

ELABORACIÓN DE LOS ÁBACOS QUE RELACIONAN LOS GRADIENTES DE VELOCIDAD CON LAS REVOLUCIONES POR MINUTO CON VASOS ACRÍLICOS CUADRADOS DE 2 LT A TEMPERATURAS ENTRE 4°C Y 24°C CON UN RANGO DE 2°C PARA EL NUEVO EQUIPO DE PRUEBA DE ENSAYO DE JARRAS DEL LABORATORIO DE HIDRAÚLICA Y SANEAMIENTO DEL PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL DE LA UNIVERSIDAD DE NARIÑO

**GERMAN GUIZA ROSERO
GISELLE JURADO ARROYO**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO
2014**

ELABORACIÓN DE LOS ÁBACOS QUE RELACIONAN LOS GRADIENTES DE VELOCIDAD CON LAS REVOLUCIONES POR MINUTO CON VASOS ACRÍLICOS CUADRADOS DE 2 LT A TEMPERATURAS ENTRE 4°C Y 24°C CON UN RANGO DE 2°C PARA EL NUEVO EQUIPO DE PRUEBA DE ENSAYO DE JARRAS DEL LABORATORIO DE HIDRAÚLICA Y SANEAMIENTO DEL PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL DE LA UNIVERSIDAD DE NARIÑO

**GERMAN GUIZA ROSERO
GISELLE JURADO ARROYO**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Civil

**DIRECTOR:
Ing. Msc. ROBERTO SALAZAR CANO**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO
2014**

NOTA DE RESPONSABILIDAD

Las ideas y conclusiones aportadas en el siguiente trabajo son responsabilidad exclusiva de los autores.

Artículo 1ro del Acuerdo No. 324 de octubre 11 de 1966 emanado del Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

“La Universidad de Nariño no se hace responsable de las opiniones o resultados obtenidos en el presente trabajo y para su publicación priman las normas sobre el derecho de autor”

Artículo 13, Acuerdo N. 005 de 2010 emanado del Honorable Consejo Académico.

Nota de aceptación:

Presidente

Jurado

Jurado

San Juan de Pasto, Noviembre de 2014

AGRADECIMIENTOS

A Dios por enseñarnos lo hermosa que es la vida, por las grandes oportunidades y aprendizajes.

Al ingeniero Gustavo Córdoba, director del área de investigación quien hizo posible este trabajo

Al ingeniero Roberto Salazar Cano, quien asesoró nuestro trabajo de investigación, brindando todo el conocimiento y la orientación para el desarrollo de este trabajo.

Hoy inmortalice un sueño...

...Y sé que aún en los momentos difíciles el valor, el esfuerzo y las ganas de vivir me ayudarán a triunfar...

Dedico este trabajo a...

Las personas que han creído en mí y han estado para mí...

*A ti Madre por ser lo más especial del universo porque tú dedicación, apoyo y comprensión han hecho de mí el ser que soy.
... a mi Cata mi hermana de sangre y del alma... gracias por siempre motivarme y acompañarme... de manera especial al angelito que ilumina cada instante de mi vida y es la felicidad más grande... Juan Camilo, eres el ser que me da fortaleza para no decaer, mis metas triunfos son tuyos por eso me siento realizada de poder compartir contigo uno de mis más anhelados éxitos...*

Y no olvido a mi Padre Danengel Jurado, a mis amados Juan Bautista Jurado y Amparo Palacios que con su amor, compañía y palabra me han dado fortaleza.

GISELLE JURADO ARROYO

“La vida no está hecha de deseos y sí de los actos de cada uno”.... Paulo Coelho

“La vida es hermosa, vivirla no es una casualidad.”

Albert Einstein

Dedico este trabajo a...

Las personas que han creído en mí y han estado para mí...

A mis padres Gerardo Guiza y Claudia Rosero por su apoyo incondicional, a mis hermanos por hacer parte de mi vida, a mis abuelitos Carlos Rosero y Mercedes Muñoz porque su educación y bases han sido la base de mi educación; y en especial a “Amolchi” por enseñarme a ver quién soy, a estar seguro de mis capacidades y no dudar de mis cualidades; por haberme enseñado que es amar y por cambiarme la vida....

...GRACIAS....

GERMAN GUIZA ROSERO

RESUMEN

Los laboratorios de hidráulica y saneamiento básico han venido sufriendo una continua transformación en razón de las necesidades académicas, de extensión, e investigación propias del programa de ingeniería civil. Resaltando la necesidad investigativa, se ha dotado por parte de los estudiantes al laboratorio con el equipo de Prueba de Jarras, aportando a labores académicas y además pudiendo prestar un servicio de extensión a los profesionales que lo soliciten.

El equipo de Prueba de Jarras se utiliza para simular en jarras procesos unitarios de floculación, coagulación y sedimentación que se producirá en plantas de tratamiento de agua potable y residual, determinando coagulantes y auxiliares de coagulación (metálicos o pre polimerizados), sus dosis óptimas, secuencia de adición de los mismos para una turbiedad, un color, un pH, una temperatura, una alcalinidad y una dureza dados. Estableciendo parámetros de diseño para determinar dimensiones de las unidades de la planta o para rehabilitar u optimizar sistemas existentes.

El factor más importante dentro los procesos de coagulación y floculación es el gradiente de velocidad, que consiste en un consumo de energía para producir turbulencia hidráulica o mecánica dentro de los tanques de coagulación y floculación. Para la coagulación se necesita de una mezcla rápida por el cual debe tener un alto gradiente de velocidad, a diferencia del proceso de floculación que requiere de una mezcla lenta con un gradiente de velocidad bajo.

Los gradientes de velocidad calculados en plantas de tratamiento de aguas, para ser utilizados en las Pruebas de Jarras deben ser relacionados en un ábaco, para convertir los s^{-1} a revoluciones por minuto (rpm), utilizando como referencia la temperatura del fluido, para ello se hace uso del ábaco que relaciona los gradientes de velocidad con las revoluciones por minuto a diferentes temperaturas, ábaco que se desarrolló con una serie de pruebas y el cálculo de gradientes de velocidad a temperaturas entre 4°C a 24°C en el nuevo equipo de Prueba de Jarras en recipientes acrílicos de forma cuadrada con volumen de 2 litros y paletas de 7,62 cm de diámetro.

ABSTRACT

Hydraulic laboratories and sanitation have been suffering a continuous transformation because of the needs academics such extension, research own of civil engineering program. Highlighting the research need has been provided by students in the laboratory jar test equipment, contributing to academic work and may also provide an outreach service for professionals on request.

The jar test equipment is used to simulate flocculation unit processes jars, coagulation and sedimentation will occur in treatment plants water and wastewater, determining clotting and coagulation aids (pre metal or polymers), their optimal dose sequence of addition thereof to turbidity, color, pH, temperature, alkalinity and hardness given. Establishing design parameters for determining dimensions of the units of the plant or to rehabilitate existing systems or optimize.

The agent most important in the coagulation and flocculation processes is the velocity gradient, which consists of energy consumption for generating hydraulic or mechanical turbulence within the coagulation and flocculation tanks. For coagulation is needed for rapid mixing which must have a high shear rate, unlike the flocculation process that requires a slow mixing with a gradient of low speed.

Calculated velocity gradients in water treatment plants, for use in the jar tests should be related in an abacus; to convert s^{-1} to revolutions per minute (rpm), using as reference fluid temperature; This use of the abacus for linking speed gradients rpm done at different temperatures; abacus was developed with a series of tests and calculation of velocity gradients at temperatures between $4^{\circ}C$ to $24^{\circ}C$ in the new test equipment jugs square acrylic containers with volume of 2 liters and palettes 7,62 cm in diameter.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
0. INTRODUCCION	21
1. MARCO TEORICO	24
1.1. EQUIPO DE PRUEBA DE JARRAS.....	24
1.1.1. Antecedentes.....	24
1.1.2 Generalidades del agua.....	24
1.1.3 Parámetros físicos del agua.....	25
1.1.4 Tratamiento de aguas residuales:	29
1.1.4.1 Coagulación	29
1.1.4.2 Floculación.....	34
1.1.5 Pruebas de tratabilidad.....	35
1.1.5.1 Floculadores hidráulicos.....	35
1.1.5.2 Floculadores mecánicos	35
1.1.5.3 Prueba de jarras	36
1.1.5.4 Precauciones y limitaciones	40
1.1.5.5 Obtención de resultados	41
1.1.6 Diseño del sistema de agitación	44
1.1.6.1 Agitación.....	44
1.1.6.2 Funciones de la agitación	44
1.1.6.3 Reseña histórica los agitadores	46
1.1.6.4 Equipo de agitación.....	46
1.1.6.5 Tipos de rodetes	46
1.1.6.6 Trayectorias del flujo en la agitación	48
1.1.6.7 Formas de evitar remolinos	49

2.	DESCRIPCIÓN DEL NUEVO EQUIPO DE PRUEBA DE JARRAS EN EL LABORATORIO DE HIDRAULICA Y SANEAMIENTO BASICO DE LA UNIVERSIDAD DE NARIÑO.....	51
3.	DISEÑO DE ABACOS QUE RELACIONA LOS GRADIENTES DE VELOCIDAD (G) CON LAS REVOLUCIONES POR MINUTO (RPM)	53
3.1	ENSAYOS DE LABORATORIO	56
3.1.2	Registro de la información	59
3.1.3	Procesamiento de datos y cálculo de variables para graficar	60
3.1.4	Representación gráfica para los ensayos.....	64
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	73
5.	CONCLUSIONES	76
	RECOMENDACIONES.....	77
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Ábaco que relaciona los G. con RPM con vasos acrílicos cuadrados de 2 lt a una temperatura de 4°C.	65
Gráfica 2. Ábaco que relaciona los G. con RPM con vasos acrílicos cuadrados de 2 lt a una temperatura de 6°C.	65
Gráfica 3. Ábaco que relaciona los G. con RPM con vasos acrílicos cuadrados de 2 lt a una temperatura de 8°C.	66
Gráfica 4. Ábaco que relaciona los G. con RPM con vasos acrílicos cuadrados de 2 lt a una temperatura de 10°C.	66
Gráfica 5. Ábaco que relaciona los G. con RPM con vasos acrílicos cuadrados de 2 lt a una temperatura de 12°C.	67
Gráfica 6. Ábaco que relaciona los G. con RPM con vasos acrílicos cuadrados de 2 lt a una temperatura de 14°C.	67
Gráfica 7. Ábaco que relaciona los G. con RPM con vasos acrílicos cuadrados de 2 lt a una temperatura de 16°C.	68
Gráfica 8. Ábaco que relaciona los G. con RPM con vasos acrílicos cuadrados de 2 lt a una temperatura de 18°C.	68
Gráfica 9. Ábaco que relaciona los G. con RPM con vasos acrílicos cuadrados de 2 lt a una temperatura de 20°C.	69
Gráfica 10. Ábaco que relaciona los G. con RPM con vasos acrílicos cuadrados de 2 lt a una temperatura de 22°C.	69
Gráfica 11. Ábaco que relaciona los G. con RPM con vasos acrílicos cuadrados de 2 lt a una temperatura de 24°C.	70
Gráfica 12. Gradiente de Velocidad vs RPM Equipo de Jarras. Universidad de Michigan	72

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Tipos de floculadores	36
Tabla 2. Tipo de paleta	38
Tabla 3. Índice de Willcomb	41
Tabla 4. Los valores de K_T según el número de Reynolds	54
Tabla 5. Propiedades físicas del agua	55
Tabla 6. Formato para el ingreso de datos	59
Tabla 7. Datos obtenidos en laboratorio	62
Tabla 8. Ecuaciones de regresión.....	73
Tabla 9. Comparación de gradientes de velocidad a 100 rpm en equipo Yareth Químicos	74
Tabla 10. Comparación de gradientes a 4°C entre ábacos U. de Michigan y Yareth Químicos	74
Tabla 11. Comparación de gradientes a 22°C entre ábacos U. de Michigan y Yareth Químicos	75

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Distribución de tamaños de las partículas en el agua.....	26
Figura 2. Doble capa de una partícula coloidal	27
Figura 3. Etapas de la coagulación	32
Figura 4. Equipo de Jarras.....	36
Figura 5. Base iluminada	40
Figura 6. Dosificación óptima.....	43
Figura 7. Tipos de rodetes	48
Figura 8. Trayectorias de flujo en tanques cilíndricos	49
Figura 9. Floculador equipo Prueba de Jarras MD. Y-FL6 del laboratorio de hidráulica y saneamiento básico de la Universidad de Nariño, utilizado en esta investigación	52
Figura 10. Forma y medidas de las Jarras y paletas del equipo de Prueba de Jarras MD. Y-FL6 del laboratorio de hidráulica y saneamiento básico de la Universidad de Nariño, utilizado en esta investigación. .	52

LISTA DE FOTOGRAFIAS

	Pág.
Fotografía 1. Agua a la temperatura deseada	57
Fotografía 2. Ubicación de jarras, paletas y lectura de temperatura.....	58
Fotografía 3. Ingreso de rpm y tiempo de prueba.....	58
Fotografía 4. Agitación del agua a RPM dada	59

LISTA DE ANEXOS

- Anexo 1.** Registro de datos de los ensayos realizados en laboratorio y cálculos de las variables para la representación gráfica experimental..... 80
- Anexo 2.** Representación gráfica con datos experimentales -Gradiente (Gx) vs RPM. Fórmula de regresión potencial..... 92

GLOSARIO

ABSORCIÓN: Es un proceso físico o químico en el cual átomos, moléculas o iones pasan de una primera fase a otra incorporándose al volumen de la segunda fase. Esta segunda fase puede ser líquida, gaseosa o sólida.

ADSORCIÓN: Retención sobre la superficie de una sustancia sólida o líquida, de gases, líquidos o coloides, como resultado de la acción de fuerzas electroquímicas.

AGLOMERACIÓN: La acción de congregarse la materia suspendida dispersa, en porciones mayores que se sedimentan rápidamente o proceso de unir partículas más pequeñas para formar una masa más grande.

AGUA: Es un compuesto químico formado por dos partes de hidrógeno y una parte de oxígeno, en volumen. Puede tener solución o en suspensión a otros materiales sólidos, líquidos o gaseosos. Su fórmula es H₂O.

AGUA CRUDA: Agua superficial o subterránea en estado natural que no ha sido sometida a ningún proceso de tratamiento.

AGUA POTABLE: Es el agua que no contiene contaminación, minerales o infección objetables y que se considera satisfactoria para el consumo doméstico. Apropia para beber.

ALCALINIDAD: Es la medición cuantitativa de los constituyentes alcalinos totales de un agua, tanto en el estado ionizado como en el no ionizado. Usualmente se expresa en mg/L de CaCO₃ equivalente.

ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DEL AGUA: Pruebas de laboratorio que se efectúan a una muestra de agua para determinar sus características físicas y químicas.

ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO DEL AGUA: Pruebas de laboratorio que se efectúan a una muestra para determinar la presencia o ausencia, tipo y cantidad de microorganismos.

BACTERIAS: Plantas microscópicas primitivas, generalmente sin pigmento, que se producen en división en uno, dos o tres planos. No requieren de luz para su proceso vital.

CALIDAD DEL AGUA: Conjunto de características organolépticas, físicas, químicas y microbiológicas propias del agua.

CLORACIÓN: Proceso de purificación del agua en el cual el cloro es añadido al agua para desinfectarla, para el control de organismos presentes. También usado en procesos de oxidación de productos impuros en el agua.

CLORAMINAS: Complejo químico que consiste en amoníaco y cloro. Sirve como desinfectante del agua en suministros de agua público porque el cloro puede reaccionar con partículas orgánicas formando productos peligrosos. Las formas en las que las cloraminas existen dependen de las propiedades físico-químicas de la fuente del agua.

COAGULACIÓN: se refiere a la formación de flóculos precipitados o incipientes mediante los cambios físico-químicos que tiene lugar entre coagulante soluble, la alcalinidad del agua, los sólidos disueltos y el agua misma.

COAGULANTE: Sustancia que ayuda a la precipitación más rápida de partículas suspendidas y coloides durante el tratamiento del agua que se utiliza para obtener mejores resultados en la coagulación.

COLOIDE: Es una suspensión de sólidos finamente divididos que no se sedimentan fácilmente, pero que pueden ser eliminados por coagulación, es un material de muy pequeño tamaño, en el rango de 10,5 μm , a 10,7 μm de diámetro.

CONCENTRACIÓN: La cantidad de material disuelto en una unidad de solución, expresado en mg/l.

CONTAMINACIÓN: Es un término general que significa la introducción al agua de microorganismos, que hacen impropia para el consumo humano. Generalmente se considera que implica la presencia o posible presencia de bacterias patógenas, es un tipo específico de polución.

DEPÓSITO: Es una laguna, un lago, tanque, estanque u otro medio, ya sea de origen natural o construido, total o parcialmente mediante estructuras artificiales, que se usa para el almacenamiento, regulación y/o control del agua.

DESINFECCIÓN: Proceso físico o químico que permite la eliminación o destrucción de los microorganismos patógenos presentes en el agua.

DOSIFICACIÓN: Acción mediante la cual se suministra una sustancia química al agua.

ENSAYO DE JARRAS: Ensayo de laboratorio que simula las condiciones en que se realizan los procesos de oxidación química, coagulación, floculación y sedimentación en la planta.

FILTRACIÓN: Proceso mediante el cual se remueve las partículas suspendidas y coloidales del agua al hacerlas pasar a través de un lecho poroso.

FILTRO RÁPIDO DE ARENA: Cedazo que retiene a la materia coagulada. La filtración de arena es frecuentemente usada y es un método muy robusto para eliminar los sólidos suspendidos en el agua. El medio de filtración consiste en múltiples capas para arenas con variedad en el tamaño y gravedad específica. Filtros de arena pueden ser suministrados para diferentes tamaños y materiales ambas manos operan de forma automática.

FLOCULACIÓN: Consiste en agitar suavemente el agua tratada con coagulante, durante un periodo de tiempo apreciable, para completar las reacciones de coagulación, hasta alcanzar condiciones que permita que el material flocúento se junte y adhiera formando grandes masas de flóculos.

FLOCULADOR: Unidad o reactor donde se produce la floculación; puede ser del tipo hidráulico o mecánico.

FLÓCULO: Cúmulos de varios millones de células bacterianas, junto con algunos otros organismos y materias inertes, orgánicas e inorgánicas. Sin embargo, los flóculos no se deben considerar como entidades invariantes.

GRADIENTE DE VELOCIDAD (G): Es una de las variables más importantes el proceso de floculación y en la Prueba de Jarras, indica la intensidad de agitación que se le da a una masa de agua, para iniciar el proceso formación a los flóculos. El G está expresado en unidades de gradiente de velocidad y su adimensional es (s^{-1}).

MEZCLA LENTA: Agitación suave del agua con el coagulante disuelto, con el fin de favorecer la formación de los flóculos.

MEZCLA RÁPIDA: Agitación violenta para producir dispersión instantánea de un producto químico en la masa de agua.

MEZCLADO: Distribución uniforme y rápida de un coagulante u otro producto químico, en el agua que se esté tratando.

MEZCLADOR DE PALETAS O BRAZOS: Este consiste en esencia en una o varias paletas horizontales, verticales o inclinadas unidas a un eje horizontal, vertical o inclinado que gira axialmente dentro del recipiente (aunque no siempre está centrado con éste). De esta manera el material que se mezcla es empujado o arrastrado alrededor del recipiente siguiendo una trayectoria circular. Cuando se trata de líquidos pocos espesos en recipientes sin placas desviadoras, las paletas imprimen siempre un movimiento de remolino a todo el contenido del recipiente. En todos los casos, el material directamente en la trayectoria de las paletas es empujado más aprisa que el que se encuentra entre ellas. Este hecho tiene gran influencia para cambiar la relación mutua existente entre las láminas (o estratos) paralelas a las paletas.

PH: Es un indicador de acidez o alcalinidad. Está determinado por el logaritmo negativo de la concentración de iones de hidrógeno (H⁺) en una sustancia. El pH sirve como un indicador que compara algunos de los iones más solubles en agua. Varía desde pH1 hasta pH 14

POTENCIA: Capacidad para ejecutar un trabajo en el menor tiempo posible. La potencia es trabajo mecánico que incorpora en su valor el parámetro del tiempo. Es decir, la potencia se expresa con un número que cuantifica el trabajo efectuado durante un lapso de tiempo. Mientras más rápido se realiza el trabajo la potencia que se desarrolla es mayor

REACTOR: Se le denomina así a la unidad o elemento donde se efectúa un proceso de tratamiento de agua. Por ejemplo: un floculador, un sedimentador, un tanque y otros.

REVOLUCIONES POR MINUTO: Unidad de frecuencia que se usa también para expresar la velocidad angular. Indica el número de rotaciones completadas cada minuto por un cuerpo que gira alrededor de un eje.

SEDIMENTACIÓN: Se refiere, finalmente, al depósito de los flóculos en estanques especialmente diseñados para tal propósito. La sedimentación de sólidos en líquidos está gobernada por la ley de Stokes, que indica que las partículas sedimentan más fácilmente cuando mayor es su diámetro, su peso específico comparado con el del líquido, y cuando menor es la viscosidad del líquido. Por ello, cuando se quiere favorecer la sedimentación se trata de aumentar el diámetro de las partículas, haciendo que se agreguen unas a otras, proceso denominado coagulación y floculación.

SEMIPERMEABLE: Un medio que permite al agua pasar a través de él, pero rechaza el paso de sólidos suspendidos, así que esto puede ser usado para la separación de sólidos del agua.

TIEMPO DE RETENCIÓN: Es el tiempo real que el agua permanece sometida a un proceso de tratamiento, una unidad determinada. No siempre es igual al tiempo de retención teórico.

TURBIEDAD: Es la condición de un líquido debido al material visible, finalmente dividido y en suspensión, que puede o no ser de tamaño suficiente para distinguirlo en partículas aisladas a simple vista, pero que impide el paso de la luz a través del líquido. Es una medida de la materia suspendida (usualmente coloidal) en los líquidos; se expresa en términos de mg/l.

INTRODUCCION

A través de la historia, el hombre ha necesitado de un suministro adecuado y de buena calidad de agua para su alimentación, seguridad y bienestar. El agua es una necesidad universal y es el principal factor limitante para la existencia de la vida. No obstante es afectada directa o indirectamente a causa de actividades humanas o simplemente contaminación natural. Para hacer frente a este problema es necesario someter al agua a una serie de operaciones o procesos unitarios a fin de purificarla para que pueda ser utilizada en los diferentes usos, por lo tanto, un abastecimiento de agua y de saneamiento son factores importantes para contribuir en el desarrollo y bienestar de los seres vivos.

Para el tratamiento de aguas existen ciertos parámetros y especificaciones los cuales se deben cumplir para garantizar la calidad del agua, para esto se ha llevado a cabo muchos estudios desarrollando nuevas ideas y alternativas para nuevas tecnologías con el fin de hacer un control de las características físico químicas del agua implementando diferentes procesos, entre estos oxidación química, coagulación- floculación y sedimentación, en donde la Prueba de ensayo de Jarras es indispensable para el desarrollo de este proceso, en la cual se determina en gran parte las condiciones de operación de una planta de tratamiento real.

El equipo de Prueba de Jarras con el que se dota el laboratorio de hidráulica y saneamiento básico de la Universidad de Nariño, consiste de un set de agitadores mecánicos controlados por un aparato que regula su velocidad, una lámpara de iluminación y seis vasos de precipitados de hasta 2000 ml de forma cuadrada. Este es un instrumento clave de trabajo a la hora de tratar el agua ya que define y controla parámetros básicos de diseño de una planta de tratamiento de agua potable y de aguas residuales, por lo tanto se realizan los ábacos para convertir s^{-1} a revoluciones por minuto, variando la potencia trasferida y la temperatura entre 4°C y 24°C con el fin de establecer el comportamiento del agua en estas condiciones.

El ensayo de Jarras permite obtener la siguiente información:

1. Dosis óptima de coagulantes, alcalinizantes y desinfectantes.
2. Evaluaciones cualitativas:
 - a) Tamaño del flóculo producido
 - b) Tiempo inicial de formación del flóculo.
3. Evaluaciones cuantitativas:

a) Determinaciones físicas: turbiedad y color residuales, así como tiempos y gradientes óptimos de velocidad. Cuando sea pertinente pueden también determinarse: la velocidad de sedimentación de los flóculos formados, y el número de partículas presentes por tamaños.

b) Determinaciones químicas: pH y alcalinidad antes y después de la coagulación y adicionalmente la concentración del aluminio residual, hierro y/o manganeso si es el caso.

4. Dosis de alcalinizante para obtener el pH de saturación o el pH óptimo de coagulación

5. Porcentaje de lodos producidos en la sedimentación

6. Demanda de cloro y determinación del punto de quiebre

7. Isotherma de adsorción sobre carbón activado

Estos ensayos deben usarse para simular los procesos de una manera más cercana a la realidad.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL:

Dotación del equipo de Prueba de ensayo de Jarras al laboratorio de hidráulica y saneamiento básico del programa de ingeniería civil de la universidad de Nariño y la elaboración de los ábacos de gradientes de velocidad.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Dotar al laboratorio de hidráulica y saneamiento básico con el equipo de Prueba de ensayo de Jarras en conjunto con el trabajo de grado “PROTOCOLO PARA EL FUNCIONAMIENTO, CONTROL Y OPERACIÓN DEL NUEVO EQUIPO DE PRUEBA DE JARRAS DEL LABORATORIO DE HIDRAULICA Y SANEAMIENTO DEL PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL DE LA UNIVERSIDAD DE NARIÑO”.
- Elaborar los ábacos de gradiente de velocidad vs revoluciones por minuto a temperaturas entre 4°C y 24°C con un rango de 2°C.
- Precisar los ábacos que relaciona los gradientes de velocidad con las revoluciones por minuto con vasos acrílicos cuadrados de 2 l que servirán para los diferentes ensayos que se realizan con el nuevo equipo de Prueba de ensayo de Jarras del laboratorio de hidráulica y saneamiento básico.

1. MARCO TEORICO

1.1. EQUIPO DE PRUEBA DE JARRAS

1.1.1. Antecedentes. Uno de los equipos más usados en el tratamiento de las aguas como elemento de control de la coagulación es el equipo de Prueba de Jarras. G. W. Fuller, J. Cairol y E. Theirault son precursores de la Prueba de Jarras como modelo predictivo.

De acuerdo con la información obtenida, probablemente el primer ensayo de Prueba de Jarras fue realizado por W. L. Langelier en la Universidad de California en 1918. Las primeras aplicaciones y el desarrollo inicial corresponden a John Baylis, Bartow y Petterson, Fleming, Nolte y Kromer.

Aportes tecnológicos posteriores fueron realizados por Tolman, Niekel, Gekershausen, Langelier–Ludwig, Cross, C. Henry, Smith, Straub, Elliassen,

Norcon, Cox y otros, que perfeccionan continuamente el ensayo y lo aplican con éxito a diversas condiciones de coagulación de las aguas. Estos autores orientaron principalmente el modelo de Prueba de Jarras hacia la determinación y optimización de las variables químicas del proceso de coagulación.¹

El gradiente de velocidad se define como el grado de agitación en una unidad de mezclador, fue desarrollado por Camp y Stein en 1943 para un régimen turbulento; además, Ruey, Hudson, Singley y Camp determinaron los gradientes de velocidad para diferentes tipos de rotores y deflectores.

1.1.2 Generalidades del agua. El agua es el recurso más importante ya que sin ella no existe la vida, es un componente de la naturaleza que ha estado presente en la tierra desde hace más de 3.000 millones de años, ocupando tres cuartas partes de la superficie del planeta. Su naturaleza se compone de tres átomos, dos de hidrógeno y uno de oxígeno que unidos entre sí forman una molécula de agua, H₂O. La forma en que estas moléculas se unen entre sí, determina la forma en que se encuentra el agua en el entorno; como líquido, en lluvias, ríos, océanos, etc.; como sólido en témpanos y nieves o como gas en las nubes. El agua no se encuentra en un grado de pureza total porque siempre contiene componentes orgánicos e inorgánicos es decir tiene impurezas; razón por la cual se puede decir

¹ De Vargas, Ing. Lidia, Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida Manual I: Teoría Tomo I - Capítulo 11. Criterios para la selección de los procesos y de los parámetros óptimos de las unidades. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. CEPIS/OPS. Lima 2004. Pag.220

que es potable y apta para el consumo humano cuando esta ha sido sometida a un tratamiento de potabilización.

En la actualidad, los métodos para potabilizar el agua son muchos, pero se debe adoptar aquel que asegure la calidad y cantidad necesaria para que el hombre viva en unas condiciones saludables.

La potabilización de agua comprende un orden de procesos que son: captación, coagulación-floculación, sedimentación, filtración y desinfección.

1.1.3 Parámetros físicos del agua. Los parámetros que más nos interesan en el proceso de potabilización son la turbiedad y el color en forma de partículas muy pequeñas o coloides, material que no puede ser eliminado mediante un proceso de sedimentación simple.

- **Turbiedad:** Los contaminantes causantes de turbiedad en el agua son las partículas en suspensión, tales como arcilla, minerales, sedimento, materia orgánica e inorgánica finamente dividida, plancton y otros organismos microscópicos. Los tamaños de las partículas varían desde partículas coloidales hasta partículas más grandes.

La arcilla es quizás la causa más común de turbiedad en las aguas. Comúnmente se entiende que la arcilla es un material natural, terroso, de gránulos muy finos, que se vuelve plástico cuando se mezcla con cierta cantidad de agua. Varios análisis de arcilla han demostrado que ésta se compone principalmente de sílice, aluminio y agua, frecuentemente con cantidades apreciables de hierro, álcalis y tierra alcalina.

- **Color:** La mayoría de los investigadores opina que el color orgánico en el agua es de naturaleza coloidal. Algunos autores sugieren, sin embargo, que se encuentra en solución verdadera. Black y Christman demostraron que los filtros de membrana comerciales, con poros de 3,5 μm retenían 91% del color original mientras que los poros de 10 μm retenían sólo el 13%. Esto indica que el tamaño de las partículas de color varía entre 3,5 y 10 μm , y este rango de tamaño se encuentra en el límite entre dispersión coloidal y solución verdadera.

Los principales constituyentes de color orgánico natural en el agua, de acuerdo con el esquema usado para compuestos orgánicos del suelo son los ácidos fúlvicos, himatomelánicos y húmicos, conocidos en su conjunto como sustancias húmicas. Las sustancias húmicas están compuestas por moléculas aromáticas de alto peso molecular que muestran características polianiónicas en soluciones neutras o alcalinas. Por medio de estudios de degradación

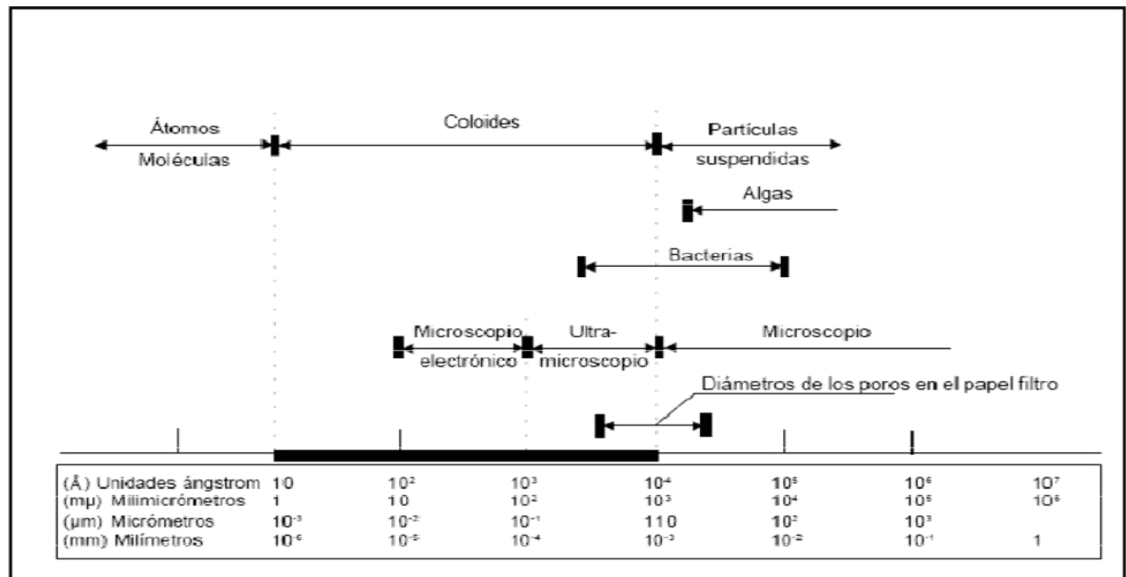
oxidativa se lograron aislar e identificar siete diferentes compuestos fenólicos comunes a los húmicos de la madera y del agua.

- **Material coloidal:** Las partículas coloidales se caracterizan por tener una gran superficie específica, es decir, una gran relación entre el área superficial y la masa. No hay límites definidos de tamaño para las partículas coloidales, pero, por lo general, se considera que tienen una dimensión entre 1 y 1,000 μm aproximadamente.

Los coloides entonces tienen un tamaño intermedio entre las partículas en solución verdadera y las partículas en suspensión. Los límites enumerados en la Figura 1 son aproximados, ya que el tamaño y la naturaleza del material son los que determinan si la partícula es coloidal.

Existen varios términos para distinguir los tipos de sistemas coloidales. En el tratamiento de agua, los más importantes son los hidrofílicos e hidrofóbicos. (Ver figura 1.)²

Figura 1. Distribución de tamaños de las partículas en el agua



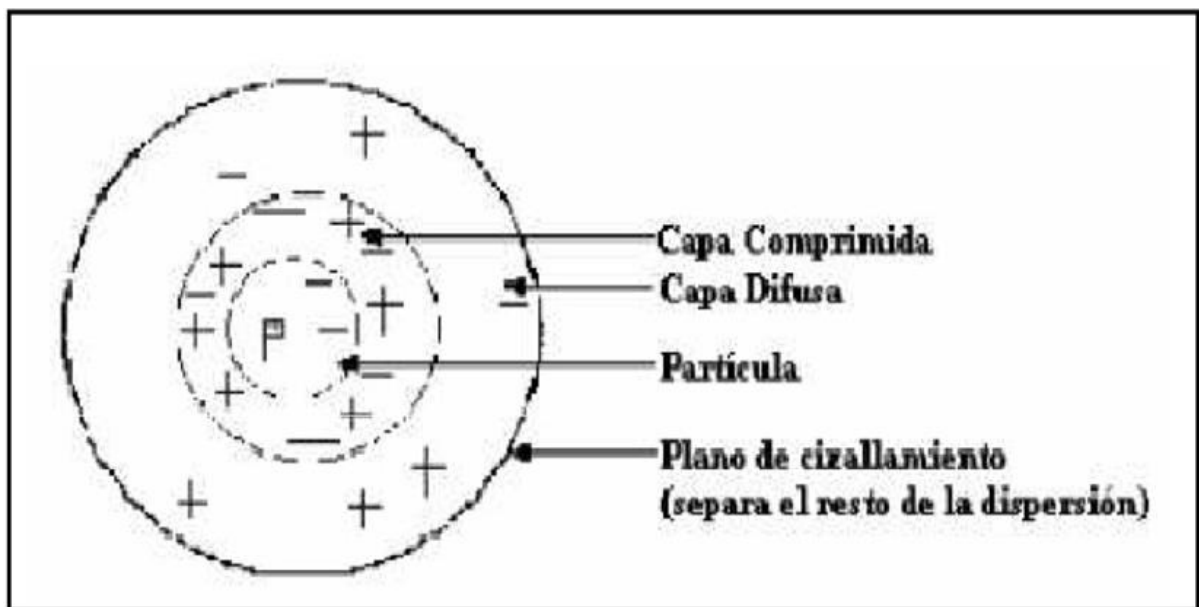
- **Carga eléctrica y doble capa:** “Dentro del Agua Superficial, las partículas coloidales, son las causantes de la turbiedad y del color por lo que el tratamiento del agua está orientado a la remoción de estas partículas; estas

² Características físicas del agua,
http://atenea.udistrital.edu.co/grupos/fluoreciencia/capitulos_fluoreciencia/calaguas_cap21.pdf

poseen normalmente una carga eléctrica negativa situada sobre su superficie. Estas cargas llamadas cargas primarias, atraen los iones positivos del agua, los cuales se adhieren fuertemente a las partículas y atraen a su alrededor iones negativos acompañados de una débil cantidad de iones positivos.

Los iones que se adhieren fuertemente a la partícula y se desplazan con ella, forman la capa adherida o comprimida, mientras que los iones que se adhieren débilmente constituyen la capa difusa, por lo tanto hay un gradiente o potencial electrostático entre la superficie de la partícula y la solución, llamado Potencial Zeta. (ver figura2.)

Figura 2. Doble capa de una partícula coloidal



Propiedades de los coloides: Los coloides pueden estudiarse bajo una serie de propiedades. Las principales se presentan a continuación:

Propiedades cinéticas:

- Movimiento Browniano: movimiento constante e irregular de los coloides.
- Difusión: dispersión por alta energía cinética. Responde a la ley de Fick.

- Presión Osmótica: Presión hidrostática que iguala dos medios (agua y sistema coloidal). El paso de agua iguala las concentraciones en ambos medios separados por una membrana semipermeable.

Propiedades ópticas:

- Dispersión de la luz (efecto de Tyndall - Faraday): La dispersión de la luz es proporcional al tamaño de las partículas.
- Opalescencia: Las soluciones coloidales son incoloras generalmente. Sin embargo, algunas pueden ser coloreadas. Esto depende de la diseminación de la luz y a la adsorción selectiva bajo cierta longitud de onda.

Propiedades de superficie: La superficie específica de los coloides en general es muy alta ya que las partículas son muy pequeñas. Esto permite que tengan una gran capacidad de adsorción de sustancias.

Propiedades electrocinéticas:

En este sentido se dice que los coloides, en general, tienen carga eléctrica y por tanto pueden ser afectados por campos eléctricos. Estas cargas pueden explicarse por la presencia de imperfecciones en la superficie de la estructura reticular. Puede también existir ionización y por tanto la superficie de los coloides puede ionizarse (los grupos funcionales probables de sufrir ionización son: -OH, -COOH, -OPO₃H₂ y -SH) y por último puede haber adsorción preferencial de iones en la superficie de los coloides.

A bajos pH una carga positiva superficial prevalece. A altos pH prevalece la negativa y a pH intermedios podría haber un valor cero.”³

Estabilidad y desestabilización de los coloides: “Los coloides son normalmente estables en solución. En general, priman los factores estabilizantes sobre los desestabilizantes. Entre los factores estabilizantes se cuentan a todas las fuerzas o fenómenos que generan repulsión entre ellos y por tanto, las fuerzas electrostáticas y la hidratación son favorables. Las fuerzas de atracción, en cambio, cumplen un papel opuesto y desestabilizante. Entre ellas la gravedad, el movimiento Browniano y las fuerzas de Van der Waals. Obviamente algunos fenómenos afectan el sistema mucho más que otros. Por ejemplo la influencia de la gravedad es despreciable.

³ Disponible en internet: http://www.scribd.com/doc/25943804/Coloides_Soluciones-y-Emulsiones. Actualizado en abril 2014 o rev. 19 de noviembre 2014.

La estabilidad de una dispersión coloidal está relacionada con la teoría de la interacción energética entre las partículas como una función de su distancia. Además, las fuerzas electrostáticas de repulsión entre los coloides, pueden actuar las fuerzas de Van der Waals, que son fuerzas de atracción originadas por acción de dipolos permanentes o inducidos en las partículas. Las fuerzas de Van der Waals son independientes de la carga neta de los coloides y no varían con el pH o con otras características de la fase acuosa, pero sólo actúan a distancias muy pequeñas. Al acercarse dos partículas la fuerza de repulsión aumenta para mantenerlas separadas. Si se acercan lo suficiente y sobrepasan la barrera de energía, entonces la fuerza de atracción de Van der Waals predominará y las partículas podrán unirse. Cuando se obtiene esta condición se dice que el coloide se ha desestabilizado.”⁴

1.1.4 Tratamiento de aguas residuales: Una definición más sencilla es que la coagulación- floculación es un proceso en el cual las partículas se aglutinan en pequeñas masas con pesos específicos superior al del agua llamado “floc”.

“La coagulación y la floculación son métodos que se emplean para remover de las aguas residuales la materia coloidal y la suspendida (tamaño de 1 nm a 0,1 nm).

La estabilidad de la materia suspendida se debe a la repulsión entre partículas inducida por el alto potencial zeta (15 a - 20 mv). Esta materia no sedimenta fácilmente y no puede ser removida por métodos físicos convencionales.

Los aspectos fundamentales en este proceso, son:

- Desestabilización de los coloides debido a que disminuye el potencial zeta de las partículas mediante la adición de coagulantes.
- El transporte de las partículas dentro del fluido para que hagan contacto, generando puentes entre ellas y creando una malla tridimensional de coágulos porosos.
- El punto óptimo para la coagulación es cuando el potencial zeta alcanza el nivel bajo, que es cuando las fuerzas de Van der Waals predominan.

1.1.4.1 Coagulación: La palabra coagulación viene del latín coagulare que significa solidificar lo líquido, La coagulación entonces es un fenómeno de desestabilización de partículas coloidales, que se consigue por medio de la neutralización de sus cargas eléctricas negativas. Entonces, este proceso empieza

⁴ Disponible en internet:

http://www.bvcooperacion.pe/biblioteca/bitstream/123456789/3938/4/BVCI0003303_4.pdf.

Actualizado abril 2014.

en el mismo momento en que se agregan los coagulantes al agua y dura solamente instantes de segundo, esencialmente consiste en reacciones químicas y físicas entre los coagulantes, las partículas y el agua.

Coagulantes utilizados: Los componentes son productos químicos que al adicionar al agua son capaces de producir una reacción química con los componentes del agua, especialmente con la alcalinidad del agua para formar un precipitado voluminoso, muy adsorbente, constituido generalmente por el hidróxido metálico del coagulante que se está utilizando.

La selección del coagulante y la cantidad óptima de aplicación; se determina mediante los ensayos de laboratorio “Pruebas de Jarras”.

Para elegir el tipo adecuado de coagulante se debe tener en cuenta los siguientes factores:

- a. Naturaleza y calidad del agua bruta.
- b. Variaciones diarias de la calidad del agua, es importante la influencia de la temperatura.
- c. Empleo y destino del agua tratada y criterios de calidad.
- d. Grado de impureza del reactivo para el abastecimiento de agua potable para el humano.

Los reactivos químicos a los que se denominan coagulantes. Estos pueden ser:

a) Basados en Aluminio:

- Sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3 \cdot nH_2O$
- Polihidroxidocloruro de aluminio $Al_n(OH)_mCl_{3n-m}$
- Aluminato sódico $NaAlO_2$

b) Basados en Hierro:

- Sulfato férrico
- Cloruro férrico
- Sulfato ferroso

c) Basados en Calcio:

- Cloruro cálcico
- Hidróxido cálcico

d) Basados en magnesio:

- Cloruro de magnesio

Una vez que las partículas coloidales han sido desestabilizadas, ya pueden unirse o agregarse. También se usan reactivos químicos constituidos por polímeros. Dependiendo del monómero de partida y de su carga pueden ser:

a) No iónicos:

- ✓ Poliacrilamidas
- ✓ Polímeros del óxido de etileno

b) Aniónicos:

- ✓ Copolímero de acrilamida-acrilato
- ✓ Poliacrilamida parcialmente hidrolizada
- ✓ Polisulfónicos

c) Catiónicos:

- ✓ Polietilenamina
- ✓ Polimetacrilato
- ✓ Copolímeros de acrilamida con grupos amonio cuaternarios.

Estos polímeros suelen emplearse conjuntamente con los coagulantes, a excepción de casos tales como el espesamiento de fangos orgánicos en los que se usan polielectrolitos catiónicos, sin otra combinación.

Como se observa en la clasificación anterior, entre los coagulantes más comúnmente utilizados para desestabilizar las partículas y producir el floc se encuentran: sulfato de aluminio, aluminato de sodio, cloruro de aluminio, cloruro férrico, sulfato férrico, sulfato ferroso, polielectrolitos (Como ayudantes de floculación). Siendo los más utilizados las sales de aluminio y de hierro, cuando se adiciona estas sales al agua se producen una serie de reacciones muy complejas donde los productos de hidrólisis son más eficaces que los iones.

La floculación hace que se formen conglomerados de partículas coloidales de mayor tamaño cuando se establecen puentes químicos entre ellas, de esta manera forman estructuras fácilmente sedimentables que pueden removerse mediante sedimentación, flotación o filtración.

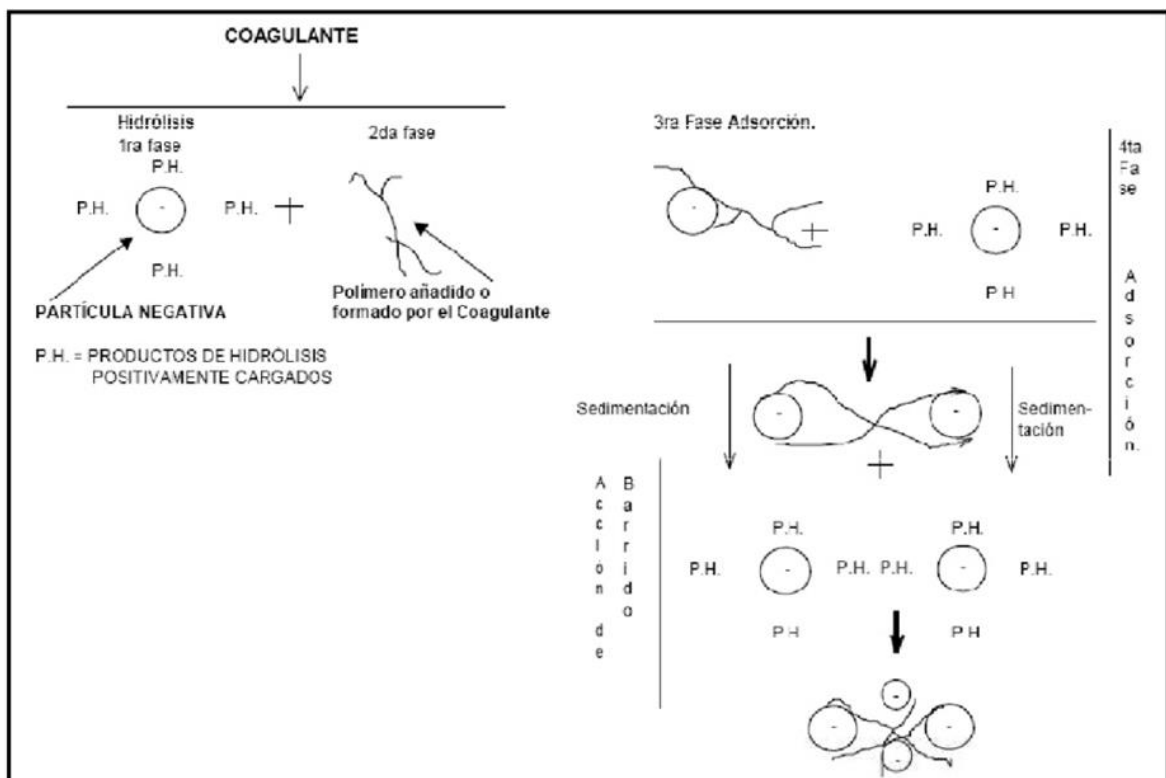
Cuando a la muestra que se va a sedimentar se adiciona un coagulante en una dosis menor a la óptima, no se forman flóculos ó, si se forman, son tan pequeños que le dan a la muestra una apariencia turbia. Si es al contrario, o sea, si el coagulante que se le añade es excesivo, se forma un flóculo muy denso pero frágil y esponjoso que se puede romper al agitar, lo que dificulta la sedimentación.

Un buen flóculo es de apariencia pesada y compacta, además de que inmediatamente después de haberle agregado el coagulante y agitarlo comienza a sedimentarse”⁵

Etapas o fases de la coagulación: “El proceso de coagulación se desarrolla en un tiempo muy corto (casi instantáneo), en el que se presenta las siguientes etapas.

- ✓ Hidrólisis de los coagulantes y desestabilización de las partículas en suspensión.
- ✓ Formación de Compuestos químicos poliméricos.
- ✓ Adsorción de cadenas poliméricas por los coloides.
- ✓ Adsorción mutua de coloides.
- ✓ Acción de barrido”⁶ (ver figura 3)

Figura 3. Etapas de la coagulación



⁵ MARTÍNEZ, Sergio. Parámetros de diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales. Universidad Autónoma Metropolitana, México 1999 pp:14

⁶ Etapas de la coagulación, <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsacd/scan/02554-coagulacion.pdf>

Factores que influyen en la coagulación.

Influencia del pH: “El pH es la variable más importante a tener en cuenta al momento de la coagulación, para cada agua existe un rango de pH óptimo para la cual la coagulación tiene lugar rápidamente, ello depende de la naturaleza de los iones y de la alcalinidad del agua.

El rango de pH es función del tipo de coagulante a ser utilizado y de la naturaleza del agua a tratar; si la coagulación se realiza fuera del rango de pH óptimo entonces se debe aumentar la cantidad del coagulante; por lo tanto la dosis requerida es alta.

Para sales de aluminio el rango de pH para la coagulación es de 6,5 a 8,0 y para las sales de hierro, el rango de pH óptimo es de 5,5 a 8,5 unidades.

Influencia de la temperatura del agua: La variación de 1°C en la temperatura del agua conduce a la formación de corrientes de densidad (variación de la densidad del agua) de diferentes grados que afectan a la energía cinética de las partículas en suspensión, por lo que la coagulación se hace más lenta; temperaturas muy elevadas desfavorecen igualmente a la coagulación.

Una disminución de la temperatura del agua en una unidad de decantación conlleva a un aumento de su viscosidad; esto explica las dificultades de la sedimentación de un floc.

Influencia de la dosis de coagulante: La cantidad del coagulante a utilizar tiene influencia directa en la eficiencia de la coagulación, así:

Poca cantidad del coagulante, no neutraliza totalmente la carga de la partícula, la formación de los microfloculos es muy escasa, por lo tanto, la turbiedad residual es elevada.

Alta cantidad de coagulante produce la inversión de la carga de la partícula, conduce a la formación de gran cantidad de microfloculos con tamaños muy pequeños cuyas velocidades de sedimentación son muy bajas, por lo tanto, la turbiedad residual es igualmente elevada.

Influencia de mezcla: El grado de agitación que se da a la masa de agua durante la adición del coagulante, determina si la coagulación es completa, turbulencias desiguales hacen que cierta porción de agua tenga mayor concentración de coagulantes y la otra parte tenga poco o casi nada; la agitación debe ser uniforme e intensa en toda la masa de agua, para asegurar que la mezcla entre el agua y el coagulante haya sido bien hecho y que se haya producido la reacción química de neutralización de cargas correspondiente.

En el transcurso de la coagulación y floculación, se procede a la mezcla de productos químicos en dos etapas: en la primera etapa, la mezcla es enérgica y de corta duración (60 seg, máx.) llamado mezcla rápida; esta mezcla tiene por objeto dispersar la totalidad del coagulante dentro del volumen del agua a tratar, y en la segunda etapa la mezcla es lenta y tiene por objeto desarrollar los microfloculos.

La mezcla rápida se efectúa para la inyección de productos químicos dentro de la zona de fuerte turbulencia, una inadecuada mezcla rápida conlleva a un incremento de productos químicos.”⁷

1.1.4.2 Floculación: “La floculación es el proceso que sigue a la coagulación, es decir después de la desestabilización, las partículas se unen para que el crecimiento ocurra; la floculación entonces consiste en la agitación de la masa coagulada que sirve para permitir el crecimiento y aglomeración de los floculos recién formados con la finalidad de aumentar el tamaño y peso necesarios para sedimentar con facilidad.

La rapidez con lo que esto ocurre va a depender del tamaño de las partículas en relación con el estado de agitación del líquido, la concentración de las mismas y su grado de desestabilización”.

Mecánica del proceso: Normalmente, la floculación se analiza como un proceso causado por la colisión entre partículas. En ella intervienen, en forma secuencial, tres mecanismos de transporte:

- ✓ Floculación pericinética o browniana: Se debe a la energía térmica del fluido, es un contacto por bombardeo de partículas producido por el movimiento del fluido (movimiento browniano) solo influye en partículas con tamaños menores al micrón.
- ✓ Floculación ortocinética o gradiente de velocidad: Se produce en la masa del fluido en movimiento. Se produce el contacto por turbulencia del líquido influye en partículas con tamaños mayores al micrón.
- ✓ Sedimentación diferencial: Se debe a las partículas grandes, que, al precipitarse, colisionan con las más pequeñas, que van descendiendo lentamente, y ambas se aglomeran.

⁷ Factores que influyen en la coagulación, <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsacd/scan/02554-coagulacion.pdf>

Camp y Stein fueron los primeros en determinar que para fines prácticos, era necesario añadirle turbulencia al proceso y generalizaron la ecuación de Smoluchowski para incluir las condiciones de flujo turbulento.”⁸

1.1.5 Pruebas de tratabilidad.

1.1.5.1 Floculadores hidráulicos: La energía de los floculadores hidráulicos proviene de la agitación de una masa líquida. Estos floculadores consisten en tanques construidos con pantallas donde se producen turbulencias en cada cambio de dirección de flujo y la velocidad con la que el agua circula es la misma.

Pueden ser de flujo horizontal o vertical los primeros son aquellos que el agua se mueve realizando un giro de 180° al final de tabiques, los segundos son donde el agua se mueve de arriba a abajo en condiciones similares, de flujo vertical también están los floculadores de Alabama con el cual cada cámara lleva un codo que impulsa el agua hacia arriba y la vuelve a tomar en el fondo.

1.1.5.2 Floculadores mecánicos: Los floculadores mecánicos son aquellos que requieren de una fuente de energía externa que mueva un agitador en tanques, en donde el agua permanezca un tiempo teórico de detención t_d .

Según el sentido del movimiento del agitador se clasifican en:

Giratorios: pueden ser de eje horizontal o vertical, los de baja velocidad de rotación son montados con paletas y de alta velocidad de rotación con turbinas. La energía comunicada al agua es directamente proporcional a la energía con la que se desplaza las paletas.

Reciprocantes: consisten en una parrilla de madera que suben y bajan alternativamente, o en sistemas oscilantes que van o vienen dentro del tanque. La energía comunicada al agua es directamente proporcional a la energía con la que se desplaza el elemento mecánico dentro de ella. (Ver tabla1)

⁸ Floculación,

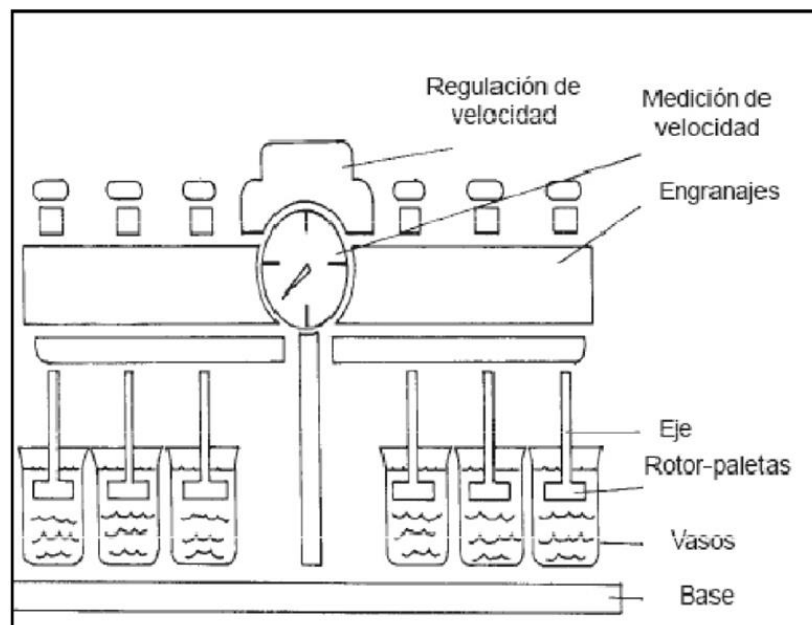
<http://www.digital.unal.edu.co/dspace/bitstream/10245/1511/1/nestoralejandrogomezpuentes.2005.pdf>

Tabla 1. Tipos de floculadores

Según la energía de agitación	Según el sentido de flujo	Descripción	Nombre	
Hidráulicos	Flujo Horizontal	Con tabiques de ida y regreso	De tabiques	
	Flujo Vertical	Con tabiques arriba y debajo del tanque		Alabama
		Con codos en el fondo que proyectan el agua hacia arriba	Cox	
		Con entrada lateral al tanque		
Mecánicos	Rotatorios	De paletas de eje horizontal o vertical	De paletas	
		De turbinas horizontales o verticales	De turbinas	
	Reciprocantes	Rejas o cintas oscilantes	Reciprocantes	
Hidromecánicos	Flujo Horizontal	De turbinas Pelton y paletas horizontales	Hidromecánicos	

1.1.5.3 Prueba de Jarras: “Es un método de simulación de los procesos de coagulación y floculación, realizado a nivel de laboratorio que permite obtener agua de buena calidad, fácilmente separable por decantación; los flóculos formados con diferentes dosis del coagulante dan como resultado valores de turbiedad diferentes. G. W. Fuller, J. Cairol y E. Theirault son precursores de la Prueba de Jarras como modelo predictivo. (Ver figura 4)

Figura 4. Equipo de Jarras



Descripción del equipo de Prueba de Jarras: El equipo de Prueba de Jarras permite elaborar ensayos de simulación de procesos. Aunque no es un requisito indispensable, estas pruebas, en la mayor parte de los casos, son realizadas en equipos comerciales y uno de los más conocidos es el equipo de velocidad variable fabricado por la Phipps & Bird, para el cual se han desarrollado los ábacos que relacionan el gradiente de velocidad con la velocidad de rotación de las paletas

Normalmente estos equipos constan de los siguientes elementos:

- ✓ Un agitador mecánico provisto con tres a seis paletas, capaz de operar a velocidades variables (de 0 a 100 revoluciones por minuto; actualmente pueden obtenerse equipos que operan con velocidades de hasta 400 revoluciones por minuto).
- ✓ Un iluminador de flóculos localizado en la base del agitador del equipo.
- ✓ Vasos de precipitado de 2 l de capacidad, de cristal refractario

Sistema de dosificación: Las unidades de agitación múltiple usadas en las pruebas de coagulación deben ser equipadas con las facilidades necesarias para la adición de coagulantes químicos en forma rápida y simultánea a cada vaso o jarra. Este equipo es importante cuando una sola persona realiza la prueba.

La mayoría de los equipos comerciales olvidan este detalle, que es la causa de muchos resultados erróneos. Los estudios muestran que las diferencias que existen en el tiempo de adición de los reactivos químicos de las soluciones a los diferentes vasos pueden afectar significativamente los resultados, particularmente cuando se usan ayudantes de coagulación. También, puede alterar los resultados la velocidad de adición, que debe ser lo más rápida posible.

La práctica usual de adicionar coagulantes a cada vaso mediante el uso de una pipeta graduada no puede ser desechada en forma radical, pero la velocidad de adición del reactivo químico es muy lenta y pueden presentarse diferencias considerables en el tiempo de adición y en la rapidez requerida para avanzar con la dosificación.

Una manera simple de evitar estas dificultades es medir las cantidades de coagulante que se van a aplicar a cada jarra con una pipeta y verterlo en vasitos, de los cuales se succiona mediante jeringas hipodérmicas desechables, provistas de su aguja. Se llena cada jeringa con la dosis respectiva, se retira la aguja y se la coloca delante la jarra correspondiente, en un soporte de madera especialmente

acondicionado que se instala en el puente superior del equipo, en el cual se han horadado de 6 a 12 agujeros en los que se colocan las jeringas hipodérmicas. Al momento de aplicar el coagulante, con el equipo funcionando y programado con los tiempos y gradientes adecuados, se aplasta una banda de madera que presiona los émbolos de todas las jeringas lo más rápido posible (máximo: 5 segundos).

Esto permite la aplicación simultánea e instantánea en todas las jarras. Este equipo auxiliar permite que una sola persona ejecute toda la Prueba. Si no se dispone de este equipo, se requiere de por lo menos tres personas para efectuar una aplicación correcta, considerando que cada una aplica a dos jarras, una de ellas da la voz indicando el tiempo de inicio de la prueba y la otra acciona el equipo.

En general, se recomienda aplicar la dosis de coagulante muy cerca del agitador, con el equipo operando con el gradiente de mezcla y aplicando exactamente lo que se debe efectuar en el mezclador de la planta. Los equipos de Prueba de Jarras automáticos, que permiten velocidades de hasta 300 revoluciones por minuto, son ideales para efectuar simulación de procesos, y en ellos la bondad de los resultados depende mucho de la exactitud con la que se ejecuta la prueba. Utilizando estos equipos y estatores o deflectores en las jarras, se pueden obtener gradientes dentro del rango recomendable para mezcla rápida, con tiempos tan breves como 5 segundos, al cabo de los cuales el equipo automáticamente cambia para el gradiente de floculación programado.

Sistema de agitación: La variable que más importancia tiene en la Prueba de Jarras es la intensidad de agitación expresada como gradiente de movimiento del agua. Se utilizan paletas o rotores, accionados en forma mecánica o magnética, y pueden utilizarse una o más paletas. (Ver tabla 2.)

Tabla 2. Tipo de paleta

Tipo de Paleta	Número d Paleta	Diámetro (cm)	Área proyectada (cm)	Observaciones
Plana -1	2	7 y 6	17,5	Utilizada en el modelo Phipps y Bird
Plana -2	2	7,2	28,8	Tipo impulsor marino
Plana -3	2	7,2	18,4	Utilizada por Florida 1-Environmental specialities.

Hélice	3	5,0	4,50	Utilizada por Florida 2-Environmental specialities.
Doblada	2	5,0	2,8	

Características de agitadores: Cuando no se utilizan estatores, es necesario elevar la velocidad a valores superiores a los que normalmente operan los equipos. La inercia producida durante el ensayo de floculación ocasiona la formación de un helicoide que afecta el proceso y que se evidencia en una disminución de la eficiencia en el ensayo de sedimentación. Por esta razón, se recurre al uso de estatores o deflectores fijos de tipo continuo o discontinuo.

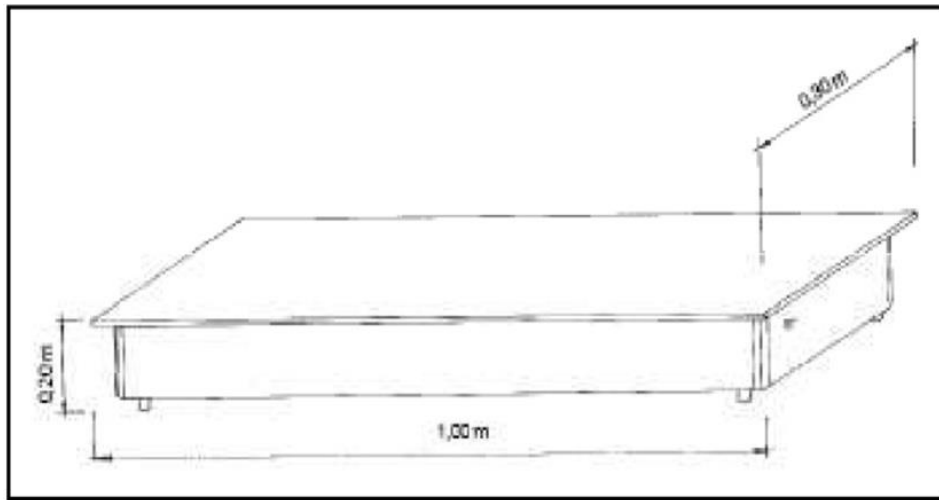
Descripción de las jarras: Las jarras o vasos que se van a usar deben poder ser acomodados en el aparato y tener 2.000 ml de capacidad; en caso de no tenerse vasos de este tamaño, podría optarse por vasos de 1.000 ml. Se debe evitar usar vasos más pequeños debido a la dificultad en la adición de pequeños volúmenes de coagulantes y ayudantes para obtener muestras satisfactorias del agua sedimentada. Podrían usarse botellas cuadradas, pero antes deben asegurarse las modificaciones producidas por cambio de secciones para el cálculo de gradientes.

En lo posible, debe evitarse el lavado de las jarras con detergentes, ya que muchos tienen compuestos aniónicos que son fuertemente absorbidos por las paredes de las jarras de vidrio. Si estos no son completamente removidos, pueden afectar los resultados de las pruebas en forma significativa.

Para el diseño de las jarras se debe tener en cuenta un factor de seguridad de 0,15 para evitar que se derrame el líquido.

Iluminación: Para observar el flóculo formado en los vasos, es conveniente, aunque no esencial, una buena iluminación. Idealmente, los vasos deben estar provistos con una base blanca y una iluminación en ángulo recto a la dirección del observador; por ejemplo, arriba o abajo de los vasos. (Ver figura5.)

Figura 5. Base iluminada



Se deben evitar fuentes de luz que generen mucho calor y con un efecto significativo en la coagulación y sedimentación, lo que ocasiona diferencias de temperaturas entre el agua del modelo y la realidad. Ello redundará en la obtención de resultados erróneos.

1.1.5.4 Precauciones y limitaciones: Con la Prueba de Jarras se trata de reproducir las condiciones en las cuales se desarrollan los procesos de floculación y sedimentación en la planta de tratamiento. Sin embargo, dado el pequeño volumen (1 l a 2 l) que tienen los vasos de precipitado, en comparación con el gran volumen de los tanques de floculación reales, la Prueba de Jarras constituye una reproducción parcial del proceso.

Las razones para esto son de orden físico y químico, y, entre otras, son las siguientes:

En los reactores existe un flujo continuo; en cambio, en las jarras no hay flujo.

Esto hace que en los primeros la masa de agua sufra un tratamiento desigual, debido a que parte de ella queda retenida durante largo tiempo, mientras que otra parte pasa casi de inmediato. En cambio, en la Prueba de Jarras, el agua queda retenida durante todo el tiempo que dura el ensayo (reactor del tipo de tanda o cochada).

La escala de las jarras no guarda relación con la escala del flóculo, por cuanto este se produce a escala natural y, en cambio, las jarras son cientos de veces más pequeñas que los floculadores. Por tanto, la proporción entre la escala de la

turbulencia que se produce en uno y otro caso y el tamaño del flóculo es diferente, lo que afecta la velocidad de aglutinamiento de las partículas.

La dosificación de los coagulantes y la agitación de la masa de agua pueden ser mucho mejor controladas en la Prueba de Jarras que en la planta de tratamiento.

No obstante estas deficiencias, la Prueba de Jarras sigue siendo el método más usual para controlar los factores químicos involucrados en los procesos de coagulación y floculación. Hay que tener en cuenta, sin embargo, que el hecho de que la Prueba de Jarras sea un ensayo rutinario en la operación de las plantas no significa que pueda ejecutarse descuidadamente, lo que, por desgracia, suele ser bastante común.”⁹

1.1.5.5 Obtención de resultados: “Podría preguntarse entonces, qué es lo que mide, y qué resultados se obtienen con este ensayo. Considerable número de determinaciones se pueden realizar, de orden cualitativo y otras, cuantitativo. Se describe algunas:

Observación visual. Es la que más comúnmente se hace. Consiste simplemente en observar la forma como se desarrolla el floc en cada una de las jarras, escogiendo aquella que produzca el floc más grande, de mayor velocidad de asentamiento aparente, y que deje ver un agua más cristalina entre las partículas coaguladas.

La comparación de los tamaños del floc no es fácil. Algunos prefieren estimarlo en milímetros en forma muy aproximada. Otros prefieren usar el Índice de Willcomb (ver tabla 3)

Tabla 3. Índice de Willcomb

Número de Índice	Descripción
0	Floc coloidal. Ningún signo de aglutinación
2	Visible. Floc muy pequeño, casi imperceptible para un observador no entrenado
4	Disperso. Floc bien formado pero uniformemente distribuido. (sedimenta muy lentamente o no sedimenta)
6	Claro. Floc bien de tamaño relativamente grande pero que se precipita con lentitud

⁹ Prueba de Jarras, <http://oms.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/manuall/tomoll/once.pdf>

8	Bueno. Floc que se deposita fácil pero no completamente
10	Excelente. Floc que se deposita todo dejando el agua cristalina

Las observaciones visuales de este tipo son cualitativas y dependen, por eso, grandemente del criterio de quien hace los ensayos.

Tiempo de formación del floc.- Determinar en segundos el tiempo que tarde en aparecer el primer indicio de formación de floc, es uno de los sistemas para cuantificar la velocidad de la reacción. La iluminación de la base del agitador ayuda en esta determinación, la que ni aún así suele ser fácil, pues el floc cuando recién se forma suele ser incoloro. Por otra parte, el floc que se forma más rápido no necesariamente es el mejor. Cuando no se puede iniciar la coagulación simultáneamente en todas las jarras, debe tornarse con un cronómetro los tiempos en que se aplicaron los coagulantes a cada una.

Volumen del floc sedimentado.- Otra medida muy simple de hacer es verter en un cilindro graduado el agua coagulada, y medir al cabo de 24 horas la cantidad de lodos depositados. Cuando la muestra es bastante turbia o cuando proviene de una carpeta de lodos, se puede obtener una idea del porcentaje de sedimentos no compactados que se pueden esperar o concentración de sólidos en la suspensión. Con aguas ligeramente turbias la lectura del volumen de lodos se hace muy difícil.

Cantidad de coagulante residual.- Es una prueba muy útil para estimar la sobredosis de coagulantes, en especial cuando se usa sulfato de aluminio. Se ejecuta pipeteando 50 ml del sobrenadante de las Pruebas de Jarras, después de haber dejado sedimentar el agua por una o dos horas. Se determina el Al³⁺ en las porciones de 50 ml. El aluminio es soluble en proporción de un 0,2 a 0,4 mg/l por tanto cantidades mayores son indicativas de un exceso de coagulantes. Este ensayo suele hacerse rutinariamente con el agua sedimentada en las plantas de tratamiento pero rara vez en las Pruebas de Jarras, no obstante que puede ser útil sobre todo para la comparación entre dos dosificaciones, que producen aparentemente resultados similares. No debe dicho ensayo, por supuesto, tomarse como decisivo, puesto que no siempre la dosis que produce la más completa precipitación del coagulante residual, es la que produce la mejor floculación, principalmente cuando las cantidades que se usan son bajas.

Control del pH y la alcalinidad.- Es aconsejable medir el pH y la alcalinidad antes y después del proceso de coagulación, debido a la importancia que estos factores tienen en la economía del tratamiento.

Turbiedad residual.- Las observaciones visuales para estimar el tamaño y calidad del Floc en las jarras, en realidad, dicen poco sobre la eficiencia y rapidez con que

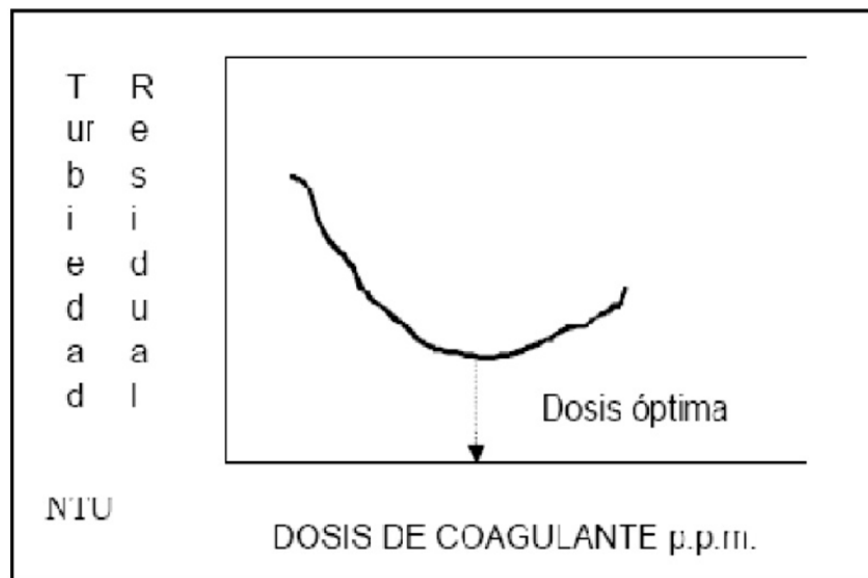
se ha producido la clarificación del agua. Es por eso conveniente tomar el sobrenadante que se produce después de 30-60 min. de periodo de sedimentación extrayendo 20 – 50 ml. de muestra a 4-5 cm de profundidad desde la superficie. Para esta operación se puede usar una pipeta volumétrica de 100 ml o construir un sifón con tubo de vidrio de 1,5 mm de diámetro interno. La muestra así extraída se puede analizar en dos formas:

Directamente midiendo la turbiedad con un turbidímetro fotoeléctrico (preferible que el de comparación visual). Filtrando la muestra del sobrenadante en papel de filtro Whatman No. 40 o similar y midiendo la turbiedad del agua filtrada. Este ensayo trata de reproducir cuidadosamente el proceso de sedimentación y filtración de la planta de tratamiento. Debe tenerse en cuenta, sin embargo, que las características del vaso de precipitado son bien distintas a las del sedimentador, y que el papel de filtro es una simple malla que guarda muy poca relación con el medio granular del filtro.

Por lo general, este ensayo se realiza para la determinación de la dosis óptima de los coagulantes y floculantes, donde los resultados de turbiedad obtenidos en las diferentes jarras para dosis variables de coagulantes son graficados, colocando los valores de turbiedad en el eje "Y" y la dosis en el eje "X".

La dosis óptima se obtiene en el punto de inflexión, que es el punto más bajo de la curva. (Ver figura 6) ¹⁰

Figura 6. Dosificación óptima



¹⁰ Disponible en internet, <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan/002320/002320-02a.pdf>.
Actualización abril 2014

1.1.6 Diseño del sistema de agitación

1.1.6.1 Agitación: “Es una operación mecánica que consiste en realizar movimientos violentos e irregulares en el seno de una masa fluida o que se comporte como tal para obtener una mezcla homogénea, es decir mantener la concentración constante en todas las partes de la masa. Mediante esta operación se consigue la introducción de energía en el volumen del fluido, o sea, que la energía cinética que posee el impelente se transfiere al fluido provocando su movimiento. Los impelentes utilizados con este objetivo pueden ser clasificados por el flujo que inducen en el tanque agitado como impelentes de flujo axial y de flujo radial. Entre los impelentes de flujo radial el más utilizado industrialmente es la turbina de disco con paletas planas.

Los tanques agitados, por su parte, han sido utilizados históricamente en la industria alimenticia, la química y la biotecnológica, constituyendo el tipo de reactor utilizado por excelencia. Este hecho constituye la causa fundamental de que en la actualidad se continúen las investigaciones básicas sobre la hidrodinámica en este tipo de reactor.”¹¹

1.1.6.2 Funciones de la agitación: “Las distintas funciones que la agitación puede desempeñar se clasifican en cinco operaciones básicas:

- Definición: Mezcla de fluidos solubles
- Objetivos: Equilibrio de gradiente de temperatura

Equilibrio de gradiente de concentración

- Ejemplos: Neutralizaciones ácido/base

Diluir disoluciones de alta concentración

Mezcla de fluidos con temperaturas distintas

Distribución de polímeros en suspensiones para floculación

a) Suspensión de un sólido en un líquido

- Definición: Distribuir un sólido disperso en un fluido

¹¹ BRITO H, Texto Básico de Operaciones Unitarias I, Segunda Edición, Copywrite 2006.

- Objetivo: Mantener los sólidos en suspensión
- Conseguir una distribución homogénea
- Disolver sólidos
- Ejemplos: Procesos de cristalización

b) Emulsión de dos fluidos insolubles

- Definición: Dispersar un fluido en otro fluido, siendo éstos insolubles entre sí.
- Objetivos: Aumentar la superficie específica de uno de los fluidos
- Ejemplos: Emulsión-polimerización

Extracción líquido-líquido

c) Dispersión de un gas en un líquido

- Definición: Dispersar un gas en un fluido
- Ejemplos: Reacciones gas-líquido

Fermentaciones aerobias

Aporte de oxígeno en estanque aireado (depuración).

d) Intercambio de calor

- Definición: Favorecer el intercambio de calor entre fluido y superficie de fluidos a distinta temperatura
- Ejemplos: Eliminación del calor de reacción

Disminución de la viscosidad de un fluido gracias al calentamiento

Con frecuencia un mismo equipo de agitación realiza varias de estas operaciones básicas simultáneamente, pero es conveniente instalar mezcladores agitadores que pueden llevar a cabo la agitación en el sentido deseado, con el menor consumo energético posible. Para ello, existe en el mercado gran variedad de agitadores, con distintas características y funciones.

1.1.6.3 Reseña histórica de los agitadores: El primer agitador industrial fue usado hace unos cien años en una planta de fertilizantes. Se trataba de una hélice marina. Más adelante se inventaron agitadores de forma muy diversa, con geometría escogida a menudo más por su estética que por su eficiencia.

Es solo a partir de los años 50 que se empezó a investigar las relaciones entre la herramienta de agitación y su resultado concerniente al grado de mezclado.

Hoy en día se entienden las reglas fundamentales de funcionamiento y de desempeño de los agitadores industriales.

Sin embargo, se siguen las investigaciones para comprender en detalles las transferencias de cantidad de movimiento, masa y calor producidas por los muy variados métodos de inducción de la agitación, a saber: rotación, vibración, bombeo, flujo restringido, chorro, burbujeo, ultrasonido, etc. Las investigaciones se han realizado en dos direcciones principales: de un lado hacia la creación y el desarrollo de nuevos sistemas y aparatos, y del otro lado hacia la cuantificación de la calidad de la mezcla.¹²

1.1.6.4 Equipo de agitación: Los líquidos se agitan con más frecuencia en tanques o recipientes, generalmente de forma cilíndrica y provista de un eje vertical. La parte superior del recipiente puede estar abierta al aire o cerrada. Las proporciones del tanque varían bastante dependiendo de la naturaleza del problema de agitación.

1.1.6.5 Tipos de rodetes: Los agitadores de rodete se dividen en dos clases: los que generan corrientes paralelas al eje del rodete, y aquellos que generan corrientes en dirección tangencial o radial. Los primeros reciben el nombre de *rodetes de flujo axial*, y los segundos *rodetes de flujo radial*.

Los tres principales tipos de rodetes son hélices, palas y turbinas. Otros rodetes especiales resultan también útiles en situaciones particulares, pero los tres tipos principales mencionados resuelven tal vez el 95% de todos los problemas de agitación de líquidos.

a) Hélice. Una hélice es un rodete con flujo axial y alta velocidad que se utiliza para líquidos de baja viscosidad. Las hélices pequeñas giran con la misma velocidad que el motor, entre 1150 y 1750 rpm; las grandes giran entre 400 y 800 rpm. Las corrientes de flujo que salen del rodete continúan a través del líquido en una dirección determinada hasta que chocan con el fondo o las paredes del

¹² Disponible en internet <http://www.firp.ula.ve/archivos/curso/Agitacion.pdf>. Actualización abril 2014.

tanque. La columna, altamente turbulenta, de remolinos de líquido que abandona el rodete, arrastra al moverse líquido estancado, probablemente en mayor proporción que lo haría una columna equivalente procedente de una boquilla estacionaria. Las placas de un rodete cortan o cizallan vigorosamente el líquido.

Debido a la persistencia de las corrientes de flujo, los agitadores de hélice son eficaces en tanques muy grandes. Una hélice giratoria traza una hélice en el fluido y, si no hubiese deslizamiento entre el fluido y la hélice, una revolución completa provocaría el desplazamiento longitudinal del líquido una distancia fija, dependiendo del ángulo de inclinación de las palas de la hélice. La relación entre esta distancia y el diámetro de la hélice se conoce como *paso de hélice*. Una hélice con un paso de 1,0 se dice que tiene *paso cuadrado*.

Las más frecuentes son las hélices marinas de tres palas con paso cuadrado, para fines especiales se utilizan hélices de cuatro palas, ruedas dentadas y otros diseños. Las hélices raramente superan las 18 pulgadas de diámetro, con independencia del tamaño del tanque.

En tanques profundos pueden instalarse dos o más hélices sobre el mismo eje, generalmente dirigiendo el líquido en la misma dirección. A veces, dos hélices operan en direcciones opuestas, o en «pushpull», con el fin de crear una zona de turbulencia especialmente elevada entre ellas.

b) Paletas. Para los problemas más sencillos, un agitador eficaz consta de una pala plana que gira sobre un eje vertical. Son frecuentes los agitadores de dos y cuatro palas. A veces las palas están inclinadas, pero lo más frecuente es que sean verticales. Las palas giran a bajas o moderadas velocidades en el centro del tanque, impulsando el líquido radial y tangencialmente, sin que haya prácticamente movimiento vertical excepto que las placas están inclinadas.

Las corrientes que generan se desplazan hacia fuera hasta la pared del tanque y después hacia arriba o hacia abajo. En tanques profundos se instalan varias palas, unas sobre otras, en un mismo eje. En algunos diseños las placas se adaptan a la forma de las paredes del tanque, de forma que rascan la superficie y pasan sobre ella con una muy pequeña holgura. Una pala de este tipo recibe el nombre de **agitador de áncora**. Las áncoras resultan útiles para prevenir que se depositen sólidos sobre una superficie de transmisión de calor, tal como un tanque encamisado, pero en cambio son malos mezcladores. Casi siempre operan conjuntamente con un agitador de alta velocidad que generalmente gira en sentido contrario.

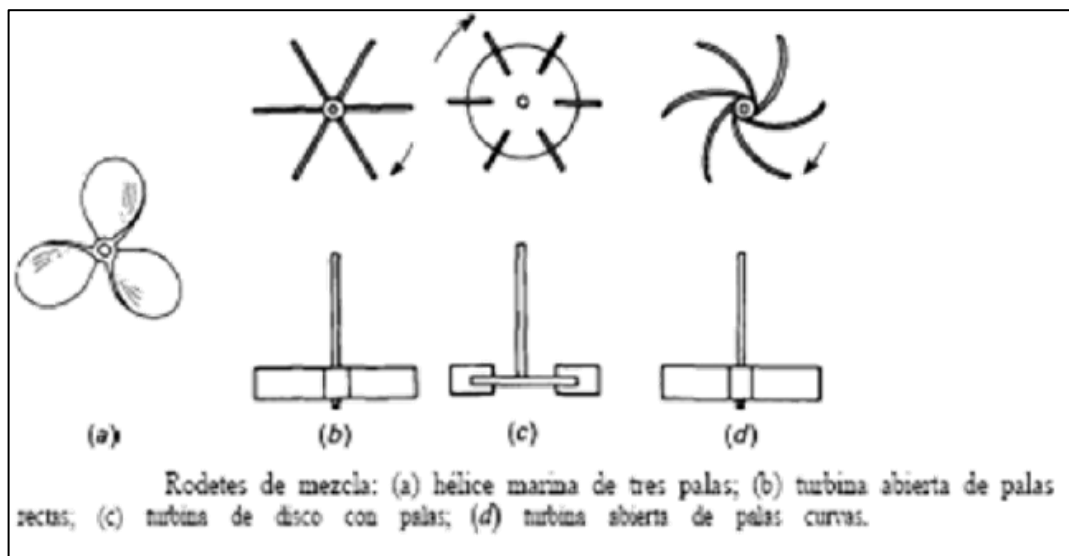
Los agitadores industriales de palas giran a velocidades comprendidas entre 20 y 150 rpm. La longitud total de un rodete de palas está típicamente comprendido entre el 50% y el 80% del diámetro interior del tanque. La anchura de la pala es de un sexto a un décimo de su longitud. A velocidades muy bajas los agitadores

de palas generan una agitación muy suave en tanques sin placas deflectoras, las cuales son necesarias para velocidades más elevadas, pues de lo contrario el líquido se desplaza en bloque alrededor del tanque con velocidad alta, pero con poca mezcla.

c) Turbinas. La mayoría de ellos recuerdan a los agitadores con numerosas palas cortas, que giran a altas velocidades sobre un eje montado centralmente en el tanque. Las placas pueden ser rectas o curvas, inclinadas o verticales. El rodete puede ser abierto, semicerrado o cerrado.

El diámetro del rodete es menor que el de las palas, variando entre el 30% y el 50% del diámetro del tanque. Las turbinas son eficaces para un amplio intervalo de viscosidades. En líquidos de baja viscosidad las turbinas generan fuertes corrientes que persisten en todo el tanque, destruyendo bolsas de fluido estancado. Cerca del rodete hay una zona de corrientes rápidas, de elevada turbulencia e intensa cizalladura. Las corrientes principales son radiales y tangenciales. Los componentes tangenciales inducen la formación de vórtices y remolinos, que deben ser destruidos por placas deflectoras o por un anillo difusor para que la agitación sea más eficaz” (ver figura7)

Figura 7. Tipos de rodetes



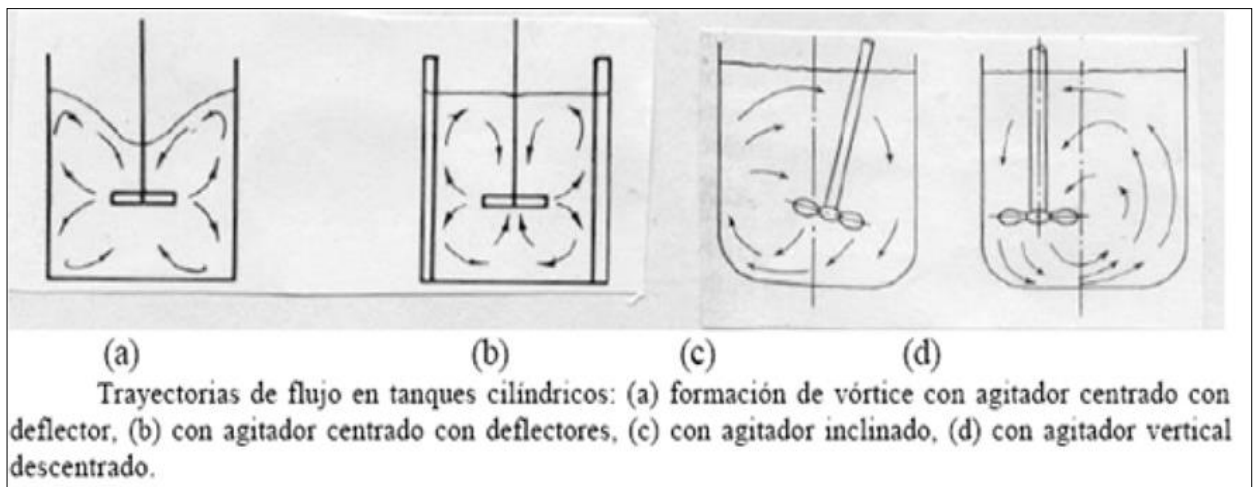
1.1.6.6 Trayectorias del flujo en la agitación: Cualquiera que sea el tipo de impulsor propulsor seleccionado éste debe crear condiciones turbulentas dentro de la corriente móvil del fluido. La velocidad de un líquido en un tanque agitado tiene 3 componentes:

- uno radial que actúa en una dirección perpendicular al eje

- una longitudinal que actúa paralela al eje y
- una rotacional que actúa en dirección tangencial al círculo de rotación del eje.

Las dos primeras componentes generalmente contribuyen al mezclado pero la tercera puede no hacerlo. Cuando los impulsores-agitadores se montan verticalmente en el centro del tanque, casi siempre se desarrolla una trayectoria de flujo circular tipo remolino, que desarrolla un vórtice y que atrapa aire, lo cual es indeseable generalmente. (Ver figura 8)

Figura 8. Trayectorias de flujo en tanques cilíndricos



1.1.6.7 Formas de evitar remolinos:

Colocando el agitador fuera del eje central del tanque. En tanques pequeños se debe colocar el rodete separado del centro del tanque, de tal manera que el eje del agitador no coincida con el eje central del tanque. En tanques mayores el agitador puede montarse en forma lateral, con el eje en un plano horizontal, pero no en la dirección del radio.

Instalando placas deflectoras. Estas son placas verticales perpendiculares a la pared del tanque. En tanques pequeños son suficientes 4 placas deflectoras, para evitar remolinos y formación de vórtice. El ancho de las placas no debe ser mayor que un doceavo del diámetro del tanque. Cuando se usan agitadores de hélice, el ancho de la placa puede ser de un octavo del diámetro del tanque. Si el eje del agitador está desplazado del centro o inclinado, no se necesitan placas deflectoras.

Cuando no se presentan remolinos, el tipo de flujo específico depende del tipo de rodete:

Los agitadores de hélice impulsan el líquido hacia el fondo del tanque, desde donde la corriente se extiende subiendo por las paredes y retornando hacia la hélice. Se emplean cuando se desean intensas corrientes verticales, por ejemplo para mantener en suspensión partículas sólidas pesadas. No se emplean cuando la viscosidad del líquido es superior a los 5.000 centipoises.

Los agitadores de paletas producen un flujo radial intenso en el plano próximo a las palas, pero prácticamente no dan lugar a corrientes verticales. Estos agitadores no son eficaces para mantener sólidos en suspensión.

Los agitadores de turbina impulsan al líquido radialmente contra las paredes laterales del tanque, desde donde la corriente se divide, una parte fluye hacia arriba y otra parte hacia el fondo, retornando ambas al rodete. Por lo que producen dos corrientes de circulación separadas. Dan excelentes resultados en la mezcla de líquidos que tienen aproximadamente la misma densidad relativa.”¹³

El “Jar-Test” (Prueba de Jarras) aún es el método más utilizado y el más útil para evaluar el proceso de coagulación-floculación y sus efectos en las fases subsiguientes del tratamiento como en la decantación y filtración.

Son diversas las informaciones que pueden obtenerse con el uso adecuado del aparato de “Jar-Test”, entre ellas: determinación de la dosis óptima de coagulante y otros reactivos, concentración óptima, intensidad, secuencia de aplicación de los reactivos, tiempo de floculación, etc.

Informaciones como éstas son importantes para el proyecto de una nueva planta de tratamiento o para la operación normal, la optimización o la ampliación de una existente. Se especifican algunos procedimientos de “Jar-Test” que permitirán obtener fácilmente los datos que se necesitan, sean éstos para la operación o para el proyecto de una planta de tratamiento de agua. La determinación de las dosis de coagulante requeridas, auxiliares de coagulación, etc., es el uso más común de un equipo de Jar-test.

¹³ Dimensionamiento de sistemas de agitación,
<http://www.unizar.es/dctmf/jblasco/AFTAgitacion/index.htm>

2. DESCRIPCIÓN DEL NUEVO EQUIPO DE PRUEBA DE JARRAS EN EL LABORATORIO DE HIDRAULICA Y SANEAMIENTO BASICO DE LA UNIVERSIDAD DE NARIÑO.

Características del equipo de Prueba de Jarras:

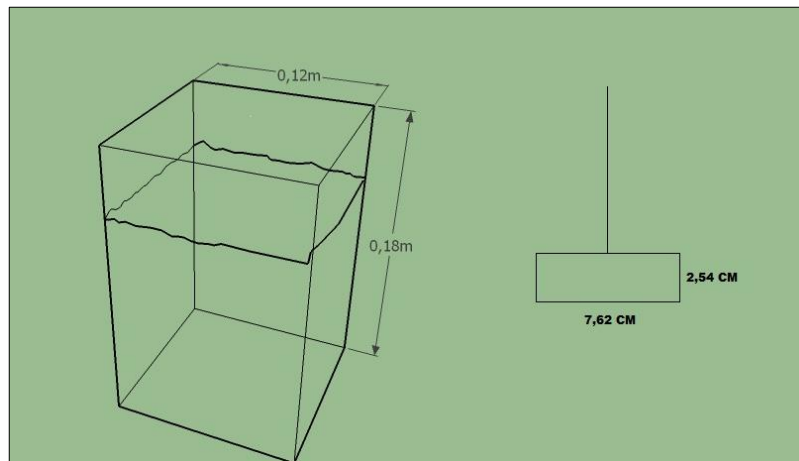
- 6 puestos con vasos de 2000 mililitros
- Ciclo de tiempo programable de 0-99 min,59seg y alarma de terminación de ciclo
- Velocidad variable de 20-300 rpm hasta tres ciclos continuos pre-programados por el usuario
- Transmisión de movimiento por piñón, igual velocidad en todas las aspas.
- Programación manual y automática, de alta a baja velocidad y viceversa.
- Visualización de velocidad en LCD. Control digital por teclado
- Nivel de precisión ± 1 RPM
- Lámpara fluorescente de 60 watts. 120 voltios (interruptor independiente)
- Aspas de acero inoxidable, altura fácil de graduar
- Estructura construida en poli-estireno de ¼", alta resistencia mecánica y térmica.
- Línea de voltaje. 120 A.C. fusible de 1.5amp.
- Equipo automático controlado por microprocesador, iluminación inferior, interruptor on/off, requerimiento eléctrico 110vol (incluye vasos de 1000ml en vidrio). (Ver Figura 9)
- Excelente para pruebas de campo por su poco peso (9 kg)
- Potencia del motor 70 watts ¹⁴ (ver figura 9 y figura 10)

¹⁴ Yareth químicos, soluciones para laboratorio, floculador equipo para Test-Jarras de 6 puestos. Pág. 1-2

Figura 9. Floclador equipo Prueba de Jarras MD. Y-FL6 del laboratorio de hidráulica y saneamiento básico de la Universidad de Nariño, utilizado en esta investigación



Figura 10. Forma y medidas de las Jarras y paletas del equipo de Prueba de Jarras MD. Y-FL6 del laboratorio de hidráulica y saneamiento básico de la Universidad de Nariño, utilizado en esta investigación.



3. DISEÑO DE ABACOS QUE RELACIONA LOS GRADIENTES DE VELOCIDAD (G) CON LAS REVOLUCIONES POR MINUTO (RPM)

Un parámetro importante en los procesos de coagulación - floculación es el gradiente de velocidad (G), el gradiente de velocidad en un líquido depende de la cantidad de energía transferida al fluido y de la viscosidad de este; además está afectada por la velocidad rotacional del agitador, por la geometría del recipiente y las paletas del agitador.

El gradiente de velocidad medio en un volumen dado de agua está dado por:

- La potencia transferida por el dispositivo de mezclado por unidad de volumen
- La viscosidad dinámica

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}}$$

[1]¹⁵

Donde,

P= potencia transferida (watts)

V= volumen (m³)

μ= viscosidad dinámica (N.m/s²)

- La potencia transferida se calcula a partir de la fórmula:

$$P = K_T * \rho * N^3 * D^5$$

[2]¹⁶

Donde,

K_T: Constante de agitación adimensional para las paletas

ρ: Densidad del líquido a la temperatura de trabajo

N: Revoluciones por segundo

¹⁵ Baque Mecias Marcel Alberto, (2001). Diseño de un sistema de floculación de paletas giratorias para una planta de potabilización de agua. Guayaquil, Ecuador. Pág. 107.

¹⁶ Baque Mecias Marcel Alberto, (2001). Diseño de un sistema de floculación de paletas giratorias para una planta de potabilización de agua. Guayaquil, Ecuador. Pág. 108.

D: Diámetro de las paletas

- La potencia se va a calcular en función del régimen turbulento o régimen laminar. El tipo de régimen se determinará mediante un número adimensional, el número de Reynolds:

$$Re = Da^2 * N * \frac{\rho}{\mu}$$

[3]¹⁷

D: diámetro de las paletas (m)

N: velocidad angular (RPS)

ρ : densidad del agua (kg/m³).

μ : viscosidad dinámica del agua (kg/ m*s).

- Los valores de K_T se muestran en la siguiente tabla, según el número de Reynolds (ver tabla 4.)

Tabla 4. Los valores de K_T según el número de Reynolds¹⁸

2 PALETAS	
Re	K_T
100	0.95
1000	1.60
>10000	1.80

Los valores que resultan de la fórmula de gradiente de velocidad medio (G) se les realiza una corrección por el cambio de temperatura que se produjo en el ensayo según la siguiente fórmula:

¹⁷ http://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=14&ved=0CF8QFjAN&url=http%3A%2F%2Foperacionesunitarias.wikispaces.com%2Ffile%2Fview%2Fagitacion.doc&ei=kQtTVNT0N4HasATRooLQBQ&usq=AFQjCNE_tFW-_9fcPV12DaSgFGO3ZVKTSw

¹⁸ Baque Mecias Marcel Alberto, (2001). Diseño de un sistema de floculación de paletas giratorias para una planta de potabilización de agua. Guayaquil, Ecuador. Pág. 108

$$Gx = G \sqrt{\frac{\mu}{\mu_x}}$$

[4]¹⁹

Donde:

μ : viscosidad dinámica del agua (kg/ m*s).

μ_x : viscosidad dinámica del agua para una temperatura diferente de (t) (Kg/ m*s).

A continuación, la tabla 5 se muestran los valores que toman las propiedades físicas del agua.

Tabla 5. Propiedades físicas del agua

TEMPERATURA °C	Viscosidad Dinámica kg / (m.s)	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad Cinemática (m ² /seg)
0,00	0,001792	999,82	1,792E-06
1,00	0,001731	999,89	1,731E-06
2,00	0,001674	999,94	1,674E-06
3,00	0,001620	999,98	1,620E-06
4,00	0,001569	1000	1,569E-06
5,00	0,001520	1000	1,520E-06
6,00	0,001473	999,99	1,473E-06
7,00	0,001429	999,96	1,429E-06
8,00	0,001386	999,91	1,386E-06
9,00	0,001346	999,85	1,346E-06
10,00	0,001308	999,77	1,308E-06
11,00	0,001271	999,68	1,271E-06
12,00	0,001236	999,58	1,237E-06
13,00	0,001202	999,46	1,203E-06

¹⁹ Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, tratamiento del agua para el consumo humano plantas de filtración rápida. Camacho, Lima, Perú 2004. Manual I, teoría tomo 2. OPS/CEPIS/PUB/04.109

14,00	0,001170	999,33	1,171E-06
15,00	0,001139	999,19	1,140E-06
16,00	0,001109	999,03	1,110E-06
17,00	0,001081	998,86	1,082E-06
18,00	0,001054	998,68	1,055E-06
19,00	0,001028	998,49	1,030E-06
20,00	0,001003	998,29	1,005E-06
21,00	0,000979	998,08	9,809E-07
22,00	0,000955	997,86	9,570E-07
23,00	0,000933	997,62	9,352E-07
24,00	0,000911	997,38	9,134E-07
25,00	0,000891	997,13	8,936E-07

3.1 ENSAYOS DE LABORATORIO

Los diferentes ensayos se realizaron en el laboratorio de hidráulica y saneamiento básico de la Universidad de Nariño Torobajo. Se realizaron 6 pruebas con las siguientes temperaturas: 4°C, 6°C, 8°C, 10°C, 12°C, 14°C, 16°C, 18°C, 20°C, 22°C, 24°C, cuyo registro se observa en el **Anexo 1**.

3.1.1 Procedimiento con el equipo del ensayo de Jarras para graficar gradientes de velocidad vs rpm: Verificación del equipo: antes de comenzar los ensayos, se debe tener en cuenta que el equipo debe estar conectado a una red eléctrica de 120 voltios A.C. el cual debe estar provista de un polo a tierra; los vasos de 2000ml y la estructura del equipo deben estar limpios, procedimiento que se debe realizar con un paño húmedo con agua pero por ningún motivo con un solvente a base de éter. Se mide la calibración del equipo observando que tiene un error de ± 1 RPM.

Operaciones básicas del equipo: Se levanta las paletas giratorias tomándolas del botón superior negro, se ubica el vaso de prueba. Posteriormente, se enciende el equipo y se prende el tablero de programación y la iluminación de la base, se escriben los RPM y el tiempo con los que desea realizar el ensayo, al programar el

tiempo del ciclo de trabajo el equipo empezará a girar automáticamente entonces se visualiza en la pantalla las rpm programadas y el decrecimiento del tiempo hasta terminar el proceso.

Secuencia del ensayo:

1. Se llena uno de los recipientes del equipo con 2000 mL de agua (cruda)
2. Se toma la temperatura inicial del agua con un termómetro electrónico, la cual puede ser determinada o aleatoria, para temperaturas mayores a 18°C se calienta con resistencia y a temperaturas menores se enfría a base de hielo, se debe tener en cuenta que la temperatura del agua es sensible a la temperatura ambiente que oscilaba entre los 18°C a los $22,6^{\circ}\text{C}$ del lugar (laboratorio de hidráulica y saneamiento básico) donde se realizaron los ensayos. (Ver fotografía 1)

Fotografía 1. Agua a la temperatura deseada



3. Una vez obtenida la temperatura inicial se lleva el recipiente al equipo de Jarras y se ubica las paletas rotores a una altura que coincida con la mitad del vaso a los 1000 ml aproximadamente. (ver fotografía 2)

Fotografía 2. Ubicación de jarras, paletas y lectura de temperatura



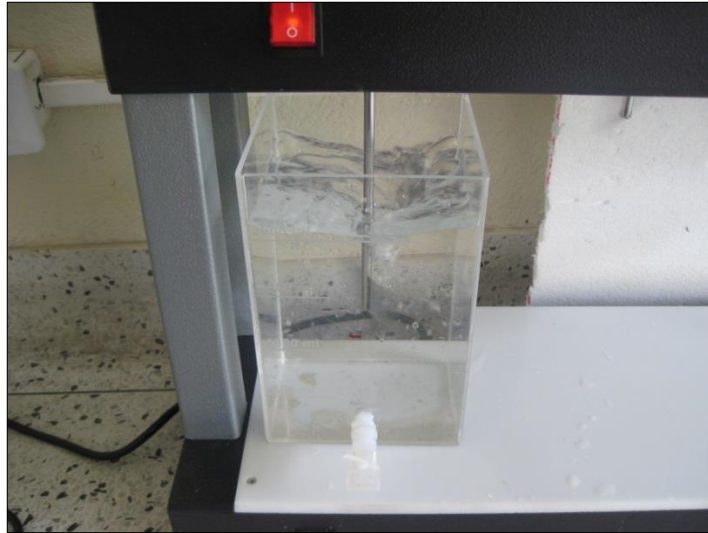
4. Se digita en el tablero electrónico del equipo las RPM y el tiempo de agitación deseado, se chequea nuevamente la temperatura inicial antes de iniciar el proceso de agitación. (Ver fotografía 3)

Fotografía 3. Ingreso de rpm y tiempo de prueba



5. Proceso de agitación con un tiempo y un gradiente dado. (ver fotografía 4)

Fotografía 4. Agitación del agua a RPM dada



6. Una vez terminado el ensayo se hace toma de la temperatura final con un termómetro electrónico, la cual varía generalmente de la inicial.

3.1.2 Registro de la información: Se emplea el formato de la tabla 6, para el registro de datos. Se escribe en el encabezado la temperatura a la que se va realizar el ensayo, se registran datos en laboratorio de temperatura inicial, temperatura final, temperatura ambiente volumen, velocidad angular y tiempo.

Tabla 6. Formato para el ingreso de datos

PARA TEMPERATURA DE ____			
VOL	m ³	Viscosidad inicial=	
T inicial	° C	Viscosidad final=	
T final	° C	tiempo=	seg
Velocidad Angular	RPM	°T ambiente=	° C
Velocidad Angular	RPS	NRE	
K		PTEORICO (W)	
G=		Gx=	

Donde:

VOL: volumen del recipiente

T inicial: temperatura inicial del ensayo

T final: temperatura final del ensayo

Velocidad Angular: revoluciones por minuto

°T ambiente: temperatura del medio donde se realizó el ensayo

NRE: Número de Reynolds (calculado)

K: constante adimensional para las paletas (según número de Reynolds)

PTEORICO (W): potencia transferida (calculada)

Viscosidad inicial: viscosidad del agua al iniciar el ensayo

Viscosidad final: viscosidad del agua al finalizar el ensayo

G: gradiente de velocidad medio

Gx: gradiente calculado para una temperatura (t)

3.1.3 Procesamiento de datos y cálculo de variables para graficar: Una vez obtenidos los datos provenientes del ensayo en laboratorio, se realiza la siguiente secuencia para el procesamiento y cálculo de variables:

1. Se toma la viscosidad dinámica del agua a las temperaturas inicial y final, según **Tabla 5 – Propiedades físicas del agua**, para temperaturas diferentes a las establecidas se debe interpolar.
2. Se calcula el Número de Reynolds según la ecuación (3):

$$Re = Da^2 * N * \frac{\rho}{\mu}$$

Donde,

D: diámetro de las paletas (m)

N: velocidad angular (RPS)

ρ : densidad del agua (kg/m^3).

μ : viscosidad dinámica del agua ($\text{Kg/ m}^*\text{s}$).

3. Con el Número de Reynolds calculado se selecciona el valor de la constante de agitación adimensional para las paletas (K_T), según **Tabla 4 – Los valores de K_T según Número de Reynolds**.
4. Se calcula la potencia transferida (PTEORICO) por el dispositivo de mezclado según la ecuación (2):

$$P = K_T * \rho * N^3 * D^5$$

Donde,

K_T : Constante de agitación adimensional para las paletas

ρ : Densidad del líquido a la temperatura de trabajo, **Tabla 5 – Propiedades Físicas del Agua**

N: Revoluciones por segundo

D: Diámetro de las paletas

5. Con todas las variables obtenidas se procede a calcular el gradiente de velocidad medio (G), según la ecuación(1) :

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}}$$

Donde,

P= potencia transferida (watts)

V= volumen (m^3)

μ = viscosidad dinámica (N.m/s^2)

6. Finalmente se hace el ajuste al gradiente de velocidad por el cambio de temperatura en el ensayo según ecuación (4):

$$Gx = G \sqrt{\frac{\mu}{\mu x}}$$

Donde:

μ : viscosidad dinámica del agua (Kg/ m*s).

μx : viscosidad dinámica del agua para una temperatura diferente de (t)

Ejemplo del procesamiento de datos y cálculo de variables para graficar:

Para efectos del presente numeral se presenta los datos obtenidos en laboratorio a una temperatura de 4°C con el fin de realizar el procedimiento de cálculo explicado en el numeral anterior, con el cual se obtiene un punto de gráfica en la temperatura correspondiente (ver tabla 7.)

Tabla 7. Datos obtenidos en laboratorio

PARA TEMPERATURA DE 4°C			
VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	
T inicial=	4,0 ° C	Viscosidad final=	
T final=	4,5 ° C	tiempo=	300 seg
Velocidad Angular=	30,0 RPM	°T ambiente=	22,0 ° C
Velocidad Angular=	0,50 RPS	NRE	

1. Se toman las viscosidades dinámicas de la **Tabla 5. Propiedades físicas del agua**. Como la temperatura final es 4,5°C se hace necesario interpolar para obtener el valor de la viscosidad a esta temperatura.

PARA TEMPERATURA DE 4°C			
VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001569 N.s/m ²
T inicial=	4,0 ° C	Viscosidad final=	0,001545 N.s/m ²

Datos Obtenidos según Tabla 5

T final=	4,5 ° C	tiempo=	300 seg
Velocidad Angular=	30,0 RPM	°T ambiente=	22,0 ° C
Velocidad Angular=	0,50 RPS	NRE	

2. Se calcula el Número de Reynolds según la siguiente fórmula, donde la velocidad angular se convierte de RPM a RPS

$$Re = Da^2 * N * \frac{\rho}{\mu}$$

$$Re = (0,0762m)^2 * (0,50rps) * \frac{(1000kg/m^3)}{(0,001569kg/m.s)}$$

$$Re = 1850,36$$

3. Se determina el valor de KT según la Tabla 4 – Los valores de KT según Número de Reynolds, donde se encuentra el valor de KT por rangos de Número de Reynolds (Re).

Para un Re = 1850,36, se obtiene que KT = 1,60

4. Se calcula la Potencia transferida por el equipo al fluido mediante la siguiente fórmula:

$$P = K_T * \rho * N^3 * D^5$$

$$P = (1,6) * (1000kg/m^3) * (0,50rps)^3 * (0,0762m)^5$$

$$P = 5,14E - 04 Watts$$

5. Se calcula el gradiente de velocidad medio (G), con la siguiente fórmula:

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}}$$

$$G = \sqrt{\frac{(5,14 \times 10^{-4} \text{ Watts})}{(0,001569 \text{ kg/m.s}) * (0,002 \text{ m}^3)}}$$

$$G = 12,8 \text{ s}^{-1}$$

6. Finalmente, se hace el ajuste al gradiente de velocidad por el cambio de temperatura en el ensayo según la siguiente fórmula:

$$Gx = G \sqrt{\frac{\mu}{\mu x}}$$

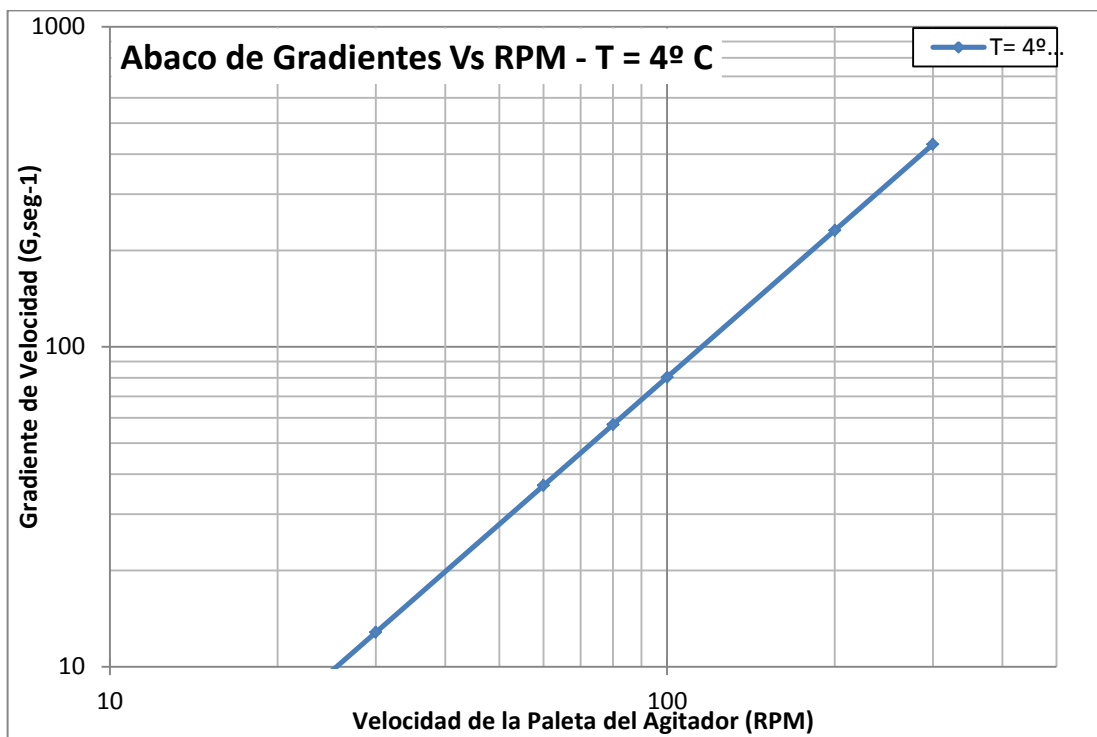
$$Gx = 12,8 \text{ s}^{-1} \sqrt{\frac{0,001569 \text{ N.s/m}^2}{0,001545 \text{ N.s/m}^2}}$$

$$Gx = 12,9 \text{ s}^{-1}$$

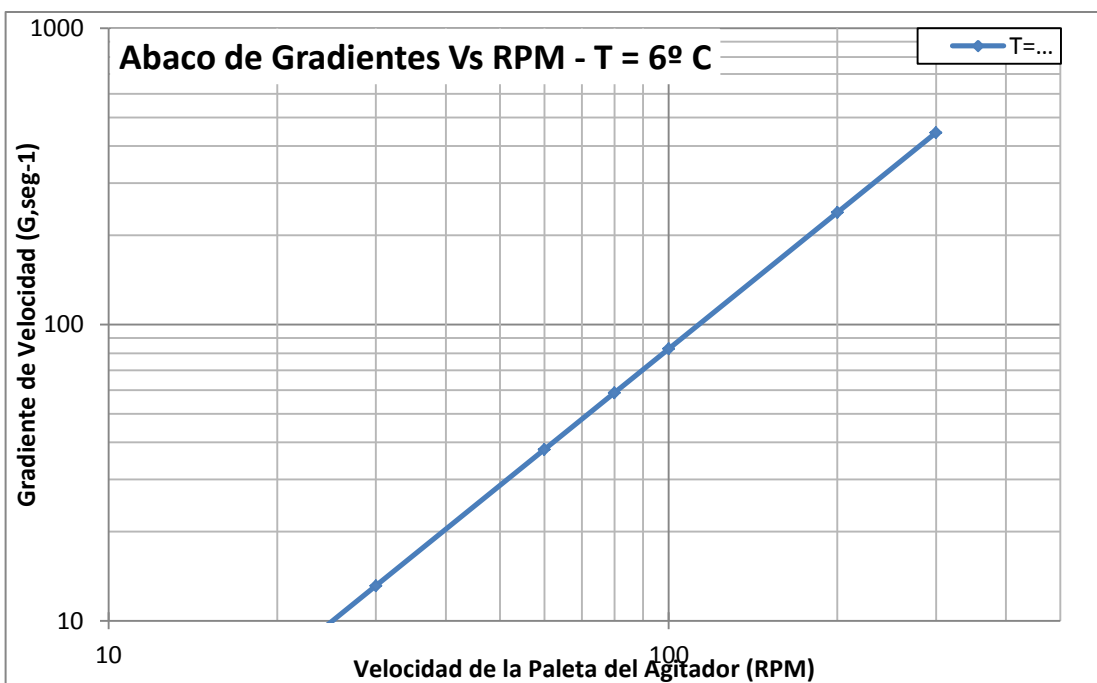
Una vez realizado todo el procesamiento y cálculo de datos se concluye que las coordenadas X,Y a graficar son: 30 RPM ; 12,9 s⁻¹

3.1.4 Representación gráfica para los ensayos: Las siguientes gráficas muestra los ábacos que relaciona los gradientes de velocidad con las revoluciones por minuto con vasos acrílicos cuadrados de 2 lt a temperaturas entre 4°C y 24°C, con un rango de 2°C para el nuevo equipo de Prueba de ensayo de Jarras del laboratorio de hidráulica y saneamiento del programa de ingeniería civil de la universidad de Nariño.

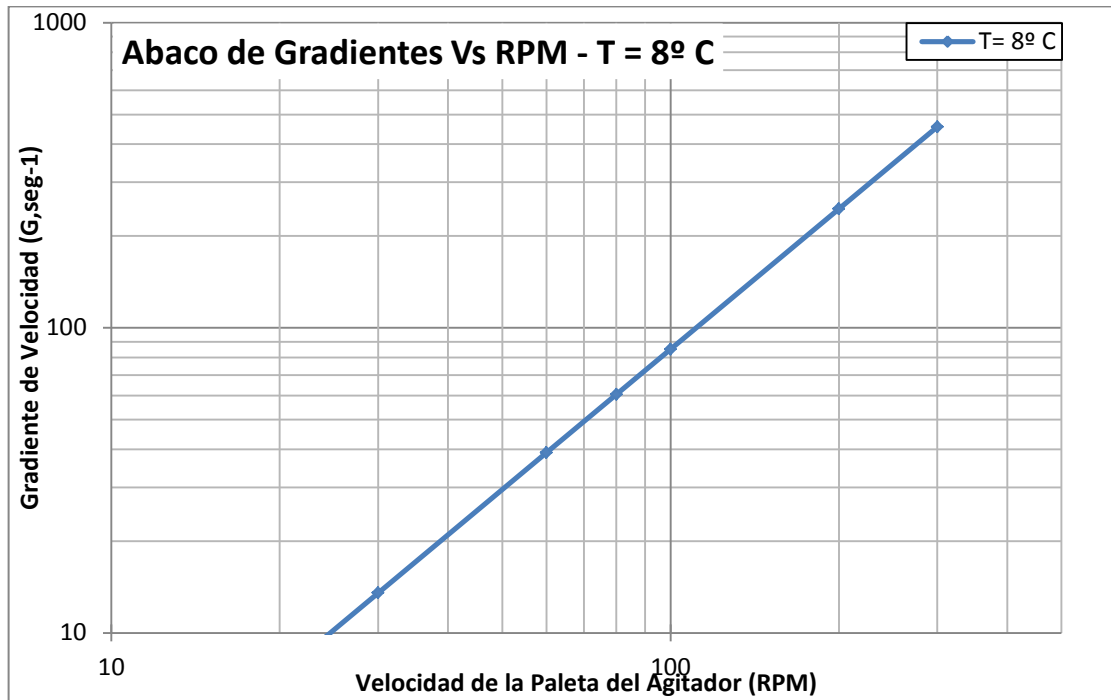
Gráfica 1. Ábaco que relaciona los G. con RPM con vasos acrílicos cuadrados de 2 lt a una temperatura de 4°C.



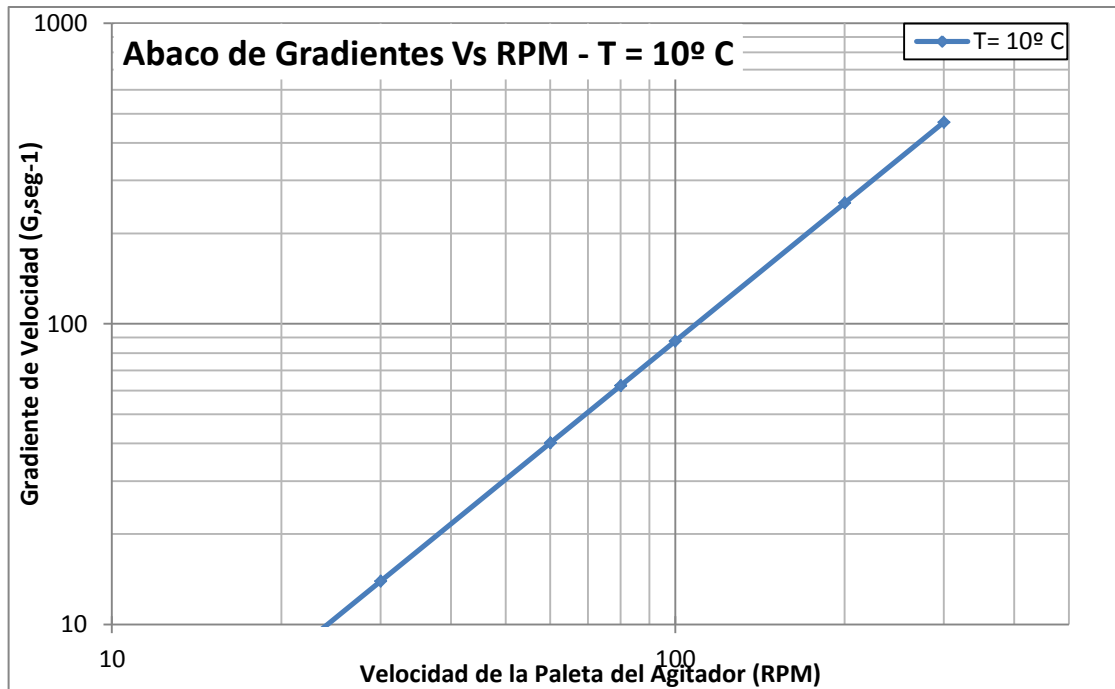
Gráfica 2. Ábaco que relaciona los G. con RPM con vasos acrílicos cuadrados de 2 lt a una temperatura de 6°C.



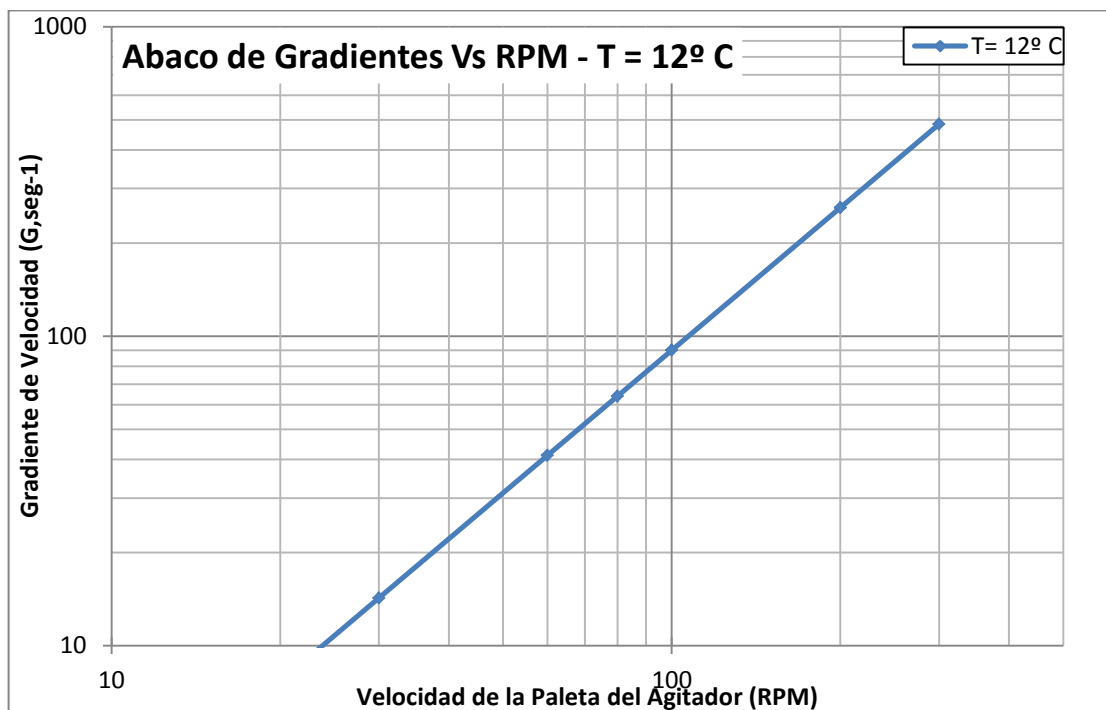
Gráfica 3. Ábaco que relaciona los G. con RPM con vasos acrílicos cuadrados de 2 lt a una temperatura de 8°C.



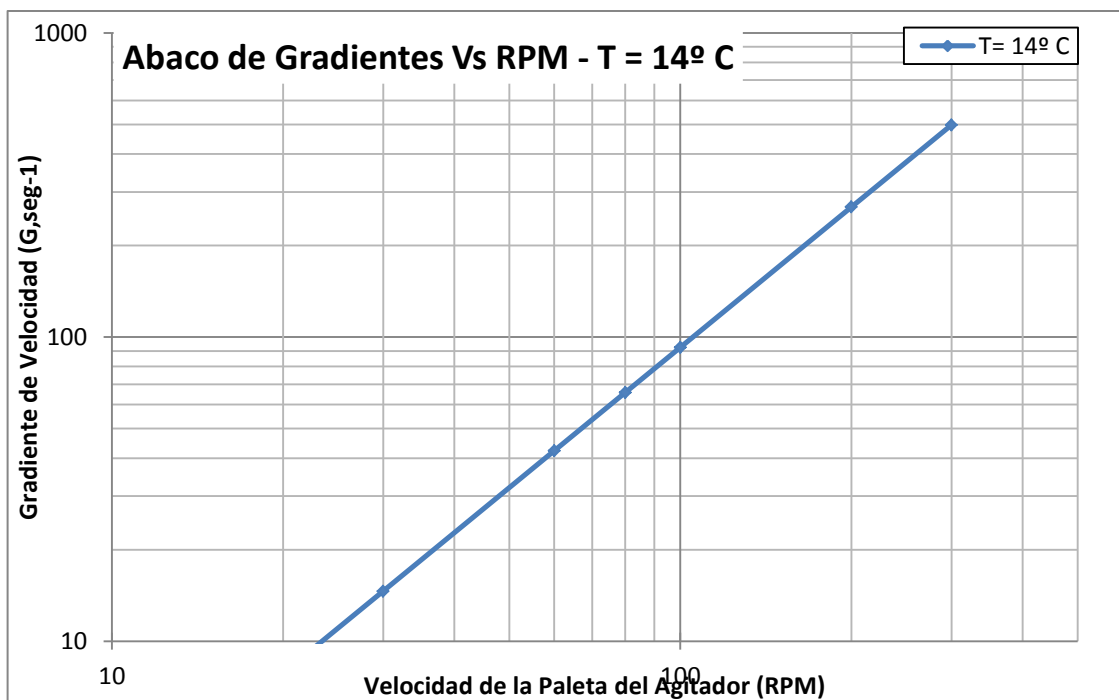
Gráfica 4. Ábaco que relaciona los G. con RPM con vasos acrílicos cuadrados de 2 lt a una temperatura de 10°C.



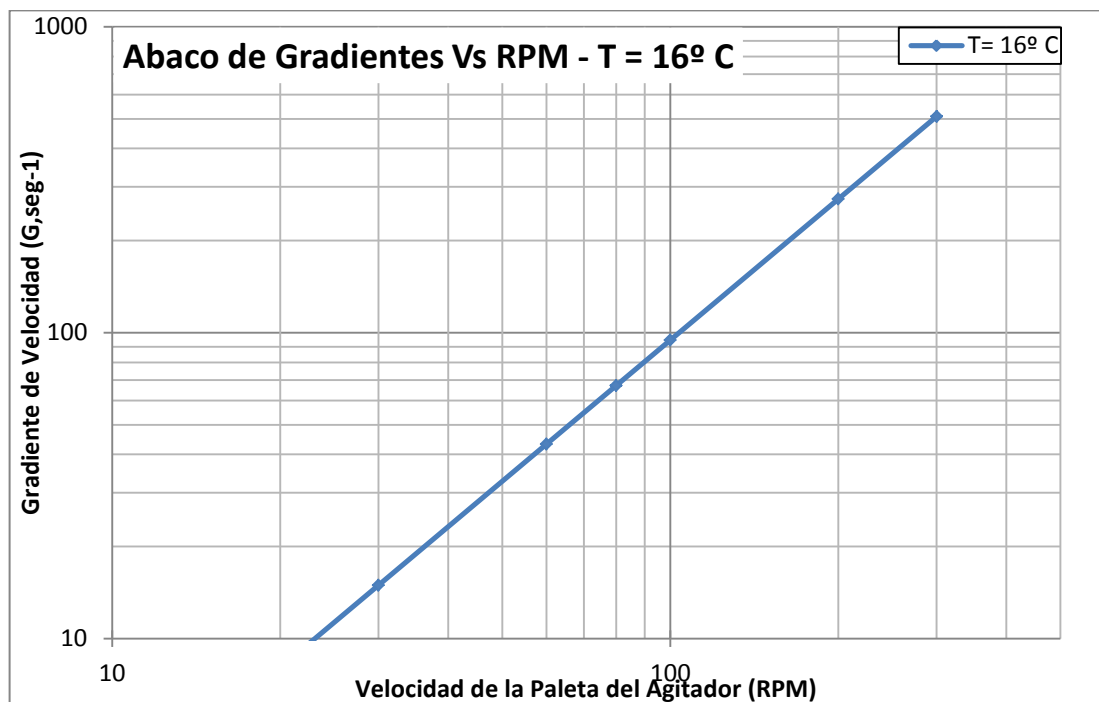
Gráfica 5. Ábaco que relaciona los G. con RPM con vasos acrílicos cuadrados de 2 lt a una temperatura de 12°C.



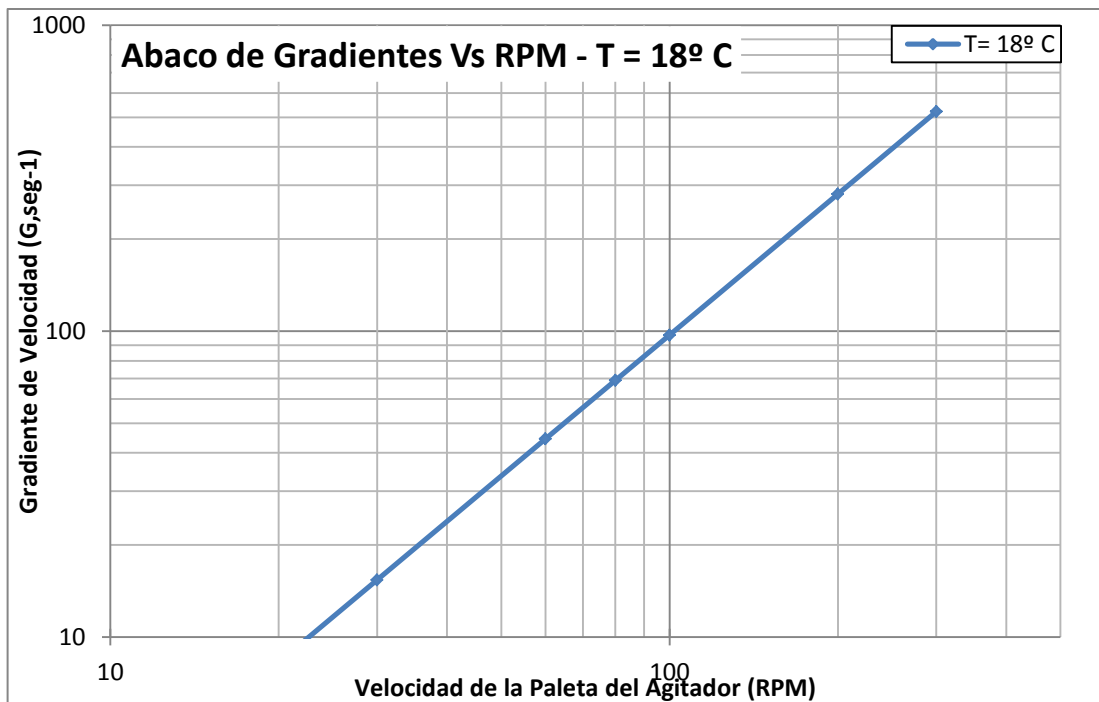
Gráfica 6. Ábaco que relaciona los G. con RPM con vasos acrílicos cuadrados de 2 lt a una temperatura de 14°C.



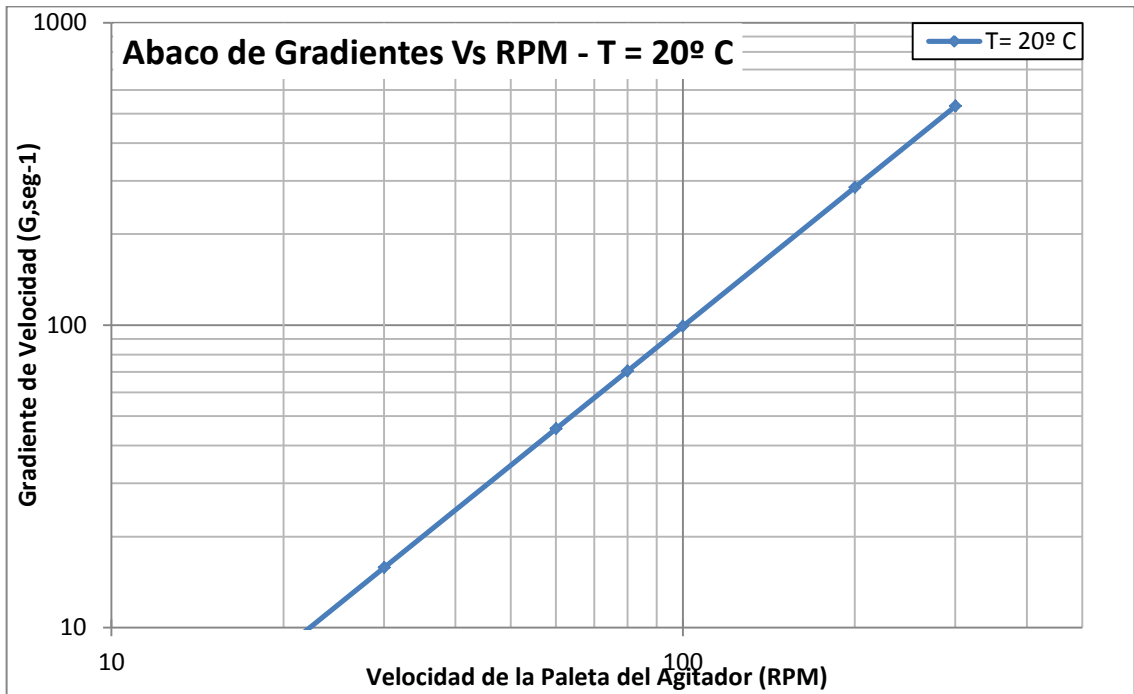
Gráfica 7. Ábaco que relaciona los G. con RPM con vasos acrílicos cuadrados de 2 lt a una temperatura de 16°C.



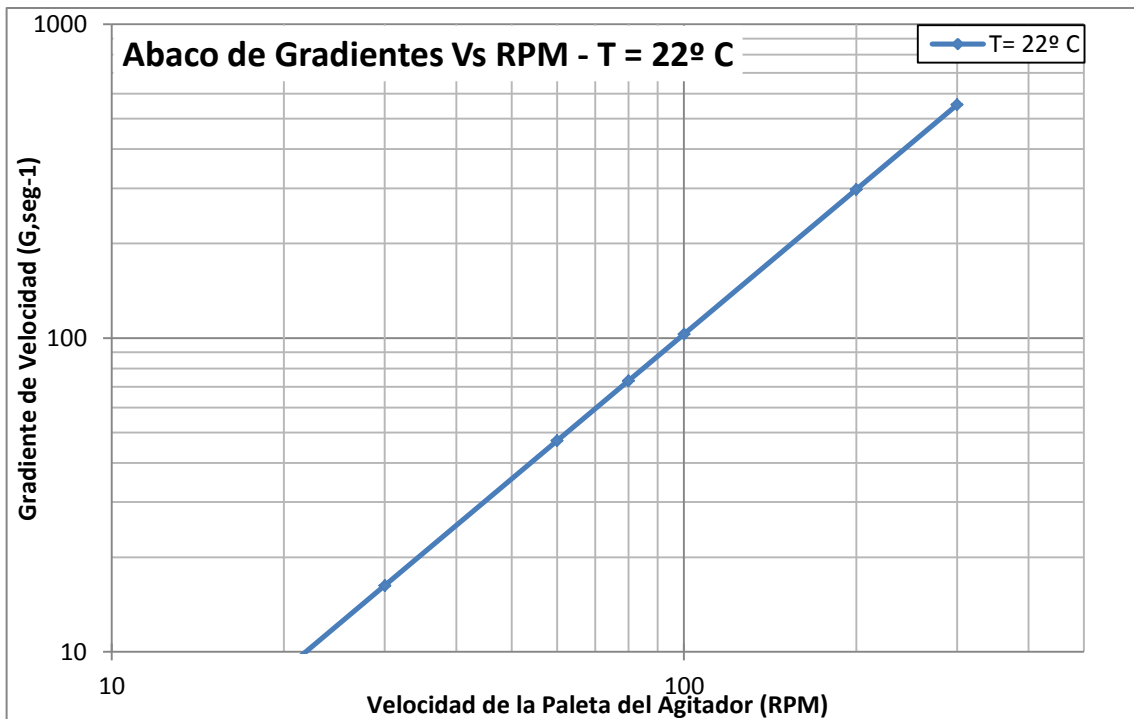
Gráfica 8. Ábaco que relaciona los G. con RPM con vasos acrílicos cuadrados de 2 lt a una temperatura de 18°C.



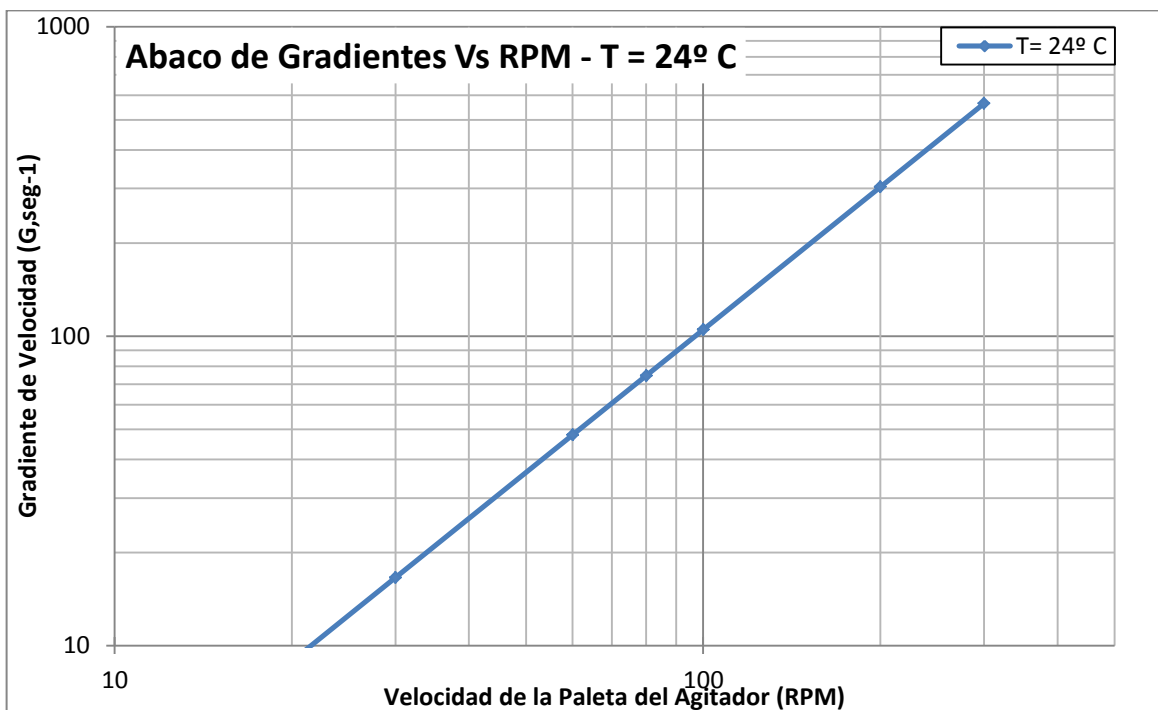
Gráfica 9. Ábaco que relaciona los G. con RPM con vasos acrílicos cuadrados de 2 lt a una temperatura de 20°C.



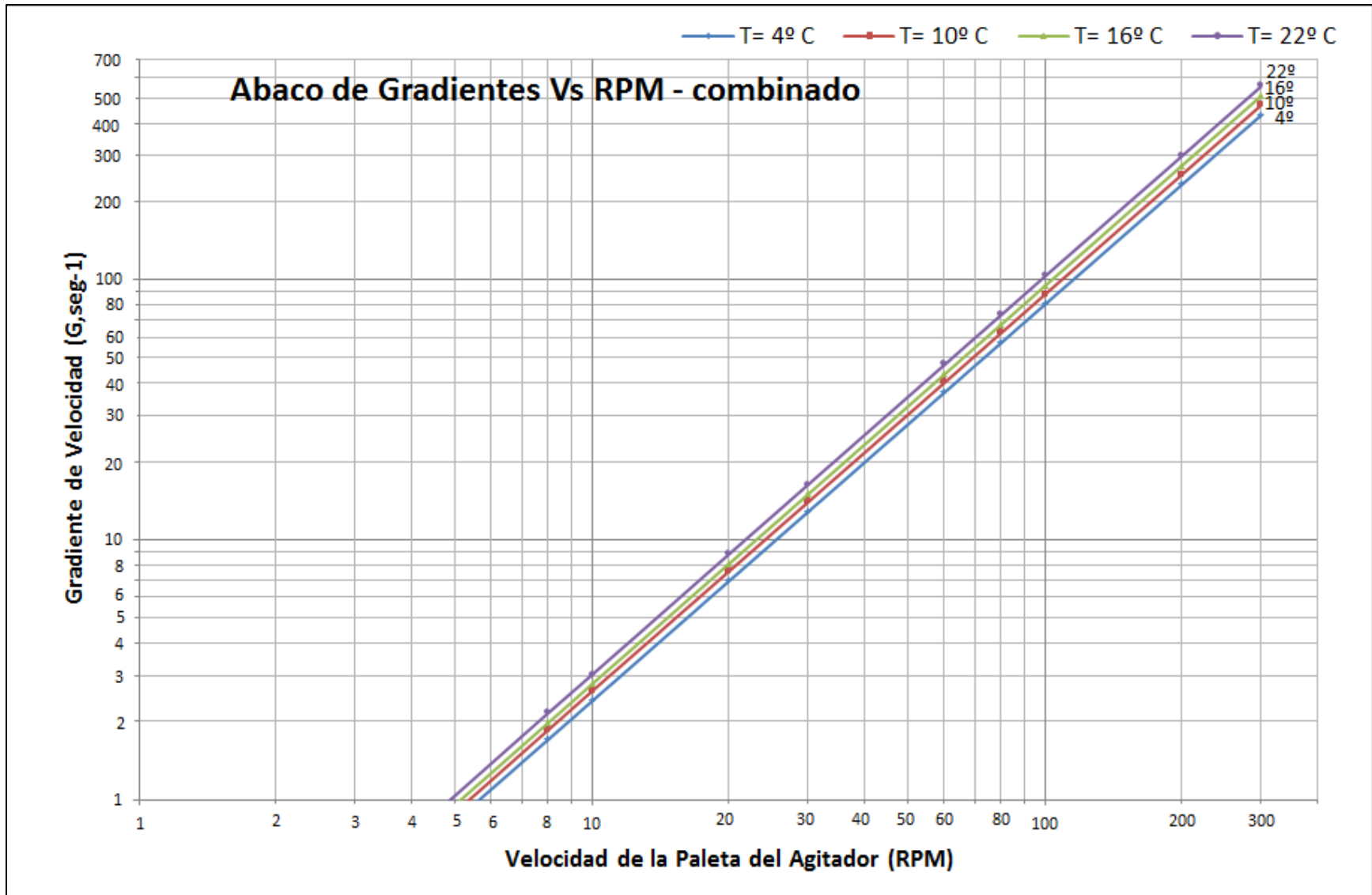
Gráfica 10. Ábaco que relaciona los G. con RPM con vasos acrílicos cuadrados de 2 lt a una temperatura de 22°C.



Gráfica 11. Ábaco que relaciona los G. con RPM con vasos acrílicos cuadrados de 2 lt a una temperatura de 24°C.



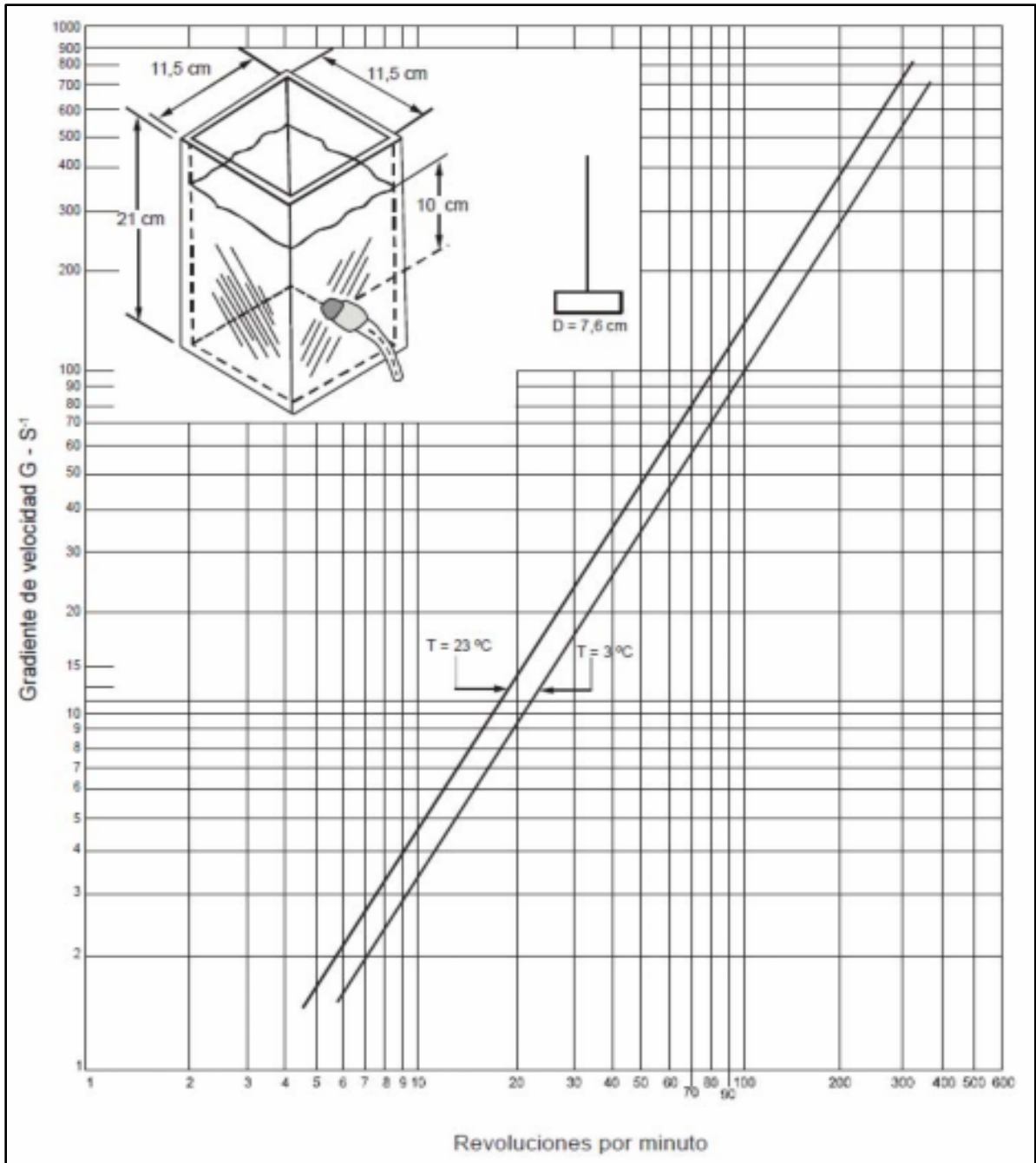
3.1.5 Ábaco que relaciona los gradientes de velocidad con las revoluciones por minuto con vasos acrílicos cuadrados de 2 lt para el nuevo equipo de Prueba de ensayo de Jarras del laboratorio de hidráulica y saneamiento desarrollado Universidad de Nariño.



Gráfica 12 - Gradiente de Velocidad vs RPM Equipo de Jarras.

Universidad de Michigan

20



²⁰ De Vargas, Ing. Lidia, Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida Manual I: Teoría Tomo I - Capítulo 11. Criterios para la selección de los procesos y de los parámetros óptimos de las unidades. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. CEPIS/OPS. Lima 2004. Pag.229 – Figura 11-6

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La representación gráfica de los ensayos se realizó con las RPM asignadas al equipo y los gradientes de velocidad calculados, en cada ensayo (Anexo 2).

En la determinación de las curvas se utilizó la ecuación de regresión potencial, siendo esta la que tiene un comportamiento más semejante a la tendencia que arrojó la dispersión de puntos en la etapa experimental. Calculando para cada una de las gráficas el coeficiente de correlación R, para verificar la precisión entre los datos de gradiente de velocidad, revoluciones por minuto y la ecuación de la línea de tendencia. (ver tabla8.)

Para el análisis se tuvo en cuenta las características del equipo y se inició con 66 ensayos de laboratorio; con el fin de calcular los gradientes de velocidad.

Tabla 8. Ecuaciones de regresión

REGRESIÓN	ECUACIÓN
Exponencial	$y = e^{bx}$
Lineal	$y = mx + b$
Logarítmica	$y = c\ln(x) + b$
Polinómica (Grado 2 a 6)	$y = b + c_1x + c_2x^2 + c_3x^3 + \dots c_nx^n$
Potencial	$y = cx^b$

Los gradientes de velocidad calculados en plantas de tratamiento de aguas o en laboratorio, para ser utilizados en el equipo de Prueba de Jarras deben ser relacionados en los anteriores ábacos; dependiendo del proceso a estudiar para determinar las revoluciones por minuto (RPM) necesarias, utilizando como referencia la temperatura del fluido.

Al realizar la comparación entre las curvas de gradiente de velocidad obtenidos para el equipo MD. Y-FL6 de Jareth Químicos con las curvas de gradiente de velocidad establecidos por la Universidad de Michigan en su equipo de Jarras, se encuentra de que hay pequeñas diferencias en el comportamiento de ambos equipos, esto se debe principalmente a las dimensiones físicas del rotor porque afecta directamente la potencia transferida por el equipo al líquido del contenedor.

A pesar de lo anterior las curvas obtenidas arrojan en la regresión potencial una correlación bastante alta y un comportamiento muy similar al de las curvas mostradas por la Universidad de Michigan.

Tabla 9 – Comparación de gradientes de velocidad a 100 rpm en equipo Yareth Químicos

°T	Comparación de Gradientes (s-1) a 100 RPM		
	Ábacos Y-FL6 Químicos	Equipo MD. Yareth	Diferencia entre Gradientes
4°C	80		2
6°C	82		3
8°C	85		4
10°C	89		1
12°C	90		1
14°C	91		1
16°C	92		3
18°C	95		4
20°C	99		3
22°C	101		2
24°C	103		

Comparando las curvas de gradiente de velocidad del equipo MD. Y-FL6 de Jareth Químicos entre sí a diferentes temperaturas se observa en la Tabla 9 que existe una zona entre las temperaturas de 10°C y 16°C donde a una misma RPM no existe variación significativa.

Tabla 10 – Comparación de gradientes a 4°C entre ábacos U. de Michigan y Yareth Químicos

RPM	Comparación de Gradientes (s-1) a T= 4°C		
	Ábacos U. de Michigan	Ábacos Equipo MD. Yareth Químicos	Diferencia entre Gradientes
10	3,5	2,4	1,1
30	18	14	4
60	50	38	12
80	72	58	14
100	104	80	24
200	295	240	55

Tabla 11 - Comparación de gradientes a 22°C entre Ábacos U. de Michigan y Yareth Químicos

RPM	Comparación de Gradientes (s-1) a T= 22°C			
	Ábacos U. de Michigan	Ábacos Y-FL6 Químicos	Equipo MD. Yareth	Diferencia entre Gradientes
10	4,5		3	1,5
30	23		18	5
60	60		48	12
80	92		75	17
100	130		100	30
200	360		300	60

Como se puede observar en las Tablas 10 y 11, existe una diferencia notable del gradiente entre ambos equipos, esto se debe a las dimensiones del rotor o paleta y la potencia que genera el motor.

Las diferencias entre gradientes a las temperaturas de 4°C y 22°C obedecen a un comportamiento potencial por tal razón a mayor RPM es más notable el rango de diferencia entre ambos equipos, teniendo en cuenta que ambos parten de un estado de reposo en el punto de origen.

Las curvas de calibración generadas en esta investigación serán la guía en caso de que el equipo genere variación en los ábacos expuestos, como referencia para una posible calibración.

Finalmente se demuestra que cada equipo tiene sus particularidades o características propias, independiente de las especificaciones y funcionalidad sean las mismas, de ahí la importancia de conocer el comportamiento del equipo para una obtención de datos adecuada y precisa.

5. CONCLUSIONES

- ✓ Se cumplió a cabalidad con la dotación del equipo de Prueba de Jarras al laboratorio de hidráulica y saneamiento del programa de ingeniería civil de la Universidad de Nariño para ello se hizo entrega del equipo MD. Y-FL6 Yareth Químicos, debido a que la Universidad carecía de este elemento básico de investigación.
- ✓ Se logró elaborar los ábacos de Gradiente de Velocidad vs revoluciones por minuto, con los diversos datos que se obtuvieron experimentalmente en laboratorio a las temperaturas establecidas entre 4°C y 24°C con un rango de 2°C, generando un procedimiento de cálculo que relaciona la potencia disipada por el rotor y las características físicas del líquido utilizando para ello diferentes ecuaciones para la solución de variables que tienen como objetivo el calculo del gradiente.
- ✓ Una vez obtenidas las curvas de gradiente de velocidad de forma experimental, se observa que existe ciertas imprecisiones en la realización de las gráficas, esto debido a la presencia de variables como lo es la precisión de los objetos de medición, temperatura ambiente, cambios de energía AC por picos de carga, entre otros. Con el fin de lograr precisar el comportamiento de los ábacos de velocidad se proyectó sobre las gráficas líneas de tendencia lineal, exponencial, logarítmica, polinómica y potencial siendo la de tendencia potencial la que mejor se ajustó, se realizó entonces regresión potencial y se obtuvo una ecuación cuyo coeficiente de fiabilidad "R" en todos los casos fue muy cercano a uno (1). Se concluye finalmente que las ecuaciones obtenidas en cada caso son las del equipo a las temperaturas estudiadas.
- ✓ Los ábacos de gradiente de velocidad vs. revoluciones por minuto, desarrollados en esta investigación son una guía de uso del equipo, porque se da a conocer las revoluciones por minuto necesarias para un gradiente deseado.
- ✓ Para lograr encontrar una tendencia adecuada del comportamiento de un equipo electro- mecánico se debe considerar todas las variables como son potencia nominal, velocidad, potencia disipada y potencia transferida, viscosidad y características físicas como las dimensiones de la paleta o rotor generando un procedimiento de aplicación de fórmulas para así resolver las diferentes variables que son necesarias conocer para encontrar el resultado buscado.
- ✓ Para encontrar la potencia transferida por el equipo se debe realizar pruebas experimentales con el objeto de hacer una recolección de datos, generar un procedimiento para aplicación de fórmulas y corroborar los datos obtenidos con casos teóricos como los ábacos de la Universidad de Michigan, para obtener un alto nivel de fiabilidad en los analisis obtenidos.

RECOMENDACIONES

- ✦ Realizar los procedimientos de ensayo de Jarras, de acuerdo a la norma RAS – 2000, para un adecuado proceso de diseño y operación de plantas de agua potable y residuales.
- ✦ Limpiar y lavar los recipientes, no se debe utilizar productos a base de éter o detergentes ya que estos se adhieren a las paredes de los vasos e interfieren con la experimentación con diferentes químicos para el estudio y tratamiento del agua.
- ✦ Utilizar elementos de alta precisión como termómetros digitales que tengan un error ± 0.1 °C.
- ✦ Realizar mantenimiento permanente al equipo de Prueba de Jarras, para garantizar una larga vida útil.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amirtharajah, A. & Mills, K.M. (1982): Rapid-mix Design for Mechanisms of Alum Coagulation, Journal AWWA, 74.
- Amirtharajah, A. (1987): The Theory and Practice of Rapide Mixing, Memórias do Seminario Internacional sobre Tecnología Simplificada para Potabilización del Agua. Cali, Colombia.
- Argaman, Y. (1971): Pilot Studies of Flocculation, Journal AWWA, 63.
- Baque Mecias Marcel Alberto, Diseño de un sistema de floculación de paletas giratorias para una planta de potabilización de agua. Tesis de grado para optar el título de ingeniero mecánico. Guayaquil, Ecuador. Escuela superior politécnica litoral (2001).
- Camp, T. R. y Stein, P. C. Velocity gradients and internal work in fluid motion. Journal of the Boston Society of Civil Engineers, vol. 30, 1943.
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente CEPIS/OPS, Ing. Lidia de Vargas (coordinadora), (2004). Tratamiento de agua para consumo humano Plantas de filtración rápida. Lima, Perú.
- Coagulación floculación, estado actual disponible en internet <http://es.scribd.com/doc/168008142/Tp-Coagulacion-Floculacion-2012>.
- Diaz Castaño Zulma Maricel, Cifuentes Portilla Janeth Milena, (2006): Equipo de Prueba de Jarras computarizado para el laboratorio de análisis ambiental de la universidad mariana “kontrol turn”. Universidad Mariana. Pasto, Colombia.
- Módulo de agua potable, estado actual disponible en internet <http://es.scribd.com/doc/233075250/Tema-3-Floculacion-pdf>.
- Potencia de agitación, estado actual disponible en internet <http://www.miliarium.com/prontuario/MedioAmbiente/Aguas/PotenciaAgitacion.htm>.
- Reyes López, Karen Inmar. (2011): Evaluación de la influencia del gradiente de mezcla en una planta de potabilización considerando la dosis mejorada, el régimen hidráulico y la calidad del agua. universidad de Oriente Puerto La Cruz.
- XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, (2002): Evaluación de las ecuaciones utilizadas para determinar el gradiente medio de

velocidad en floculadores mecánicos Cancún, México. Estado actual disponible en internet <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico26/i-043.pdf>

- Yareth químicos LTDA, (2013): manual floculador Test de Jarras-seis puestos. Bogota, Colombia.

Anexo 1.

Registro de datos de los ensayos realizados en laboratorio y cálculos de las variables para la representación gráfica experimental.

PARA TEMPERATURA DE 4°C				PARA TEMPERATURA DE 4°C			
VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001569 N.s/m ²	VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001569 Kg/(m.s)
T inicial=	4,0 °C	Viscosidad final=	0,001545 N.s/m ²	T inicial=	4,0 °C	Viscosidad final=	0,001525 Kg/(m.s)
T final=	4,5 °C	tiempo=	300 seg	T final=	4,9 °C	tiempo=	300 seg
Velocidad Angular=	30,0 RPM	°T ambiente=	22,0 °C	Velocidad Angular=	100,0 RPM	°T ambiente=	21,7 °C
Velocidad Angular=	0,50 RPS	NRE	1850,36	Velocidad Angular=	1,667 RPS	NRE	6167,88
K	1,60	PTEORICO (W)	5,14E-04	K	1,60	PTEORICO (W)	1,90E-02
G=	12,8	Gx=	12,9	G=	77,87	Gx=	78,99
PARA TEMPERATURA DE 4°C				PARA TEMPERATURA DE 4°C			
VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001569 Kg/(m.s)	VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001569 Kg/(m.s)
T inicial=	4,0 °C	Viscosidad final=	0,001554 Kg/(m.s)	T inicial=	4,0 °C	Viscosidad final=	0,001530 Kg/(m.s)
T final=	4,3 °C	tiempo=	300 seg	T final=	4,8 °C	tiempo=	300 seg
Velocidad Angular=	60,0 RPM	°T ambiente=	22,6 °C	Velocidad Angular=	200,0 RPM	°T ambiente=	22,5 °C
Velocidad Angular=	1,00 RPS	NRE	3700,73	Velocidad Angular=	3,333 RPS	NRE	12335,76
K	1,60	PTEORICO (W)	4,11E-03	K	1,80	PTEORICO (W)	1,71E-01
G=	36,2	Gx=	36,36	G=	233,62	Gx=	236,60
PARA TEMPERATURA DE 4°C				PARA TEMPERATURA DE 4°C			
VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001574 Kg/(m.s)	VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001569 Kg/(m.s)
T inicial=	3,9 °C	Viscosidad final=	0,001530 Kg/(m.s)	T inicial=	4,0 °C	Viscosidad final=	0,001545 Kg/(m.s)
T final=	4,7 °C	tiempo=	300 seg	T final=	4,5 °C	tiempo=	300 seg
Velocidad Angular=	80,0 RPM	°T ambiente=	21,5 °C	Velocidad Angular=	300,0 RPM	°T ambiente=	22,0 °C
Velocidad Angular=	1,333 RPS	NRE	4778,87	Velocidad Angular=	5,00 RPS	NRE	18503,63
K	1,60	PTEORICO (W)	9,74E-03	K	1,80	PTEORICO (W)	5,78E-01
G=	54,84	Gx=	55,63	G=	429,19	Gx=	432,58

PARA TEMPERATURA DE 6°C				PARA TEMPERATURA DE 6°C			
VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001473 Kg/(m.s)	VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001473 Kg/(m.s)
T inicial=	6,0 °C	Viscosidad final=	0,001460 Kg/(m.s)	T inicial=	6,0 °C	Viscosidad final=	0,001433 Kg/(m.s)
T final=	6,3 °C	tiempo=	300 seg	T final=	6,9 °C	tiempo=	300 seg
Velocidad Angular=	30,0 RPM	°T ambiente=	22,3 °C	Velocidad Angular=	100,0 RPM	°T ambiente=	22,3 °C
Velocidad Angular=	0,50 RPS	NRE	1970,94	Velocidad Angular=	1,667 RPS	NRE	6569,79
K	1,60	PTEORICO (W)	5,14E-04	K	1,60	PTEORICO (W)	1,90E-02
G=	13,2	Gx=	13,3	G=	80,37	Gx=	81,47
PARA TEMPERATURA DE 6°C				PARA TEMPERATURA DE 6°C			
VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001473 Kg/(m.s)	VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001478 Kg/(m.s)
T inicial=	6,0 °C	Viscosidad final=	0,001433 Kg/(m.s)	T inicial=	5,9 °C	Viscosidad final=	0,001438 Kg/(m.s)
T final=	6,9 °C	tiempo=	300 seg	T final=	6,8 °C	tiempo=	300 seg
Velocidad Angular=	60,0 RPM	°T ambiente=	22,3 °C	Velocidad Angular=	200,0 RPM	°T ambiente=	20,2 °C
Velocidad Angular=	1,00 RPS	NRE	3941,88	Velocidad Angular=	3,333 RPS	NRE	12733,42
K	1,60	PTEORICO (W)	4,11E-03	K	1,80	PTEORICO (W)	1,71E-01
G=	37,35	Gx=	37,87	G=	237,36	Gx=	240,63
PARA TEMPERATURA DE 6°C				PARA TEMPERATURA DE 6°C			
VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001473 Kg/(m.s)	VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001473 Kg/(m.s)
T inicial=	6,0 °C	Viscosidad final=	0,001429 Kg/(m.s)	T inicial=	6,0 °C	Viscosidad final=	0,001451 Kg/(m.s)
T final=	7,0 °C	tiempo=	300 seg	T final=	6,5 °C	tiempo=	300 seg
Velocidad Angular=	80,0 RPM	°T ambiente=	22,3 °C	Velocidad Angular=	300,0 RPM	°T ambiente=	22,3 °C
Velocidad Angular=	1,333 RPS	NRE	5255,83	Velocidad Angular=	5,00 RPS	NRE	19709,38
K	1,60	PTEORICO (W)	9,74E-03	K	1,80	PTEORICO (W)	5,78E-01
G=	57,51	Gx=	58,39	G=	442,96	Gx=	446,30

PARA TEMPERATURA DE 8°C				PARA TEMPERATURA DE 8°C			
VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001386 Kg/(m.s)	VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001386 Kg/(m.s)
T inicial=	8,0 °C	Viscosidad final=	0,001362 Kg/(m.s)	T inicial=	8,0 °C	Viscosidad final=	0,001366 Kg/(m.s)
T final=	8,6 °C	tiempo=	300 seg	T final=	8,5 °C	tiempo=	300 seg
Velocidad Angular=	30,0 RPM	°T ambiente=	20,9 °C	Velocidad Angular=	100,0 RPM	°T ambiente=	22,3 °C
Velocidad Angular=	0,50 RPS	NRE	2094,49	Velocidad Angular=	1,667 RPS	NRE	6981,62
K	1,60	PTEORICO (W)	5,14E-04	K	1,60	PTEORICO (W)	1,90E-02
G=	13,6	Gx=	13,7	G=	82,85	Gx=	83,46
PARA TEMPERATURA DE 8°C				PARA TEMPERATURA DE 8°C			
VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001386 Kg/(m.s)	VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001386 Kg/(m.s)
T inicial=	8,0 °C	Viscosidad final=	0,001366 Kg/(m.s)	T inicial=	8,0 °C	Viscosidad final=	0,001358 Kg/(m.s)
T final=	8,5 °C	tiempo=	300 seg	T final=	8,7 °C	tiempo=	300 seg
Velocidad Angular=	60,0 RPM	°T ambiente=	22,3 °C	Velocidad Angular=	200,0 RPM	°T ambiente=	20,2 °C
Velocidad Angular=	1,00 RPS	NRE	4188,97	Velocidad Angular=	3,333 RPS	NRE	13963,25
K	1,60	PTEORICO (W)	4,11E-03	K	1,80	PTEORICO (W)	1,71E-01
G=	38,51	Gx=	38,79	G=	248,56	Gx=	251,11
PARA TEMPERATURA DE 8°C				PARA TEMPERATURA DE 8°C			
VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001386 Kg/(m.s)	VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001390 Kg/(m.s)
T inicial=	8,0 °C	Viscosidad final=	0,001370 Kg/(m.s)	T inicial=	7,9 °C	Viscosidad final=	0,001358 Kg/(m.s)
T final=	8,4 °C	tiempo=	300 seg	T final=	8,7 °C	tiempo=	300 seg
Velocidad Angular=	80,0 RPM	°T ambiente=	22,3 °C	Velocidad Angular=	300,0 RPM	°T ambiente=	20,9 °C
Velocidad Angular=	1,333 RPS	NRE	5585,30	Velocidad Angular=	5,00 RPS	NRE	20315,63
K	1,60	PTEORICO (W)	9,74E-03	K	1,80	PTEORICO (W)	5,78E-01
G=	59,28	Gx=	59,63	G=	449,72	Gx=	455,03

PARA TEMPERATURA DE 10°C				PARA TEMPERATURA DE 10°C			
VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001308 Kg/(m.s)	VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001308 Kg/(m.s)
T inicial=	10,0 °C	Viscosidad final=	0,001278 Kg/(m.s)	T inicial=	10,0 °C	Viscosidad final=	0,001286 Kg/(m.s)
T final=	10,8 °C	tiempo=	300 seg	T final=	10,6 °C	tiempo=	300 seg
Velocidad Angular=	30,0 RPM	°T ambiente=	20,9 °C	Velocidad Angular=	100,0 RPM	°T ambiente=	21,3 °C
Velocidad Angular=	0,50 RPS	NRE	2219,08	Velocidad Angular=	1,667 RPS	NRE	7396,92
K	1,60	PTEORICO (W)	5,14E-04	K	1,60	PTEORICO (W)	1,90E-02
G=	14,0	Gx=	14,2	G=	85,28	Gx=	86,01
PARA TEMPERATURA DE 10°C				PARA TEMPERATURA DE 10°C			
VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001308 Kg/(m.s)	VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001312 Kg/(m.s)
T inicial=	10,0 °C	Viscosidad final=	0,001282 Kg/(m.s)	T inicial=	9,9 °C	Viscosidad final=	0,001297 Kg/(m.s)
T final=	10,7 °C	tiempo=	300 seg	T final=	10,3 °C	tiempo=	300 seg
Velocidad Angular=	60,0 RPM	°T ambiente=	21,5 °C	Velocidad Angular=	200,0 RPM	°T ambiente=	22,5 °C
Velocidad Angular=	1,00 RPS	NRE	4438,15	Velocidad Angular=	3,333 RPS	NRE	14377,34
K	1,60	PTEORICO (W)	4,11E-03	K	1,80	PTEORICO (W)	1,71E-01
G=	39,63	Gx=	40,03	G=	252,22	Gx=	253,66
PARA TEMPERATURA DE 10°C				PARA TEMPERATURA DE 10°C			
VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001308 Kg/(m.s)	VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001304 Kg/(m.s)
T inicial=	10,0 °C	Viscosidad final=	0,001282 Kg/(m.s)	T inicial=	10,1 °C	Viscosidad final=	0,001282 Kg/(m.s)
T final=	10,7 °C	tiempo=	300 seg	T final=	10,7 °C	tiempo=	300 seg
Velocidad Angular=	80,0 RPM	°T ambiente=	22,3 °C	Velocidad Angular=	300,0 RPM	°T ambiente=	20,2 °C
Velocidad Angular=	1,333 RPS	NRE	5917,54	Velocidad Angular=	5,00 RPS	NRE	22190,77
K	1,60	PTEORICO (W)	9,74E-03	K	1,80	PTEORICO (W)	5,78E-01
G=	61,02	Gx=	61,64	G=	470,01	Gx=	474,06

PARA TEMPERATURA DE 12°C				PARA TEMPERATURA DE 12°C			
VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001236 Kg/(m.s)	VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001233 Kg/(m.s)
T inicial=	12,0 °C	Viscosidad final=	0,001219 Kg/(m.s)	T inicial=	12,1 °C	Viscosidad final=	0,001216 Kg/(m.s)
T final=	12,5 °C	tiempo=	300 seg	T final=	12,6 °C	tiempo=	300 seg
Velocidad Angular=	30,0 RPM	°T ambiente=	20,9 °C	Velocidad Angular=	100,0 RPM	°T ambiente=	21,3 °C
Velocidad Angular=	0,50 RPS	NRE	2347,90	Velocidad Angular=	1,667 RPS	NRE	7826,32
K	1,60	PTEORICO (W)	5,14E-04	K	1,60	PTEORICO (W)	1,90E-02
G=	14,4	Gx=	14,5	G=	87,72	Gx=	88,33
PARA TEMPERATURA DE 12°C				PARA TEMPERATURA DE 12°C			
VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001236 Kg/(m.s)	VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001236 Kg/(m.s)
T inicial=	12,0 °C	Viscosidad final=	0,001226 Kg/(m.s)	T inicial=	12,0 °C	Viscosidad final=	0,001222 Kg/(m.s)
T final=	12,3 °C	tiempo=	300 seg	T final=	12,4 °C	tiempo=	300 seg
Velocidad Angular=	60,0 RPM	°T ambiente=	21,5 °C	Velocidad Angular=	200,0 RPM	°T ambiente=	22,5 °C
Velocidad Angular=	1,00 RPS	NRE	4695,79	Velocidad Angular=	3,333 RPS	NRE	15652,65
K	1,60	PTEORICO (W)	4,11E-03	K	1,80	PTEORICO (W)	1,71E-01
G=	40,77	Gx=	40,94	G=	263,16	Gx=	264,62
PARA TEMPERATURA DE 12°C				PARA TEMPERATURA DE 12°C			
VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001236 Kg/(m.s)	VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001236 Kg/(m.s)
T inicial=	12,0 °C	Viscosidad final=	0,001222 Kg/(m.s)	T inicial=	12,0 °C	Viscosidad final=	0,001222 Kg/(m.s)
T final=	12,4 °C	tiempo=	300 seg	T final=	12,4 °C	tiempo=	300 seg
Velocidad Angular=	80,0 RPM	°T ambiente=	22,3 °C	Velocidad Angular=	300,0 RPM	°T ambiente=	20,2 °C
Velocidad Angular=	1,333 RPS	NRE	6261,06	Velocidad Angular=	5,00 RPS	NRE	23478,97
K	1,60	PTEORICO (W)	9,74E-03	K	1,80	PTEORICO (W)	5,78E-01
G=	62,77	Gx=	63,12	G=	483,46	Gx=	486,14

PARA TEMPERATURA DE 14°C				PARA TEMPERATURA DE 14°C			
VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001170 Kg/(m.s)	VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001170 Kg/(m.s)
T inicial=	14,0 °C	Viscosidad final=	0,001161 Kg/(m.s)	T inicial=	14,0 °C	Viscosidad final=	0,001161 Kg/(m.s)
T final=	14,3 °C	tiempo=	300 seg	T final=	14,3 °C	tiempo=	300 seg
Velocidad Angular=	30,0 RPM	°T ambiente=	20,9 °C	Velocidad Angular=	100,0 RPM	°T ambiente=	21,3 °C
Velocidad Angular=	0,50 RPS	NRE	2479,72	Velocidad Angular=	1,667 RPS	NRE	8265,74
K	1,60	PTEORICO (W)	5,13E-04	K	1,60	PTEORICO (W)	1,90E-02
G=	14,8	Gx=	14,9	G=	90,15	Gx=	90,51
PARA TEMPERATURA DE 14°C				PARA TEMPERATURA DE 14°C			
VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001170 Kg/(m.s)	VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001170 Kg/(m.s)
T inicial=	14,0 °C	Viscosidad final=	0,001158 Kg/(m.s)	T inicial=	14,0 °C	Viscosidad final=	0,001158 Kg/(m.s)
T final=	14,4 °C	tiempo=	300 seg	T final=	14,4 °C	tiempo=	300 seg
Velocidad Angular=	60,0 RPM	°T ambiente=	21,5 °C	Velocidad Angular=	200,0 RPM	°T ambiente=	20,2 °C
Velocidad Angular=	1,00 RPS	NRE	4959,44	Velocidad Angular=	3,333 RPS	NRE	16531,48
K	1,60	PTEORICO (W)	4,11E-03	K	1,80	PTEORICO (W)	1,71E-01
G=	41,90	Gx=	42,12	G=	270,45	Gx=	271,90
PARA TEMPERATURA DE 14°C				PARA TEMPERATURA DE 14°C			
VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001170 Kg/(m.s)	VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001170 Kg/(m.s)
T inicial=	14,0 °C	Viscosidad final=	0,001158 Kg/(m.s)	T inicial=	14,0 °C	Viscosidad final=	0,001155 Kg/(m.s)
T final=	14,4 °C	tiempo=	300 seg	T final=	14,5 °C	tiempo=	300 seg
Velocidad Angular=	80,0 RPM	°T ambiente=	22,3 °C	Velocidad Angular=	300,0 RPM	°T ambiente=	20,2 °C
Velocidad Angular=	1,333 RPS	NRE	6612,59	Velocidad Angular=	5,00 RPS	NRE	24797,22
K	1,60	PTEORICO (W)	9,74E-03	K	1,80	PTEORICO (W)	5,78E-01
G=	64,51	Gx=	64,85	G=	496,85	Gx=	500,17

PARA TEMPERATURA DE 16°C				PARA TEMPERATURA DE 16°C			
VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001106 Kg/(m.s)	VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001109 Kg/(m.s)
T inicial=	16,1 °C	Viscosidad final=	0,001098 Kg/(m.s)	T inicial=	16,0 °C	Viscosidad final=	0,001103 Kg/(m.s)
T final=	16,4 °C	tiempo=	300 seg	T final=	16,2 °C	tiempo=	300 seg
Velocidad Angular=	30,0 RPM	°T ambiente=	20,0 °C	Velocidad Angular=	100,0 RPM	°T ambiente=	21,7 °C
Velocidad Angular=	0,50 RPS	NRE	2615,33	Velocidad Angular=	1,667 RPS	NRE	8717,78
K	1,60	PTEORICO (W)	5,13E-04	K	1,60	PTEORICO (W)	1,90E-02
G=	15,2	Gx=	15,3	G=	92,58	Gx=	92,82
PARA TEMPERATURA DE 16°C				PARA TEMPERATURA DE 16°C			
VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001109 Kg/(m.s)	VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001109 Kg/(m.s)
T inicial=	16,0 °C	Viscosidad final=	0,001106 Kg/(m.s)	T inicial=	16,0 °C	Viscosidad final=	0,001101 Kg/(m.s)
T final=	16,1 °C	tiempo=	300 seg	T final=	16,3 °C	tiempo=	300 seg
Velocidad Angular=	60,0 RPM	°T ambiente=	22,2 °C	Velocidad Angular=	200,0 RPM	°T ambiente=	21,3 °C
Velocidad Angular=	1,00 RPS	NRE	5230,67	Velocidad Angular=	3,333 RPS	NRE	17435,55
K	1,60	PTEORICO (W)	4,11E-03	K	1,80	PTEORICO (W)	1,71E-01
G=	43,03	Gx=	43,08	G=	277,75	Gx=	278,81
PARA TEMPERATURA DE 16°C				PARA TEMPERATURA DE 16°C			
VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001112 Kg/(m.s)	VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001109 Kg/(m.s)
T inicial=	15,9 °C	Viscosidad final=	0,001103 Kg/(m.s)	T inicial=	16,0 °C	Viscosidad final=	0,001103 Kg/(m.s)
T final=	16,2 °C	tiempo=	300 seg	T final=	16,2 °C	tiempo=	300 seg
Velocidad Angular=	80,0 RPM	°T ambiente=	21,5 °C	Velocidad Angular=	300,0 RPM	°T ambiente=	20,7 °C
Velocidad Angular=	1,333 RPS	NRE	6791,61	Velocidad Angular=	5,00 RPS	NRE	26153,33
K	1,60	PTEORICO (W)	9,74E-03	K	1,80	PTEORICO (W)	5,77E-01
G=	65,37	Gx=	65,63	G=	510,25	Gx=	511,55

PARA TEMPERATURA DE 18°C				PARA TEMPERATURA DE 18°C			
VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001054 Kg/(m.s)	VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001057 Kg/(m.s)
T inicial=	18,0 °C	Viscosidad final=	0,001046 Kg/(m.s)	T inicial=	17,9 °C	Viscosidad final=	0,001051 Kg/(m.s)
T final=	18,3 °C	tiempo=	300 seg	T final=	18,1 °C	tiempo=	300 seg
Velocidad Angular=	30,0 RPM	°T ambiente=	20,0 °C	Velocidad Angular=	100,0 RPM	°T ambiente=	20,0 °C
Velocidad Angular=	0,50 RPS	NRE	2750,84	Velocidad Angular=	1,667 RPS	NRE	8942,06
K	1,60	PTEORICO (W)	5,13E-04	K	1,60	PTEORICO (W)	1,90E-02
G=	15,6	Gx=	15,7	G=	93,77	Gx=	94,00
PARA TEMPERATURA DE 18°C				PARA TEMPERATURA DE 18°C			
VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001054 Kg/(m.s)	VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001054 Kg/(m.s)
T inicial=	18,0 °C	Viscosidad final=	0,001046 Kg/(m.s)	T inicial=	18,0 °C	Viscosidad final=	0,001044 Kg/(m.s)
T final=	18,3 °C	tiempo=	300 seg	T final=	18,4 °C	tiempo=	300 seg
Velocidad Angular=	60,0 RPM	°T ambiente=	20,0 °C	Velocidad Angular=	200,0 RPM	°T ambiente=	20,0 °C
Velocidad Angular=	1,00 RPS	NRE	5501,68	Velocidad Angular=	3,333 RPS	NRE	18338,95
K	1,60	PTEORICO (W)	4,11E-03	K	1,80	PTEORICO (W)	1,71E-01
G=	44,13	Gx=	44,29	G=	284,85	Gx=	286,27
PARA TEMPERATURA DE 18°C				PARA TEMPERATURA DE 18°C			
VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001054 Kg/(m.s)	VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001054 Kg/(m.s)
T inicial=	18,0 °C	Viscosidad final=	0,001041 Kg/(m.s)	T inicial=	18,0 °C	Viscosidad final=	0,001051 Kg/(m.s)
T final=	18,4 °C	tiempo=	300 seg	T final=	18,1 °C	tiempo=	300 seg
Velocidad Angular=	80,0 RPM	°T ambiente=	20,0 °C	Velocidad Angular=	300,0 RPM	°T ambiente=	20,0 °C
Velocidad Angular=	1,333 RPS	NRE	7335,58	Velocidad Angular=	5,00 RPS	NRE	27508,42
K	1,60	PTEORICO (W)	9,73E-03	K	1,80	PTEORICO (W)	5,77E-01
G=	67,94	Gx=	68,36	G=	523,31	Gx=	523,95

PARA TEMPERATURA DE 20°C				PARA TEMPERATURA DE 20°C			
VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001003 Kg/(m.s)	VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001003 Kg/(m.s)
T inicial=	20,0 °C	Viscosidad final=	0,001001 Kg/(m.s)	T inicial=	20,0 °C	Viscosidad final=	0,000993 Kg/(m.s)
T final=	20,1 °C	tiempo=	300 seg	T final=	20,4 °C	tiempo=	300 seg
Velocidad Angular=	30,0 RPM	°T ambiente=	18,0 °C	Velocidad Angular=	100,0 RPM	°T ambiente=	18,0 °C
Velocidad Angular=	0,50 RPS	NRE	2889,59	Velocidad Angular=	1,667 RPS	NRE	9631,96
K	1,60	PTEORICO (W)	5,13E-04	K	1,60	PTEORICO (W)	1,90E-02
G=	16,0	Gx=	16,0	G=	97,32	Gx=	97,78
PARA TEMPERATURA DE 20°C				PARA TEMPERATURA DE 20°C			
VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001003 Kg/(m.s)	VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001006 Kg/(m.s)
T inicial=	20,0 °C	Viscosidad final=	0,001006 Kg/(m.s)	T inicial=	19,9 °C	Viscosidad final=	0,001003 Kg/(m.s)
T final=	19,9 °C	tiempo=	300 seg	T final=	20,0 °C	tiempo=	300 seg
Velocidad Angular=	60,0 RPM	°T ambiente=	18,0 °C	Velocidad Angular=	200,0 RPM	°T ambiente=	20,0 °C
Velocidad Angular=	1,00 RPS	NRE	5779,17	Velocidad Angular=	3,333 RPS	NRE	18799,20
K	1,60	PTEORICO (W)	4,10E-03	K	1,80	PTEORICO (W)	1,71E-01
G=	45,23	Gx=	45,17	G=	288,40	Gx=	288,76
PARA TEMPERATURA DE 20°C				PARA TEMPERATURA DE 20°C			
VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001003 Kg/(m.s)	VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,001006 Kg/(m.s)
T inicial=	20,0 °C	Viscosidad final=	0,001001 Kg/(m.s)	T inicial=	19,9 °C	Viscosidad final=	0,001001 Kg/(m.s)
T final=	20,1 °C	tiempo=	300 seg	T final=	20,1 °C	tiempo=	300 seg
Velocidad Angular=	80,0 RPM	°T ambiente=	18,0 °C	Velocidad Angular=	300,0 RPM	°T ambiente=	20,0 °C
Velocidad Angular=	1,333 RPS	NRE	7705,56	Velocidad Angular=	5,00 RPS	NRE	28198,80
K	1,60	PTEORICO (W)	9,73E-03	K	1,80	PTEORICO (W)	5,77E-01
G=	69,63	Gx=	69,72	G=	529,83	Gx=	531,13

PARA TEMPERATURA DE 22°C				PARA TEMPERATURA DE 22°C			
VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,000955 Kg/(m.s)	VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,000955 Kg/(m.s)
T inicial=	22,0 °C	Viscosidad final=	0,000953 Kg/(m.s)	T inicial=	22,0 °C	Viscosidad final=	0,000955 Kg/(m.s)
T final=	22,1 °C	tiempo=	300 seg	T final=	22,0 °C	tiempo=	300 seg
Velocidad Angular=	30,0 RPM	°T ambiente=	21,8 °C	Velocidad Angular=	100,0 RPM	°T ambiente=	21,9 °C
Velocidad Angular=	0,50 RPS	NRE	3033,52	Velocidad Angular=	1,667 RPS	NRE	10111,72
K	1,60	PTEORICO (W)	5,13E-04	K	1,80	PTEORICO (W)	2,14E-02
G=	16,4	Gx=	16,4	G=	105,76	Gx=	105,76
PARA TEMPERATURA DE 22°C				PARA TEMPERATURA DE 22°C			
VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,000955 Kg/(m.s)	VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,000955 Kg/(m.s)
T inicial=	22,0 °C	Viscosidad final=	0,000953 Kg/(m.s)	T inicial=	22,0 °C	Viscosidad final=	0,000951 Kg/(m.s)
T final=	22,1 °C	tiempo=	300 seg	T final=	22,2 °C	tiempo=	300 seg
Velocidad Angular=	60,0 RPM	°T ambiente=	21,5 °C	Velocidad Angular=	200,0 RPM	°T ambiente=	22,2 °C
Velocidad Angular=	1,00 RPS	NRE	6067,03	Velocidad Angular=	3,333 RPS	NRE	20223,44
K	1,60	PTEORICO (W)	4,10E-03	K	1,80	PTEORICO (W)	1,71E-01
G=	46,34	Gx=	46,39	G=	299,13	Gx=	299,82
PARA TEMPERATURA DE 22°C				PARA TEMPERATURA DE 22°C			
VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,000955 Kg/(m.s)	VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,000955 Kg/(m.s)
T inicial=	22,0 °C	Viscosidad final=	0,000951 Kg/(m.s)	T inicial=	22,0 °C	Viscosidad final=	0,000955 Kg/(m.s)
T final=	22,2 °C	tiempo=	300 seg	T final=	22,0 °C	tiempo=	300 seg
Velocidad Angular=	80,0 RPM	°T ambiente=	22,0 °C	Velocidad Angular=	300,0 RPM	°T ambiente=	21,9 °C
Velocidad Angular=	1,333 RPS	NRE	8089,37	Velocidad Angular=	5,00 RPS	NRE	30335,15
K	1,60	PTEORICO (W)	9,72E-03	K	1,80	PTEORICO (W)	5,77E-01
G=	71,35	Gx=	71,51	G=	549,54	Gx=	549,54

PARA TEMPERATURA DE 24°C				PARA TEMPERATURA DE 24°C			
VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,000911 Kg/(m.s)	VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,000911 Kg/(m.s)
T inicial=	24,0 °C	Viscosidad final=	0,000915 Kg/(m.s)	T inicial=	24,0 °C	Viscosidad final=	0,000915 Kg/(m.s)
T final=	23,8 °C	tiempo=	300 seg	T final=	23,8 °C	tiempo=	300 seg
Velocidad Angular=	30,0 RPM	°T ambiente=	21,8 °C	Velocidad Angular=	100,0 RPM	°T ambiente=	21,9 °C
Velocidad Angular=	0,50 RPS	NRE	3178,50	Velocidad Angular=	1,667 RPS	NRE	10595,00
K	1,60	PTEORICO (W)	5,12E-04	K	1,80	PTEORICO (W)	2,14E-02
G=	16,8	Gx=	16,7	G=	108,26	Gx=	108,00
PARA TEMPERATURA DE 24°C				PARA TEMPERATURA DE 24°C			
VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,000911 Kg/(m.s)	VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,000911 Kg/(m.s)
T inicial=	24,0 °C	Viscosidad final=	0,000915 Kg/(m.s)	T inicial=	24,0 °C	Viscosidad final=	0,000918 Kg/(m.s)
T final=	23,8 °C	tiempo=	300 seg	T final=	23,7 °C	tiempo=	300 seg
Velocidad Angular=	60,0 RPM	°T ambiente=	21,5 °C	Velocidad Angular=	200,0 RPM	°T ambiente=	22,2 °C
Velocidad Angular=	1,00 RPS	NRE	6357,00	Velocidad Angular=	3,333 RPS	NRE	21190,00
K	1,60	PTEORICO (W)	4,10E-03	K	1,80	PTEORICO (W)	1,71E-01
G=	47,44	Gx=	47,32	G=	306,19	Gx=	305,09
PARA TEMPERATURA DE 24°C				PARA TEMPERATURA DE 24°C			
VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,000911 Kg/(m.s)	VOL=	0,002 m3	Viscosidad inicial=	0,000911 Kg/(m.s)
T inicial=	24,0 °C	Viscosidad final=	0,000918 Kg/(m.s)	T inicial=	24,0 °C	Viscosidad final=	0,000913 Kg/(m.s)
T final=	23,7 °C	tiempo=	300 seg	T final=	23,9 °C	tiempo=	300 seg
Velocidad Angular=	80,0 RPM	°T ambiente=	22,0 °C	Velocidad Angular=	300,0 RPM	°T ambiente=	21,9 °C
Velocidad Angular=	1,333 RPS	NRE	8476,00	Velocidad Angular=	5,00 RPS	NRE	31785,00
K	1,60	PTEORICO (W)	9,72E-03	K	1,80	PTEORICO (W)	5,77E-01
G=	73,03	Gx=	72,77	G=	562,52	Gx=	561,84

Anexo 2

**Representación gráfica con datos experimentales
Gradiente (Gx) vs RPM.
Fórmula de regresión potencial**

