalmente se evita desorden.
5. Evaluar el refractómetro de Abbe con la finalidad de calibrarlo o reemplazarlo según sea necesario.
6. Reemplazar los cucharones de madera utilizados para agitar la solución de los tanques, estos se encuentran quebrados y no son adecuados.

BIBLIOGRAFÍA

- GUZMÁN, Nólides. “Guía de la Cátedra de Mecánica de Fluidos”. Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, UCV. Caracas, 1999.
- PERRY, Robert y Don Green. “Perry’s Chemical Engineers’ Handbook”, 7° edición, versión en CD. McGraw-Hill. USA, 1999.
- MOTT, Robert. “Mecánica de Fluidos Aplicada”, 1° edición en español de la 4° edición en inglés. Prentice - Hall Hispanoamericana, SA. México, 1996. 580pp.
- STREETER, Victor *et al.* “Mecánica de Fluidos”, 9° edición. Mc Graw - Hill. Colombia, 2000. 740pp.

APÉNDICE

CÁLCULOS TIPOS

A continuación se presentan los cálculos realizados para obtener los resultados que permitieron llevar a cabo la totalidad de los objetivos planteados:

1. Longitud equivalente total del sistema en serie [MOTT, 1996]:

$$\left(\frac{L}{D}\right)_T = \left(\frac{L}{D}\right)_{Red1} + \left(\frac{L}{D}\right)_{Codo1/2} + \left(\frac{L}{D}\right)_{Red2} + \left(\frac{L}{D}\right)_{Niple1} + \left(\frac{L}{D}\right)_{Valv} + \left(\frac{L}{D}\right)_{Niple2} \quad \textbf{(I)}$$

donde:

$\left(\frac{L}{D}\right)_{Red1}$: Longitud equivalente para una reducción de ¾ a ½ (adim).

$\left(\frac{L}{D}\right)_{Codo1/2}$: Longitud equivalente para un codo roscado de ½ (adim).

$\left(\frac{L}{D}\right)_{Red2}$: Longitud equivalente para una reducción de ½ a 3/8 (adim).

$\left(\frac{L}{D}\right)_{Niple1}$: Longitud equivalente para un niple roscado de 3/8 (adim).

$\left(\frac{L}{D}\right)_{Valv}$: Longitud equivalente para una válvula de compuerta de 3/8 (adim).

$\left(\frac{L}{D}\right)_{Niple2}$: Longitud equivalente niple roscado de 3/8 (adim).

$$\left(\frac{L}{D}\right)_T = 5,82 + 25 + 3,4 + 1,57 + 45 + 2,94$$

$$\left(\frac{L}{D}\right)_T = 83,77$$

CÁLCULOS PARA EL VACIADO DEL TANQUE

Se realiza una iteración para la velocidad teórica de descarga del tanque, suponiendo una velocidad, se determina el número de Reynolds, dependiendo del flujo se calcula el factor de Darcy y, sustituyendo en la ecuación (IV) se determina la velocidad. Esto debe realizarse hasta que el valor supuesto sea igual al calculado.

2. Número de Reynolds [MOTT, 1996]:

$$Re = \frac{V_{sup} \cdot \rho \cdot D}{\mu} \quad (II)$$

Donde:

ρ : Densidad del fluido (Kg/m³).

μ : Viscosidad del fluido (Kg/m.s).

Re: Número de Reynolds (adimensional).

D: Diámetro (m).

Vsup: Velocidad supuesta (m/s).

$$Re = \frac{1,44 \text{ m/s} \cdot 1050 \text{ Kg / m}^3 \cdot 0,0077 \text{ m}}{8,90 \times 10^{-4} \text{ Kg / m.s}} = 12987$$

3. Factor de Darcy [STREETER, 2000]:

Como el $Re > 2100$ Régimen turbulento:

$$\frac{1}{\sqrt{f_d}} = -2 \cdot \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3,71} - \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{f_d}} \right) \quad (III)$$

Donde:

ε/D : Aspereza relativa (adim).

f_d : Factor de Darcy (adim).

$$\frac{1}{\sqrt{f_d}} = -2 \cdot \log \left(\frac{0,00594}{3.71} - \frac{2.51}{12987 \cdot \sqrt{f_d}} \right) \Rightarrow f_d = 0,037$$

4. Velocidad de descarga teórica del tanque T₂ (Con pérdidas por fricción)
[MOTT, 1996]: (Los cálculos están referidos al tiempo 17s, ver tabla N° 2)

$$U_{dc} = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot (h + \Delta z)}{1 + f_d \left(\frac{L}{D} \right)_T}} \quad \text{(IV)}$$

Donde:

V_{teo}: Velocidad de descarga teórica del T₂ con pérdidas (m/s).

h: Alturas experimentales de vaciado (m).

$$U_{dc} = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot (0,286 + 0,15) \text{ m}}{1 + 0,037 \cdot 83,77}} = 1,44 \text{ m/s}$$

5. Velocidad de descarga teórica del tanque T₂, (sin pérdidas por fricción)
[MOTT, 1996]:

$$U_{ds} = \sqrt{2 \cdot g \cdot (h + \Delta z)} \quad \text{(V)}$$

Donde:

V_{ds}: Velocidad de descarga teórica del T₂, sin pérdidas (m/s).

$$U_{ds} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot (0,286 + 0,15) \text{ m}} = 2,92 \text{ m/s}$$

6. Altura del tanque T2 en función del tiempo de vaciado (con pérdidas por fricción):

$$t = \frac{A}{a \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g}{1 + f_d \cdot \left(\frac{L}{D}\right)}}} \cdot \left[\sqrt{h_{ini} + \Delta Z} - \sqrt{h_{final} + \Delta Z} \right] \quad \text{(VI)}$$

Donde:

h: Altura de T₂, con perdidas (m).

h_{ini}: Altura máxima o inicial del T₂ (m).

h_{exp}: Altura experimental (m).

$$17s = \frac{0,185m^2}{4,65 \cdot 10^{-5}m^2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}}{1 + 0,037 \cdot (83,7)}}} \cdot \left[\sqrt{0,30m + 0,15m} - \sqrt{h_{final} + 0,15m} \right]$$

De la ecuación anterior, la única variable incógnita es la altura experimental, despejando y resolviendo se tiene que:

$$h_{final} = 0,29m$$

7. Altura del tanque T2 en función del tiempo de vaciado (sin pérdidas por fricción):

$$t = \frac{A}{a \cdot \sqrt{2 \cdot g}} \cdot \left[\sqrt{h_{ini} + \Delta Z} - \sqrt{h_{final} + \Delta Z} \right] \quad \text{(VII)}$$

Donde:

h: Altura del tanque T₂, sin pérdidas (m).

$$17s = \frac{0,185m^2}{4,65 \cdot 10^{-5} m^2 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}}} \cdot \left[\sqrt{0,30m + 0,15m} - \sqrt{h_{final} + 0,15m} \right]$$

De la ecuación anterior, la única variable incógnita es la altura experimental, despejando y resolviendo se tiene que:

$$h_{final} = 0,27m$$

8. Tiempo teórico de vaciado del tanque T2 (considerando pérdidas):

$$t_{vc} = 2 \cdot \sqrt{\frac{1 + f_d \cdot \left(\frac{L}{D}\right)_T}{2 \cdot g}} \cdot \left(\frac{D_2}{d_2}\right) \cdot \left[\sqrt{h_{ini} + \Delta Z} - \sqrt{h_{final} + \Delta Z} \right] \quad \text{(VIII)}$$

Donde:

t_{vc}: Tiempo de vaciado teórico, con pérdidas (m).

D₂: Diámetro del Tanque 2 (m).

d₂: Diámetro de descarga del Tanque 2 (m).

$$t_{vc} = 2 \cdot \sqrt{\frac{1 + 0,038.83,77}{2 \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}}} \cdot \left(\frac{0,485m}{0,0077m}\right) \cdot \left[\sqrt{0,30m + 0,15m} - \sqrt{0,09m + 0,15m} \right] = 646,96s$$

9. Tiempo teórico de vaciado del tanque T2 (sin pérdidas):

$$t_{vs} = \frac{2}{\sqrt{2 \cdot g}} \cdot \left(\frac{D_2}{d_2}\right) \cdot \left[\sqrt{h_{ini} + \Delta Z} - \sqrt{h_{final} + \Delta Z} \right] \quad \text{(IX)}$$

Donde:

t_{vs} : Tiempo de vaciado teórico, sin pérdidas (m).

$$t_{vc} = \frac{2}{\sqrt{2.9,81 \frac{m}{s^2}}} \cdot \left(\frac{0,485m}{0,0077m} \right)^2 \cdot \left[\sqrt{0,30m + 0,15m} - \sqrt{0,09m + 0,15m} \right] = 316,98s$$

CÁLCULOS PARA EL LLENADO DEL TANQUE

10. Caudal de alimentación teórico para alcanzar condiciones estacionarias (con pérdidas) [MOTT, 1996]:

$$Q_c = \frac{\sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot (h_{ts} + \Delta Z)}{\left(1 + f_d \cdot \left(\frac{L}{D}\right)_T\right)}} \cdot \pi \cdot (d_2)^2}{4} \quad (X)$$

Donde:

Q_s : Caudal de entrada teórico sin pérdidas (m^3/s).

H_{ts} : Altura en condiciones estacionarias para consideración con pérdidas (m).

$$Q_s = \frac{\sqrt{\frac{2.9,81 \frac{m}{s^2} \cdot (0,187m + 0,15m)}{(1 + 0,038.83,77)}} \cdot \pi \cdot (0,0077m)^2}{4} = 5,85 \cdot 10^{-5} \frac{m^3}{s}$$

11. Caudal de alimentación teórico para alcanzar condiciones estacionarias (sin pérdidas) [MOTT, 1996]:

$$Q_s = \frac{\sqrt{2 \cdot g \cdot (h_{tc} + \Delta Z)} \cdot \pi \cdot (d_2)^2}{4} \quad (\text{XI})$$

Donde:

Q_s : Caudal de entrada teórico sin pérdidas (m^3/s).

H_{ts} : Altura en condiciones estacionarias para consideración sin pérdidas (m).

$$Q_s = \frac{\sqrt{2 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (0,187\text{m} + 0,15\text{m})} \cdot \pi \cdot (0,0077\text{m})^2}{4} = 1,19 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

12. Altura del tanque T_2 en función del tiempo de llenado (sin pérdidas):

$$h_{isp} \Rightarrow \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{Q}{A_{T_2}} - \frac{a_d}{A_{T_2}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h + \Delta Z)} \quad (\text{XII})$$

Donde:

h_{isp} : Altura de llenado teórico sin pérdidas. (m).

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1,19 \cdot 10^{-4} \text{m}^3 / \text{s}}{0,185\text{m}^2} - \frac{4,66 \cdot 10^{-5} \text{m}^2}{0,185\text{m}^2} \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \text{m} / \text{s}^2 \cdot (h + 0,113)\text{m}}$$

Esta ecuación diferencial se resuelve por el método de Euler.

$$h = 0,119\text{m}$$

13. Altura del tanque T₂ en función de llenado (con pérdidas):

$$h_{icp} \Rightarrow \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{Q}{A_{T2}} - \frac{a_d}{A_{T2}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot (h + \Delta Z)}{1 + f_d \cdot \left(\frac{L}{D}\right)_T}} \quad (\text{XI})$$

Donde:

h_{icp} : Altura de llenado teórico sin pérdidas (m).

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{5,85 \cdot 10^{-5}}{0,185 m^2} - \frac{4,66 \cdot 10^{-5} m^2}{0,185 m^2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 m/s^2 \cdot (h + 0,15) m}{1 + 0,038 \cdot 83,77}}$$

Esta ecuación diferencial se resuelve por el método de Euler.

$$h = 0,110 m$$

CÁLCULOS PARA LA VARIACIÓN DE CONCENTRACIÓN (Todos los cálculos de esta sección estarán referido al tiempo de 91s como se puede apreciar en las tablas N° 6 y N° 7).

14. Volumen de T2 y T3 en condiciones estacionarias :

$$V_{Ti} = A_{Ti} \cdot h_{est} \quad (\text{XIV})$$

Donde:

V_{Ti} : Volumen del tanque i (m³).

$$V_{T2} = \frac{\pi \cdot (0,485 m)^2 \cdot 0,187 m}{4} = 3,46 \cdot 10^{-2} m^3$$

$$V_{T3} = \frac{\pi \cdot (0,40 m)^2 \cdot 0,13 m}{4} = 1,63 \cdot 10^{-2} m^3$$

15. Concentración Experimental en el tanque T2 y T3:

$$C_{exp} = 6.6094 \cdot \eta - 8.810 \quad (\text{XV})$$

Donde:

η : Índice de refracción.

C_{exp} : Concentración experimental (Kg/m^3).

$$C_{exp T2} = (6.6094 \cdot (1,337) - 8,810) \cdot 1000 = 26,77 Kg / m^3$$

$$C_{exp T2} = (6.6094 \cdot (1,336) - 8,810) \cdot 1000 = 16,85 Kg / m^3$$

16. Concentración teórica sin pérdidas del tanque T2 en función del tiempo:

$$C_{T2} = (C_{2o} - Ce) \cdot \exp\left(-\frac{Q_{sp} \cdot t}{V_{T2}}\right) + Ce \quad (XVI)$$

Donde:

C_{2o} : Concentración inicial experimental de T2 (kg/m^3).

C_{T2} : Concentración teórica del tanque T2 sin pérdidas (kg/m^3).

Ce : Concentración de azúcar presente en T2 (kg/m^3).

$$C_{T2} = (36,68 - 26,77) Kg / m^3 \cdot \exp\left(-\frac{1,19 \cdot 10^{-4} \frac{m^3}{s} \cdot 273s}{3,46 \cdot 10^{-2} m^3}\right) + 26,77 Kg / m^3 = 34,00 kg/m^3$$

De la misma manera se realiza para la concentración en T2 considerando pérdidas, pero se sustituye con el caudal con pérdidas.

17. Concentración teórica sin pérdidas en el tanque T3 en función del tiempo:

$$C_{T3} = Ce + (C_{3o} - Ce) \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{Q \cdot t}{V_3}\right)} + \left(\frac{V_2}{V_2 - V_3}\right) \cdot (C_{2o} - Ce) \left(\exp\left(-\frac{Q \cdot t}{V_{T2}} + \frac{Q \cdot t}{V_{T3}}\right)\right) \quad (XVII)$$

Donde:

C_{T3} : Concentración teórica de T3 sin pérdidas (Kg/m^3).

C_{3o} : Concentración inicial de azúcar en el tanque 3 (Kg/m^3).

Ce : Concentración de azúcar presente en T3 (kg/m^3).

$$C_{T3} = Ce + (C3o - Ce) \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{Q \cdot t}{V3}\right)} + \left(\frac{V_2}{V_2 - V_3}\right) \cdot (C2o - Ce) \left(\exp\left(-\frac{Q \cdot t}{V_{T2}} + \frac{Q \cdot t}{V_{T3}}\right) \right)$$

$$C_{T3} = 16,85 \frac{Kg}{m^3} + (0 - 16,85) \frac{Kg}{m^3} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{5,85 \cdot 10^{-5} \frac{m^3}{s} \cdot 91s}{1,63 \cdot 10^{-2} m^3}\right)}$$

$$+ \left(\frac{3,46 \cdot 10^{-2} m^3}{3,46 \cdot 10^{-2} m^3 - 1,63 \cdot 10^{-2} m^3}\right) \cdot (36,68 - 16,85) \frac{Kg}{m^3} \left(\exp\left(-\frac{5,85 \cdot 10^{-5} \frac{m^3}{s} \cdot 91s}{3,46 \cdot 10^{-2} m^3} + \frac{5,85 \cdot 10^{-5} \frac{m^3}{s} \cdot 91s}{1,63 \cdot 10^{-2} m^3}\right) \right)$$

$$C_{T3} = 9,41 \frac{Kg}{m^3}$$

18. Tiempo Teórico en el cual alcanza condiciones estacionarias sin pérdidas:

$$t_s = \frac{5 \cdot D_2^2 \cdot \pi \cdot h_{est}}{4 \cdot Q_s} \quad (XVIII)$$

$$t_s = \frac{5 \cdot 0,485 m^2 \cdot \pi \cdot 0,187 m}{4 \cdot 1,19 \cdot 10^{-4} \frac{m^3}{s}} = 1443 s$$

19. Tiempo Teórico en el cual alcanza condiciones estacionarias con pérdidas:

$$t_c = \frac{5 \cdot D_2^2 \cdot \pi \cdot h_{est}}{4 \cdot Q_c} \quad (XIX)$$

$$t_s = \frac{5 \cdot 0,485 m^2 \cdot \pi \cdot 0,187 m}{4 \cdot 5,85 \cdot 10^{-5} \frac{m^3}{s}} = 2953 s$$

DESVIACIONES

20. Porcentaje de Desviación de la velocidad de descarga (sin pérdidas):

$$\%Ds = \frac{|Us - U_{\text{exp}}| \cdot 100}{Us} \quad (\text{XX})$$

$$\%Ds = \frac{|2,92 - 3,27|s}{2,92s} \cdot 100 = 11,17\%$$

21. Porcentaje de Desviación del Tiempo de llenado (con pérdidas):

$$\%Dc = \frac{|tc - t_{\text{exp}}| \cdot 100}{tc} \quad (\text{XXI})$$

$$\%Dc = \frac{|646,96 - 289,00|s}{646,96s} \cdot 100 = 55,33\%$$

22. Porcentaje de Desviación del Tiempo de vaciado (sin pérdidas):

$$\%Ds = \frac{|ts - t_{\text{exp}}| \cdot 100}{ts} \quad (\text{XXII})$$

$$\%Ds = \frac{|316,98 - 289,00|s}{316,98s} \cdot 100 = 8,83\%$$

23. Porcentaje de Desviación del Tiempo de llenado (con pérdidas):

$$\%Dc = \frac{|tc - t_{\text{exp}}| \cdot 100}{tc} \quad (\text{XXIII})$$

$$\%Dc = \frac{|646,96 - 289,00|s}{646,96s} \cdot 100 = 55,33\%$$

24. Porcentaje de Desviación del nivel de líquido en T2 (sin pérdidas):

$$\%Ds = \frac{|hs - h_{\text{exp}}| \cdot 100}{hs} \quad (\text{XXIV})$$

$$\%Ds = \frac{|0,119 - 0,129|m}{0,119m} \cdot 100 = 8,49\%$$

25. Porcentaje de Desviación del Tiempo de llenado (con pérdidas):

$$\%Dc = \frac{|hc - h_{exp}| \cdot 100}{hc} \quad (XXV)$$

$$\%Ds = \frac{|0,110 - 0,129|m}{0,110m} \cdot 100 = 8,86\%$$

26. Porcentaje de Desviación del Tiempo de llenado (sin pérdidas):

$$\%Ds = \frac{|ts - t_{exp}| \cdot 100}{ts} \quad (XXVI)$$

$$\%Ds = \frac{|5149,2 - 2640|s}{5149,2s} \cdot 100 = 49\%$$

27. Porcentaje de Desviación del Tiempo de llenado (con pérdidas):

$$\%Dc = \frac{|tc - t_{exp}| \cdot 100}{tc} \quad (XXVII)$$

$$\%Dc = \frac{|5010,2 - 2640|s}{5010,2s} \cdot 100 = 47\%$$

28. Porcentaje de Desviación de la variación de azúcar en el tanque 2 sin pérdidas:

$$\%Ds = \frac{|Cs - C_{exp}| \cdot 100}{Cs} \quad (XXVIII)$$

$$\%Ds = \frac{|34,00 - 26,77|kg / m^3}{34,00kg / m^3} \cdot 100 = 21,27\%$$

29. Porcentaje de Desviación de la variación de azúcar en el tanque 2 con pérdidas:

$$\%Dc = \frac{|Cs - C_{exp}| \cdot 100}{Cc} \quad (XXIX)$$

$$\%Dc = \frac{|35,27 - 26,77| kg / m^3}{35,27 kg / m^3} \cdot 100 = 24,10\%$$

30. Porcentaje de Desviación de la variación de azúcar en el tanque 3 sin pérdidas:

$$\%Ds = \frac{|Cs - C_{exp}| \cdot 100}{Cs} \quad (XXX)$$

$$\%Ds = \frac{|15,04 - 16,85| kg / m^3}{15,04 kg / m^3} \cdot 100 = 12,03\%$$

31. Porcentaje de Desviación de la variación de azúcar en el tanque 3 con pérdidas:

$$\%Dc = \frac{|Cs - C_{exp}| \cdot 100}{Cc} \quad (XXXI)$$

$$\%Dc = \frac{|9,41 - 16,85| kg / m^3}{9,41 kg / m^3} \cdot 100 = 79,02\%$$

32. Porcentaje de Desviación del Tiempo que alcanza condiciones estacionarias con respecto al tiempo teórico sin pérdidas:

$$\%Ds = \frac{|ts - t_{exp}| \cdot 100}{ts} \quad (XXXII)$$

$$\%Ds = \frac{|1443 - 910|s}{1443s} \cdot 100 = 37\%$$

33. Porcentaje de Desviación del Tiempo que alcanza condiciones estacionarias con respecto al tiempo teórico con pérdidas:

$$\%Dc = \frac{|tc - t_{exp}| \cdot 100}{tc} \quad (\text{XXXIII})$$

$$\%Ds = \frac{|2953 - 910|s}{2953s} \cdot 100 = 69\%$$