PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO

Escuela de Ingeniería Eléctrica
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO

Paul Bryan Ramírez Paredes

Sistema de auto-agitación controlado por computador para dispositivo medidor de sedimentación

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Civil Electrónico



Escuela de Ingeniería Eléctrica
Facultad de Ingeniería

Valparaíso, 28 de Diciembre de 2018



Sistema de auto-agitación controlado por computador para dispositivo medidor de sedimentación

Paul Bryan Ramírez Paredes

Informe Final para optar al título de Ingeniero Civil Electrónico,

aprobada por la comisión de la

Escuela de Ingeniería Eléctrica de la

Facultad de Ingeniería de la

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

conformada por

Sr. Héctor Vargas Oyarzún

Profesor Guía

Sr. Gonzalo Farías Castro

Segundo Revisor

Sr. Sebastián Fingerhuth Massmann

Secretario Académico

Valparaíso, 28 de Diciembre de 2018

Dedicado a mis padres María y Orlando, a mis hermanos y mi pareja Nataly, quienes me apoyaron y brindaron su ayuda desde el momento en que decidí emprender este viaje tan largo.

Agradecimientos

No puedo comenzar los agradecimientos sin nombrar a mis padres, los cuales han luchado siempre y ante cualquier adversidad, enseñándome y entregándome lo más importante en la vida, los valores y las ganas de seguir, aunque todo parezca en nuestra contra. Sin ellos no hubiera logrado estar acá, muchas gracias por todo Mamá y Papá.

También quiero agradecer a mis hermanos, quienes ayudaron enormemente a mis padres para que yo pudiese estudiar tan lejos de casa y además me entregaron siempre la confianza y el apoyo que muchas veces necesité. Especialmente quiero referirme a mi hermana Blanca, quien desde el primer momento en que decidí estudiar acá me acompañó y se encargó de la administración de los fondos destinados a mi persona.

A mi polola, Nataly, quien es la más fiel testigo del esfuerzo y empeño que dedique en estos 7 años de carrera, quien desde el primer momento estuvo ahí apoyándome, escuchándome y lo más importante nunca dejó de creer en mí, incluso cuando yo no lo hacía. Muchas gracias.

A los amigos que deja la universidad, porque no todo se trata de estudio, y realmente conocí gente espectacular con la cual viví momentos increíbles, desde un partido de futbol en una de las tantas canchas de Valparaíso y Viña del Mar, hasta la más simple junta para conversar o jugar.

Finalmente quiero agradecer enormemente al profesor Héctor Vargas, quien desde un comienzo y a lo largo del año estuvo presente para brindar ayuda, consejos y especialmente ánimos, muchas gracias profesor.

Valparaíso, 28 de Diciembre de 2018

P.R.P

Resumen

La sedimentación es un proceso que, ante la acción de alguna fuerza, como la gravitacional, separa las soluciones sólidas y líquidas de una mezcla. En minería se busca reutilizar el agua debido a la escasez de este preciado recurso, mediante tanques espesadores se separa el agua del relave obtenido luego del proceso de flotación. Debido a que es un proceso lento, se busca su aceleración aplicando químicos que aglutinen las sustancias sólidas en suspensión facilitando así su precipitación, estos químicos son llamados floculantes.

El presente informe tiene por finalidad, en primera instancia, dar a conocer el contexto y la importancia de poder reutilizar la mayor cantidad de agua en el campo de la minería, debido a la innegable importancia vital del recurso hídrico. Para esto se presenta una solución, basada en la mejora del sistema creado por Camilo González. Esta solución consiste en el cambio de la estructura, añadiendo la posibilidad del desarrollo de un sistema de auto agitación que sea controlado por computador mediante una interfaz gráfica de usuario en LabVIEW. Es así como se requiere el uso de un motor, el cual debido a las características del sistema y sus requerimientos se define como paso a paso. Además, se realizan cálculos de torque y potencia para poder dimensionar el motor que finalmente se adquiere. Utilizando la tarjeta de desarrollo Arduino, se crea un código para el control del motor, sin embargo, es necesaria además la configuración para poder realizar comunicación vía puerto serie con LabVIEW, lo que permite el accionamiento desde una interfaz gráfica en el computador.

Finalmente se muestran los resultados luego de las modificaciones realizadas en la estructura, así como la integración del motor y su control. Obteniendo un sistema sedimentador auto agitado, controlado mediante una interfaz gráfica que permite la toma y análisis de hasta 4 muestras distintas de relave.

El objetivo final es obtener un sistema que reemplace los estudios de sedimentación manuales que usualmente se utilizan, los cuales presentan errores en la medición, provocando con ello un aumento en el gasto ocasionado por el alto consumo de químicos floculantes. Un sistema automático permitiría al químico realizar otras tareas y no estar atento al ensayo de sedimentación, se reduce el error humano y disminuiría los costos al encontrar un punto óptimo de dosificación de floculante.

Palabras claves: Sedimentación, Tanques espesadores, Flotación, Floculante, LabVIEW, Arduino.

Abstract

The sedimentation is a process that, in front of the action of some force, like the gravity, separates the solid and liquid solutions of a mixture. In mining it is sought to reuse water due to the scarcity of this precious resource, through thickener tanks the water is separated from the tailings obtained after the flotation process. Because it is a slow process, its acceleration is sought by applying chemicals that agglutinate solid substances in suspension facilitating its precipitation, these chemicals are called flocculants.

The purpose of this report is primarily to inform the context and the importance of being able to reuse the greatest amount of water in the mining field, due to the undeniable vital importance of the water resource. For this a solution is presented, based on the improvement of the system created by Camilo González. This solution consists in the change of the structure, adding the possibility of the development of a self-agitation system that is controlled by computer through a graphical user interface in LabVIEW. This is how the use of an motor is required, which due to the characteristics of the system and its requirements is defined as step by step. In addition, torque and power calculations are performed to be able to size the motor that is finally acquired. Using the Arduino development card, a code is created for motor control, however, it is also necessary the configuration to be able to communicate via the serial port with LabVIEW, which allows the actuate from a graphic interface on the computer.

Finally, the results are shown after the modifications made to the structure, as well as the integration of the motor and its control. Obtaining a self-agitated sedimentation system, controlled by a graphical interface that allows the taking and analysis of up to 4 different samples of tailings.

The final objective is to obtain a system that replaces the manual sedimentation studies that are usually used, those that present errors in the measurement, thus causing an increase in the expense caused by the high consumption of flocculating chemicals. An automated system would allow the chemist to perform other tasks and not be attentive to the sedimentation test, reduce human error and reduce costs by finding an optimal flocculant dosing point.

Key words: Sedimentation, Thickener tanks, Flotation, Flocculants, LabVIEW, Arduino.

Índice general

Introducción 1

1 Antecedentes generales 4
1.1 Contexto del problema 4
1.1.1 Flotación 5
1.1.2 Sedimentación 6
1.2 Problemática 7
1.2.1 Ensayo de sedimentación 8
1.2.2 Agua recuperada 11
1.3 Solución 14
1.3.1 Estado del arte 15
1.3.2 Propuesta a desarrollar 17
1.4 Objetivos 18

2 Diseño de la solución 19
2.1 Diseño estructura mecánica 19
2.2 Diseño sistema de accionamiento 21
2.2.1 Dimensionamiento 22
2.2.2 Elección del motor 24
2.2.3 Acople del motor 26
2.3 Esquema de funcionamiento 31

3 Selección de materiales 32
3.1 Driver de control 32
3.2 Arduino 34
3.2.1 Shield CNC 34
3.3 LabVIEW 35
3.4 Panel led 36
3.5 Cámara Logitech HD C270 36
3.6 Fuente Switching 37
3.7 Caja 37

4 Implementación de la solución 40

4.1 Control por computador 40
4.1.1 Programa en Arduino 41
4.1.2 Programa en LabVIEW 44
4.2 Ensamble de la estructura 46
4.3 Secuencias de giro 50

5 Pruebas y resultados 52
5.1 Pruebas Iniciales 52
5.2 Pruebas finales 54

Discusión y conclusiones 57

Bibliografía 60

Introducción

El continuo avance tecnológico y, en especial, en el campo de la teoría y aplicación del control automático, generaron un punto de inflexión en el cómo se gestionaban las diversas dinámicas de la producción minera. Es decir, se empezaron a incluir nuevas formas de producción, mucho más específicas, eficientes y seguras. La automatización mezcla estos avances tecnológicos con la teoría del control, por tanto, correspondería a la conversión de un proceso, procedimiento o equipo, a una operación que deja de tener la intervención humana.

Particularmente en el ámbito minero, es posible coordinar de manera automática la operación de diversos equipos o recursos de análisis de información, a modo de mejorar la toma de decisiones y permitir generar reportes al instante. El objetivo, de incorporar automatización en la industria, es agilizar los procesos permitiendo además mejorar los estándares y normas respecto a la seguridad y calidad del servicio, afectando directamente los costos de producción que estos conllevan, sin dejar de lado que la producción de mineral mantenga a la compañía dentro de los mercados más competitivos, y a su vez disminuir los efectos dañinos causados al medioambiente.

Específicamente, está la constante búsqueda de la disminución de los costos de producción, manteniendo siempre un producto final de alta calidad, además de la importancia en la minimización del impacto sobre el medio ambiente y del consumo energético e hídrico. Es en este último punto donde el presente proyecto se contextualiza, debido a la escasez de agua principalmente en las zonas norte y centro del país, que es donde se ubican la mayoría de las faenas mineras.

El agua es un recurso indispensable para la vida, por lo que su buen uso es esencial, más aún cuando es conocida la situación de sequía o escasez que sufren algunas zonas del país. En este contexto la Comisión Chilena del Cobre sostiene, en su informe "Consumo de agua en la minería del cobre al 2017", que "Si bien el uso del agua en la industria minera representa solo el 3% del suministro de agua en Chile, muchas de las concesiones y operaciones mineras se ubican en zonas donde la escasez de agua es un factor limitante para el desarrollo regional" [1].

La baja ley de los minerales procesados, provoca la realización de un proceso llamado flotación, en el cual básicamente se separa el mineral de cobre de otros minerales o desechos, mediante la creación de burbujas a las que se adhieren las partículas hidrofóbicas. Pero, esto significa la utilización de una enorme cantidad de agua, que en su mayoría termina completamente

contaminada en los tranques de relave, es por esto que nace la necesidad que esta sea recirculada para disminuir el gasto del recurso hídrico.

Para poder recuperar una gran parte del agua, remanente en los relaves obtenidos luego del proceso de flotación, se utiliza un proceso natural llamado sedimentación, el cual separa el desecho solido de la solución líquida gracias a la acción de alguna fuerza, preferentemente gravedad. Pero este proceso generalmente es lento, y para no detener la producción se busca la forma de acelerarlo, añadiendo para ello químicos llamados floculantes. Estos químicos cumplen la tarea de aglomerar una cierta cantidad de partículas, conformando flóculos que alcanzarán tamaños considerables, precipitándose en el fondo del tanque de una manera más rápida. De esta forma el sólido se deposita en el fondo, mientras que el agua se mantendrá en la superficie permitiendo su reutilización.

El estudio de la velocidad de sedimentación y de la dosificación óptima de floculante, la realizan mayormente químicos de forma totalmente manual, donde con cronómetro en mano observan y anotan los tiempos que demora en sedimentar una muestra de relave contenida en probetas. Esto trae consigo un error humano que aleja los resultados del punto óptimo de dosificación, lo que provoca pérdidas económicas para la empresa. Es así que se vuelve necesario diseñar un sistema que realice las pruebas de forma totalmente automática, controlada mediante una interfaz de usuario en una computadora y que entregue reportes indicando principalmente el valor de la velocidad a la que sedimentan una serie de muestras del relave, dando un valor de dosificación de floculante lo más cercana al punto óptimo, evitando así el error humano.

Anteriormente el alumno Camilo González realizó su proyecto de título denominado Desarrollo e implementación de un sistema de medición automático de velocidad de sedimentación. Este consistió en el desarrollo de un instrumento que, mediante una cámara, automatiza el proceso de medición de velocidad de sedimentación, permitiendo a un único experto la medición de hasta tres muestras diferentes al mismo tiempo, sin la necesidad del monitoreo constante por parte del laboratorista [2]. Sin embargo, la agitación de las probetas se realiza de manera manual, manteniendo al laboratorista aún destinando demasiado tiempo en estas pruebas. Además, la estructura no posee las características necesarias para trabajar en un entorno tal como un laboratorio.

Es así que el presente proyecto busca mejorar el anterior prototipo, cambiando principalmente la estructura mecánica para que sea posible la agitación automática y en simultaneo de todas las probetas. Esto se logra al incorporar un motor que sea accionado mediante una interfaz gráfica de usuario, integrada al programa anteriormente diseñado por Camilo González. Además, al cambiar la estructura por una más compacta, se vuelve posible aumentar el número de probetas, permitiendo realizar una mayor cantidad de pruebas de sedimentación.

El presente informe presenta los siguientes contenidos, en el capítulo 1 se explica y profundiza el contexto y los antecedentes que dieron origen al proyecto. Así mismo, para una mejor visión y comprensión se formula un ejemplo ilustrativo, basado en información otorgada por el ingeniero metalurgista José Quinteros de la compañía contractual minera Candelaria, y complementos obtenidos de distintas fuentes y documentos. Además, se presenta la solución propuesta,

acompañada del estado del arte que expone sistemas similares ya existentes. Finalmente se plantean los objetivos del proyecto.

El capítulo 2 aborda el diseño de la solución propuesta, específicamente se muestra un diseño 3D de la nueva estructura, utilizando el software Rhinoceros. En este ámbito, se presenta la estructura adquirida en la empresa Serquimet, la cual se asemeja bastante al diseño propuesto. Además, se realiza el diseño del sistema de accionamiento que permita la agitación automática de las probetas. Para ello primero se realizan cálculos con la finalidad de dimensionar el motor, siguiendo con la elección del mismo basado en los requerimientos y resultados obtenidos. Finalmente se exponen distintos sistemas de transmisión de potencia, concluyendo con la elección del más acorde para el proyecto.

El capítulo 3 se refiere a la selección de los distintos elementos necesarios para la correcta implementación de la solución propuesta, tanto hardware como software. Entre estos destacan el uso de un driver o controlador para el motor paso a paso que se utilizará, la tarjeta de desarrollo Arduino en la que se escribe el código que determina las acciones que tiene que ejecutar el motor, así como también el modulo o Shield que permite una mejor conexión entre Arduino y el motor. El software, desarrollado por National Instruments, LabVIEW permite crear una interfaz gráfica desde donde el usuario puede accionar y dar instrucciones al motor, para ello se realiza comunicación vía puerto serie con Arduino. Adicionalmente se muestra el panel led que entrega luz de manera uniforme a las probetas, mejorando de este modo la obtención de las imágenes por parte la cámara Logitech HD C270. Por último, se muestra la fuente conmutada que alimentará al motor.

En el capítulo 4 se exhibe la implementación de la solución propuesta, iniciando con la explicación de la estructura presente en la comunicación LabVIEW-Arduino vía puerto serie. Continúa con el detalle del programa realizado en Arduino, mostrando algunas líneas del código, especialmente las que permiten entablar la comunicación con LabVIEW y el que determina la secuencia de agitación que se debe ejecutar. En la parte del programa diseñado en LabVIEW, se muestran principalmente los bloques necesarios para la comunicación serial, además de la interfaz gráfica de usuario final obtenida al integrar el control del motor al programa principal. En último lugar se muestran los resultados al ensamblar la base del sistema, el acople del motor y la incorporación del panel led.

Para finalizar, el capítulo 5 presenta distintas pruebas de funcionamiento tanto de la estructura mecánica como del software final obtenido.

1 Antecedentes generales

La sedimentación es un proceso natural que separa las fases sólidas y líquidas de una mezcla, mediante la acción de alguna fuerza, como por ejemplo la gravedad. Este proceso es muy importante para clarificar, potabilizar y reutilizar el agua contaminada con alguna sustancia sólida. En minería se utiliza la sedimentación para poder reutilizar el agua, debido a la escasez de agua principalmente en el Norte y Centro del país [1]. Este trabajo se enmarca en el contexto del proceso de sedimentación de minerales a nivel industrial y su aplicación en los procesos productivos de la gran minería. Particularmente, este capítulo presenta los antecedentes que dieron origen a este proyecto y define los objetivos del mismo.

1.1 Contexto del problema

El agua es un recurso esencial para la supervivencia de todas las formas de vida conocidas. Sin ella no podríamos vivir, y lo cierto es que cada vez disponemos de menos agua potable en el planeta, por lo que es importante realizar un uso racional de este recurso. La industria minera se enfrenta a tres desafíos estratégicos de largo plazo, en relación al uso del agua. Lo primero es asegurar agua para satisfacer la producción cada vez en aumento, lo segundo es reducir el consumo del agua de su producción, además del consumo de energía y las emisiones ambientales, y finalmente gestionar de manera integral el vínculo entre agua, energía y emisiones, de manera que alguna mejora en una de estas 3 áreas no cree conflicto en las demás [1]. El consumo de agua por parte del sector minero en Chile alcanza el 3% según información entregada por la Dirección General de Aguas (ver Tabla 1-1).

Tabla 1-1 consumo de agua sector minero en 2016.

Agua de origen continental	Agua de mar	Agua recirculada	Total
13,61 [m^3/seg]	2,45 [m^3/seg]	43,25 [m^3/seg]	59,31 [m^3/seg]

Aunque el consumo de agua por parte del sector minero es solo del 3%, presenta el problema de que sus faenas se encuentran principalmente en la zona norte y centro del país, donde existe una menor disponibilidad del recurso hídrico. En general, los minerales con mayor nivel de leyes

requieren de menos agua para ser procesados y viceversa, es decir, que a menor ley del mineral se necesitará de mayor cantidad de agua. Así, con el agotamiento de los recursos, la explotación de minerales de baja ley va en aumento, aumentando así la demanda de agua [1]. La tasa de recirculación del agua está sobre el 70%, lo cual genera un impacto económico, debido a que se deben realizar otros procesos para separar el agua del relave mediante un proceso denominado sedimentación, el cual se apoya de la utilización de Floculante.

1.1.1 Flotación

Dentro de los procesos que más requieren del recurso hídrico está la Flotación, el cual es un procedimiento que permite concentrar el cobre de la pulpa del material mineralizado que viene del proceso de molienda. En este proceso, el mineral molido se adhiere superficialmente a burbujas de aire previamente introducidas, separando así el mineral útil. La adhesión del mineral a estas burbujas de aire depende exclusivamente de las propiedades hidrofóbicas y aerofóbicas de cada especie mineral que se requiera separar del desecho o ganga. Se utilizan reactivos para mutar la condición hidrofílica a hidrofóbica de los minerales [3].

El proceso consiste primero en ingresar la pulpa mientras se hace burbujear aire desde el interior y se agita con un aspa giratoria para mantenerla en constante movimiento, lo que facilita y mejora el contacto de las partículas de mineral dispersas en la pulpa con los reactivos, el agua y el aire. En la superficie se forma una cama de espuma con el mineral, la cual es rescatada, ver Figura 1-1. El agua con la ganga debe ser desechada, lo que significa un gran problema, ya que el agua requerida en este proceso es bastante.

Gran parte del agua contenida en las pulpas producidas por la flotación es retirada en los espesadores de concentrado, los que realizan simultáneamente los procesos de sedimentación y clarificación. El producto obtenido en la descarga de los espesadores de concentrado puede contener entre 40% y 65% de sólidos. El agua remanente en estos concentrados espesados es posteriormente retirada mediante filtros hasta obtener un valor final que va desde un 8% hasta un 10% de humedad en el producto final.

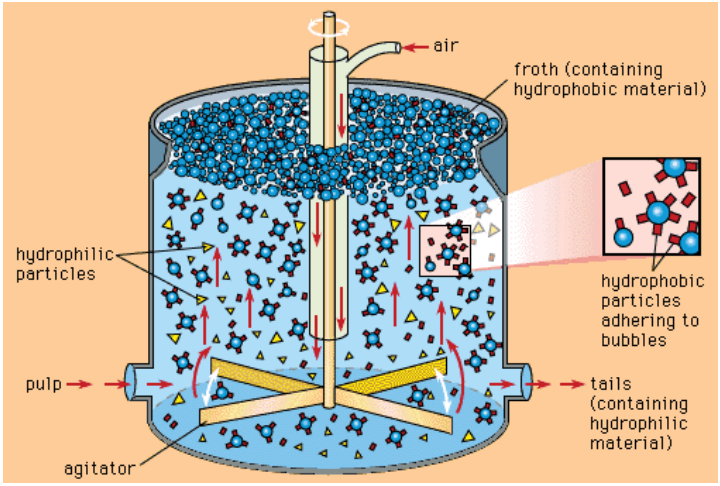


Figura 1-1 Esquema proceso de flotación.

1.1.2 Sedimentación

Luego del proceso de flotación, el relave resultante es enviado a tanques espesadores con el fin de, y tal como su nombre lo indica, espesarlo para obtener un desecho con la menor cantidad de agua posible. Esto es gracias al proceso de sedimentación, el cual consiste en la separación por la acción de la fuerza de gravedad, centrifuga, magnética o eléctrica, de las fases sólidas y líquidas de una suspensión diluida, para obtener una suspensión concentrada y un líquido claro. En la Figura 1-2 se observa el cambio en el tiempo que se produce en el proceso de sedimentación, siendo H_0 el instante de inicio, y H_4 el momento final donde ya se encuentra el sólido sedimentado en el fondo del recipiente.

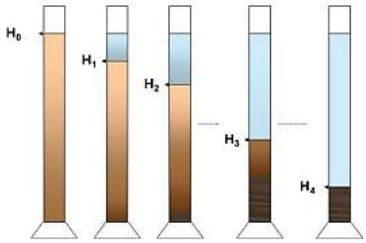


Figura 1-2 Proceso de sedimentación.

En los tanques de espesamiento, las partículas sólidas que son más pesadas que el agua se asientan en el fondo del tanque por acción de la gravedad. Para acelerar este proceso se utilizan reactivos químicos, llamados floculantes, los cuales generan que se aglutinen las sustancias coloidales presentes en el agua, permitiendo así una mejor decantación y filtración [4], ver Figura 1-3 y Figura 1-4.

Hay tres formas de sedimentación:

- Independiente, en donde las partículas se hunden una indiferente de la otra.
- Floculante, en donde el proceso se acelera al formar agregaciones de partículas.
- Impedida, en la cual la tasa se reduce por la alta concentración de partículas.

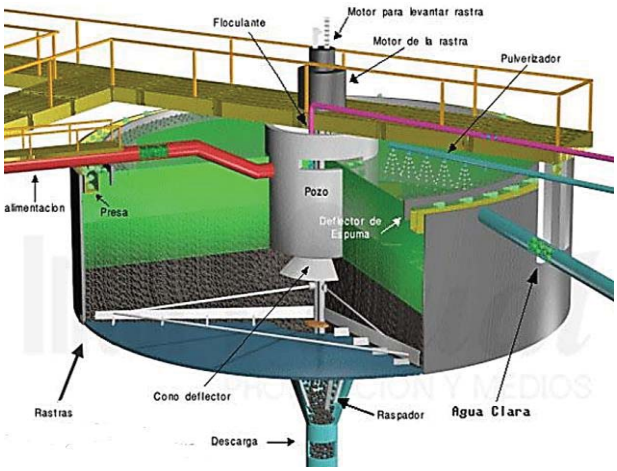


Figura 1-3 Esquema tanque de espesamiento.



Figura 1-4 Tanques espesadores reales.

La ecuación (1-1) expresa la velocidad teórica de sedimentación de una partícula, la que se define como la rapidez alcanzada por una partícula que se asienta en el tanque, a medida que la gravedad vence tanto la tendencia de flotar como la resistencia del líquido a permitir su paso [5].

$$V_c = \left[\frac{4}{3}.\frac{g \cdot (\rho_s - \rho) \cdot d}{C_d \cdot \rho}\right]^{\frac{1}{2}} \quad (1\text{-}1)$$

Donde:

- V_c=Velocidad final de sedimentación de una partícula [m/h]
- g=aceleración de gravedad [m/s^2]
- ρ_s=densidad de la partícula [g/L]
- ρ=densidad del líquido [g/L]
- C_d=coeficiente de resistencia al paso [-]

1.2 Problemática

La escasez de agua en el norte y sur del país, y la gran cantidad de este preciado recurso utilizado en las faenas mineras, obliga a buscar formas de reducir su consumo. Si bien en el último tiempo ha aumentado la utilización de agua de mar, en donde alcanza los 2,43 [m^3/seg] siendo un 15% del agua utilizada en minería, no es una solución apropiada para todas las empresas mineras debido al alto costo inicial que significa un proyecto de esta magnitud, dado a las distancias entre el mar y las faenas [1]. Es por ello que el recurso más utilizado es la recirculación del agua, mediante el proceso de espesamiento, en donde se busca separar el agua del relave mediante sedimentación. Pero este proceso implica tiempo, y para acelerarlo se utilizan químicos floculantes, representando así un costo económico extra. Para conocer la cantidad optima de dosificación del floculante se realizan ensayos en los laboratorios químicos, generalmente manuales, donde un laboratorista observa y anota la velocidad con la cual se sedimentan las muestras del relave, ver Figura 1-5. El error humano, implicado en este ensayo, provoca que no se logré obtener la dosificación optima, generando un coste y perdidas económicas para la empresa.



Figura 1-5 Pruebas de sedimentación.

Por ejemplo, en minera Candelaria se realiza este ensayo 1 a 2 veces por mes, en donde el error del mismo provoca que la dosificación de floculante varíe entre 6.0 a 6.5 [g/t] diluido a 0.2 [g/l]. El volumen del relave en los espesadores es de 60.500 [m^3] y se le inyecta floculante de manera constante. Con estos datos se puede realizar un ejemplo que muestre el coste económico que significa no conocer el punto óptimo de la dosificación de floculante.

1.2.1 Ensayo de sedimentación

Para poder comprender y visualizar de mejor manera la importancia que tiene la realización y obtención de un buen ensayo de sedimentación, se realiza un ejemplo comparativo. Para ello se cuenta con información otorgada por el Ingeniero Metalurgista José Quinteros, de la compañía contractual minera Candelaria, además de complementar con información obtenida de distintos documentos.

En la Figura 1-6 se muestra la curva entre velocidad de sedimentación y la dosificación en gramos por tonelada, obtenidas en las pruebas de laboratorio de la Compañía Contractual Minera Candelaria, la cual será utilizada para hacer un estudio sobre la importancia de obtener un resultado correcto para la dosificación de floculante.

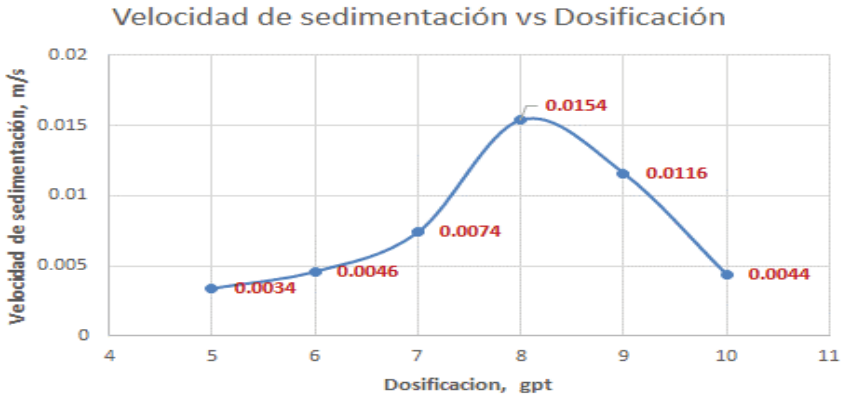


Figura 1-6 Gráfico velocidad de sedimentación [m/s] vs dosificación [g/t].

Primero se realizarán los cálculos para comprender la diferencia de dosificación de floculante, velocidad de sedimentación, costo diario por uso de floculante y veces por día que se puede realizar el proceso de sedimentación. Se consideran 4 casos, para distintas velocidades de sedimentación y dosificación de floculante, según la Figura 1-6.

CASO A: Para poder satisfacer la inyección de floculante, considerando 60.500 [m^3] de relave en el espesador, se tiene que el punto óptimo de dosificación es 8.0 [g/t]. La velocidad de sedimentación es de 0.015 [m/s] con una dosificación de 8 [g/t]. Suponiendo la relación 1/1 entre Kilogramo y Litro tenemos que:

$$60.500\ [m^3] = 60.500.000\ [\ l]$$

$$60.500.000\ [\ l] = 60.500.000\ [\ kg] = 60.500\ [t]$$

Así tenemos 60.500 toneladas de relave. Entonces:

$$8.0\ \left[\frac{g}{t}\right]\ \cdot\ 60.500\ [t] = 484.000\ [g] = 484[\ kg]$$

Es decir, serán necesarios 484.000 [g] de floculante, y suponiendo que el precio de 1 [kg] de floculante es de $1.000.

$$Total = \$484.000$$

Si la altura, de la interface solido-líquido, para una sedimentación correcta es de 10 [m], entonces, cada 666,67 [s] se completará la sedimentación para un relave de 60.500 [m^3], por lo que al día se puede repetir aproximadamente 130 veces el proceso.

$$0.015\left[\frac{m}{s}\right]\ \cdot\ 666{,}67[s] \cong 10\ [m]$$

$$veces\ totales\ al\ día = \frac{24[horas]}{666.67[segundos]} = \frac{86.400[segundos]}{666.67[segundos]} \cong 130[-]$$

$$Costo\ total\ al\ día = 130 \cdot 484.000 = \$62.920.000$$

CASO B: El estudio arroja que se necesitan 6.0 [g/t] de floculante, la velocidad de sedimentación es de 0.0046 [m/s]. Suponiendo la relación 1/1 entre Kilogramo y Litro tenemos que:

$$60.500\ [m^3] = 60.500.000\ [l]$$

$$60.500.000\ [l] = 60.500.000\ [kg] = 60.500\ [t]$$

Así tenemos 60.500 toneladas de relave. Entonces:

$$6.0\left[\frac{g}{t}\right] \cdot 60.500[t] = 363.000[g] = 363\ [kg]$$

Es decir, serán necesarios 363.000[g] de floculante, y suponiendo que el precio de 1 [kg] de floculante es de $1.000. Significando un total de $363.000.

$$Total = \$363.000$$

Si la altura, de la interface solido-líquido, para una sedimentación correcta es de 10 [m], entonces, cada 2.174 [s] se completará la sedimentación para un relave de 60.500 [m^3], por lo que al día se podría repetir aproximadamente 40 veces el proceso.

$$0.0046\left[\frac{m}{s}\right] \cdot \quad 2.174[s] \cong 10\ [m]$$

$$veces\ totales\ al\ día = \frac{24[horas]}{2.174[segundos]} = \frac{86.400[segundos]}{2.174[segundos]} \cong 40[-]$$

$$Costo\ total\ al\ día = 40 \cdot 363.000 = \$14.520.000$$

Reduce en 3,45 veces la cantidad de material que se podría sedimentar al día, respecto al punto óptimo, generando así también un costo extra de energía, personal, maquinaria y una menor cantidad de mineral procesado, conllevando menor producción, al tener que trabajar 3,45 veces más para obtener el mismo resultado.

CASO C: El estudio arroja que se necesitan 6.5 [g/t] de floculante, la velocidad de sedimentación es de 0.0058 [m/s].

Suponiendo la relación 1/1 entre Kilogramo y Litro tenemos que:

$$60.500[m^3] = 60.500.000\ [l]$$

$$60.500.000\ [l] = 60.500.000\ [kg] = 60.500\ [t]$$

Así tenemos 60.500 toneladas de relave. Entonces:

$$6.5\left[\frac{g}{t}\right] \cdot\ 60.500[t] = 393.250[g] = 393{,}25\ [kg]$$

Es decir, serán necesarios 393.250 [g] de floculante, y suponiendo que el precio de 1 [kg] de floculante es de $1.000.

$$Total = \$393.250$$

Si la altura, de la interface solido-líquido, para una sedimentación correcta es de 10 m, entonces, cada 1724 (s) se completará la sedimentación para un relave de 60.500 [m^3], por lo que al día será necesario repetir aproximadamente 50 veces por día el proceso.

$$0.0058\left[\frac{m}{s}\right] \cdot\ 1.724[s] \cong 10\ [m]$$

$$veces\ totales\ al\ día = \frac{24[horas]}{1.724[segundos]} = \frac{86.400[segundos]}{1.724[segundos]} \cong 50[-]$$

$$Costo\ total\ al\ día = 50 \cdot 393.250 = \$19.662.500$$

Reduce en 2,68 veces la cantidad de material que se podría sedimentar al día, respecto al punto óptimo, generando así también un costo extra de energía, personal, maquinaria y una menor cantidad de mineral procesado, aunque mejora respecto al caso anterior.

CASO D: El estudio arroja que se necesitan 10.0 [g/t] de floculante, la velocidad de sedimentación es de 0.0044 [m/s]. Suponiendo la relación 1/1 entre Kilogramo y Litro tenemos que:

$$60.500\ [m^3] = 60.500.000\ [l]$$

$$60.500.000\ [l] = 60.500.000\ [kg] = 60.500\ [t]$$

Así tenemos 60.500 toneladas de relave. Entonces:

$$10.0\left[\frac{g}{t}\right] \cdot 60.500[t] = 605.000[g] = 605\ [kg]$$

Es decir, serán necesarios 605.000[g] de floculante, y suponiendo que el precio de 1 [kg] de floculante es de $1.000.

$$Total = \$605.000$$

Si la altura, de la interface solido-líquido, para una sedimentación correcta es de 10 [m], entonces, cada 2.272 [s] se completará la sedimentación para un relave de 60.500 [m^3], por lo que al día se podría repetir aproximadamente 38 veces el proceso.

$$0.0044\left[\frac{m}{s}\right] \cdot 2.272[s] \cong 10\ [m]$$

$$veces\ totales\ al\ día = \frac{24[horas]}{2.272[segundos]} = \frac{86.400[segundos]}{2.272[segundos]} \cong 38[-]$$

$$Costo\ total\ al\ día = 38 \cdot 605.000 = \$22.990.000$$

Es el peor de los casos, ya que presenta los mayores costos y la menor cantidad de veces que se podría sedimentar material al día, respecto al punto óptimo.

1.2.2 Agua recuperada

En el inciso anterior se inicia el ejemplo comparativo, sin embargo, lo más importante es poder conocer la cantidad de agua que se puede recuperar al día según la cantidad de floculante aplicado.

Con el fin de explicar y establecer la forma para realizar los distintos cálculos, se definen las ecuaciones necesarias. Primero se necesita saber el porcentaje del agua a recuperar. Como se observa en la Figura 1-7, la zona A o de flotación ,se realiza normalmente a una tasa que varía entre un 25% y un 40% de sólidos. Con estos valores, los requerimientos de agua durante la flotación pueden variar entre 3 y 1.5 [m^3/ton] de mineral [6]. En la zona B se presenta el proceso siguiente a la flotación, es decir espesamiento, donde se aumenta el porcentaje de sólidos a entre 40% y 60%, con la consiguiente recuperación de agua. Finalmente, en la zona C, la pulpa de

concentrados se lleva a filtración, donde nuevamente se recupera agua, quedando los concentrados con porcentajes de humedad de alrededor del 10% [7].

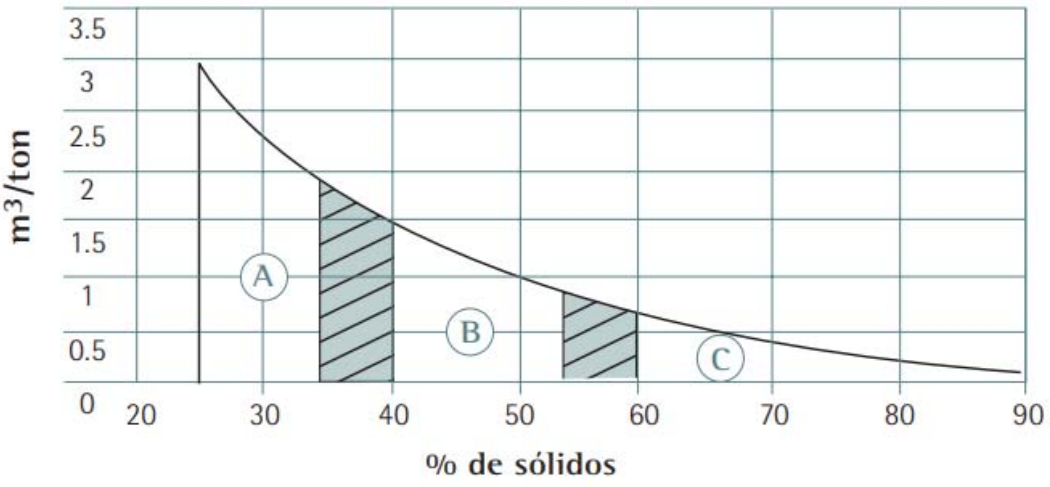


Figura 1-7 Gráfica típica de requerimientos de agua en procesos de plantas concentradoras.

Se considera que el relave entrante al tanque de espesamiento está compuesto por 75% de agua y 25% de sólidos, y que a su vez el relave obtenido a la salida del tanque de espesamiento se compone por un 40% de agua y un 60% de sólido.

$$Agua\ (In) = Relave_{in}[m^3]\ \cdot\ 0.75 \tag{1-2}$$

$$Sólido\ (In) = Relave_{in}[m^3]\ \cdot\ 0.25 \tag{1-3}$$

El material obtenido a la salida estará formado por un 60% de sólido y un 40% de agua, es decir: Solido obtenido a la salida es igual al solido de entrada, se considera que todo el sólido es sedimentado.

$$Relave_{out} =\ Sólido\ (In)\ \cdot \frac{100\%}{60\%} \tag{1-4}$$

$$Agua\ (Out) = Relave_{out}[m^3]\ \cdot \frac{40\%}{100\%} \tag{1-5}$$

Entonces, el agua recuperada será:

$$Agua\ (In) - Agua(Out) = Relave_{in}[m^3]\ \cdot\ 0.75 - Relave_{out}[m^3]\ \cdot \frac{40\%}{100\%} \tag{1-6}$$

$$\frac{h_s[m]}{V_s\left[\frac{m}{s}\right]} = t_s[s] \tag{1-7}$$

$$\frac{t_d[s]}{t_s[s]} = Q_s[-] \tag{1-8}$$

Considerando los siguientes datos:

- $Relave_{in}[m^3] = 60.500[m^3]$.
- $h_s[m] = 10[m]$.
- $V_s\left[\frac{m}{s}\right] = 0.0046\ [\frac{m}{s}]$.
- $t_d[s]$=86.400.
- Relave entrante compuesto por 75% de agua y 25% de sólidos.
- Relave obtenido a la salida se compone por un 40% de agua y un 60% de sólido.

$$\frac{h_s[m]}{V_s\left[\frac{m}{s}\right]} = \frac{10\ [m]}{0{,}0046\left[\frac{m}{s}\right]} = t_s[s] = 2.174\ [s]$$

h_s[m]=Altura máxima de sedimentación, V_s[m/s]=Velocidad de sedimentación y $t_{s=}$=tiempo de sedimentación.

$$\frac{t_d[s]}{t_s[s]} = \frac{86.400\ [s]}{2.174[s]} = Q_s[-] = 40[-]$$

t_d= 86.400 segundos al día, Q_s[-]=cantidad de veces que se puede realizar el proceso en un día en condiciones óptimas.

$$Agua\ (In) = Relave_{in}[m^3]\ \cdot\ 0.75 = 45.375\ [m^3]$$

$$Sólido\ (In) = Relave_{in}[m^3]\ \cdot\ 0.25 = 15.125\ [m^3]$$

$$Relave_{out} = \ Sólido\ (In)\ \cdot \frac{100\%}{60\%} = 25.208{,}3\ [m^3]$$

$$Agua\ (Out) = Relave_{out}[m^3]\ \cdot \frac{40\%}{100\%} = \ 10.083{,}32[m^3]$$

$$A_r = Agua\ (In) - Agua(Out) = \ 45.375 - 10.083{,}32\ = \ 35.291{,}68[m^3]$$

Agua recuperada y recirculada al día: $A_r[m^3]\ \cdot\ Q_s[-] = 1.411.667{,}2[m^3]$

Finalmente, en la Tabla 1-2 se logra observar un resumen de los datos más importantes obtenidos luego de realizar el ejemplo comparativo, tales como la cantidad de veces que se puede completar el proceso de sedimentación, el costo de floculante y la cantidad de agua recuperada para cada uno de los 4 casos analizados. Además, ya que de estos lo más importante es conocer la cantidad de agua recuperada, en la Figura 1-8 se observan gráficamente las grandes diferencias porcentuales del recurso hídrico que nos permite recuperar el usar una determinada dosificación de químicos floculantes. Los resultados indican que, respecto al caso óptimo o caso A, se presenta un déficit en la cantidad de agua recuperada en cada caso equivalente a:

Caso B: Déficit de 3.314.099[m^3], significando solo un 29.75% del total recuperado en el óptimo.

Caso C: Déficit de 2.961.536[m^3], significando solo un 37.3% del total recuperado en el óptimo.

Caso D: Déficit de 3.384.612[m^3], significando solo un 28.3% del total recuperado en el óptimo.

Tabla 1-2 Resumen Ejemplo.

CASO	VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN [m/s]	CANTIDAD DE FLOCULANTE [g]	N° VECES POR DÍA [-]	TOTAL AL DÍA	AGUA RECUPERADA POR DÍA [m^3]
A 8.0[g/t]	0.0154	484.000	130	$62.920.000	4.587.918
B 6.0[g/t]	0.0046	363.000	40	$14.520.000	1.411.667
C 6.5[g/t]	0.0058	393.250	50	$19.662.500	1.764.584
D 10.0[g/t]	0.0044	605.000	38	$22.990.000	1.341.083

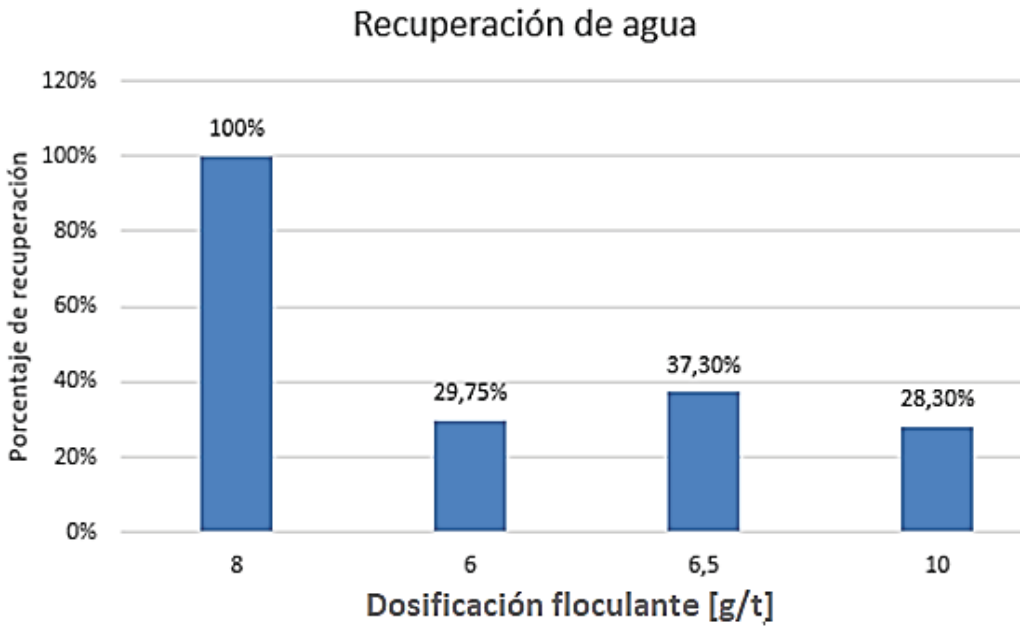


Figura 1-8 Porcentaje de agua recuperada.

1.3 Solución

Para lograr obtener un valor de dosificación optima de floculante, que acelere el proceso de sedimentación y consiguiente aumente la recuperación de agua, es necesario eliminar el error humano debido a la realización de pruebas de velocidad de sedimentación manuales, por lo que se debe actualizar y mejorar el proyecto de Camilo González [2]. Esto consiste en crear un sistema de auto-agitación controlado por computadora para dispositivo medidor de sedimentación. Es decir, lograr automatizar por completo la lectura de la velocidad de sedimentación del relave, para esto se tendrá que elaborar una estructura que soporte 4 tubos de ensayo de 1 [L] de capacidad

cada uno, además se deberá controlar el movimiento de estos tubos mediante el uso de un motor, el cual será accionado mediante computadora. Junto a esto, se contará con una cámara que otorgará la información de la posición/altura de la suspensión concentrada a un programa desarrollado con LabVIEW.

La Figura 1-9 muestra un esquema que representa la solución a diseñar, donde se destaca principalmente la actualización de la estructura anteriormente diseñada, buscando la auto agitación del sistema.

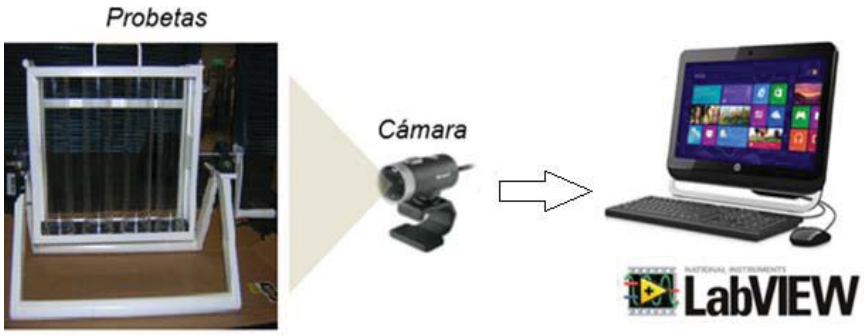


Figura 1-9 Esquema de solución.

1.3.1 Estado del arte

La sedimentación se utiliza no solamente en la minería, ya que su uso principalmente es en el ámbito de la potabilización del agua. Es por ello que el avance y la mejora continua, en la tecnología utilizada en los procesos, resulta algo esencial tanto para optimizar procesos mineros como en la obtención de agua de mejor calidad para el consumo humano. Es así como, esta búsqueda de optimización del proceso de sedimentación, ha conseguido la creación de sistemas similares al que se desarrollará.

A continuación, se presentan los sistemas utilizados para controlar el proceso de sedimentación.



Figura 1-10 Control automático de sedimentación Conves.

En la Figura 1-10 se presenta un sistema para el control de sedimentación denominado Conves, el cual tiene por fin específico el control automático de la velocidad de sedimentación. El funcionamiento se basa en la medición periódica de la velocidad de sedimentación mediante un ensayo realizado en probeta, igual al realizado en los laboratorios, en forma On-Line dentro del sistema, comparando el valor obtenido con un valor de Set-Point que es previamente fijado. Si la velocidad obtenida es mayor o menor que el Set-Point, se disminuye o aumenta la dosificación de la solución floculante, manteniendo así la velocidad de sedimentación dentro de los parámetros considerados como óptimos [8].



Figura 1-11 Ensayo de jarras.

En la Figura 1-11 se observa el método más común utilizado para estudiar la velocidad de sedimentación, y con ello obtener la dosificación optima de floculante. Consiste en colocar una misma muestra de la pulpa en cada jarra, pero variando la cantidad de floculante, de esta manera el laboratorista observa las distintas velocidades a las que sedimentan, y con ello define cual es la dosificación optima de floculante a utilizar.

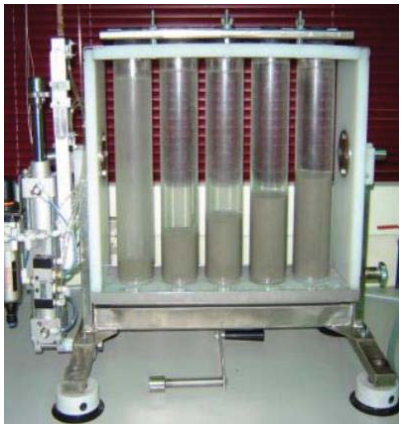


Figura 1-12 Sedirack.

Uno de los sistemas que más se acerca en funcionamiento y diseño es el que se observa en la Figura 1-12, el cual fue desarrollado por la Universidad de Concepción. Este registra la altura de la interface solido-líquido en función del tiempo, logrando así generar una curva de decantación y finalmente la velocidad de sedimentación. Posee una manivela para el control manual de la rotación de la estructura, además, presenta luces traseras para mejorar la precisión en la toma de las alturas de la medición.



Figura 1-13 Sistema de medición automático de velocidad de sedimentación.

El proyecto de título de Camilo González se observa en la Figura 1-13, es la versión que se tuvo que mejorar. Para ello se buscó cambiar la estructura añadiendo un motor que permite controlar la inclinación de los tubos, mejorar el programa en LabVIEW eliminando por completo el uso de la tarjeta de adquisición de datos MyRio, además de mejorar la interfaz de usuario.

1.3.2 Propuesta a desarrollar

El proyecto busca mejorar el anterior prototipo, realizado por Camilo González, a modo de obtener un sistema completamente automático. Para esto, lo primordial es modificar la estructura inicial, ya que el material no es el indicado y no permite el control de la agitación de los tubos. Además, es fundamental también la incorporación de un motor, el cual será controlado por computadora mediante un interfaz de usuario creado a partir del programa de National Instruments LabVIEW. En la Figura 1-14 se observa un esquema con los cambios propuestos.

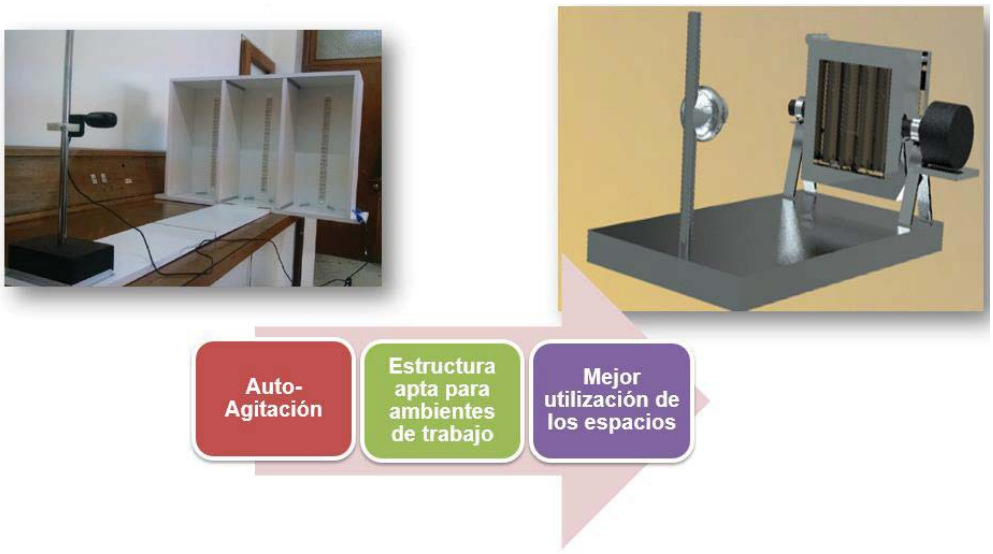


Figura 1-14 Propuesta a desarrollar.

1.4 Objetivos

Con la finalidad de tener una visión clara del proyecto a presentar, conocer su propósito, organizar las distintas tareas a seguir y también para poder concluir realmente el nivel de avances obtenidos, se estipulan a continuación el objetivo general y los objetivos específicos que se deben abordar.

Objetivo general: El objetivo esencial del proyecto es la implementación de un sistema de auto-agitación controlado por computador para dispositivo medidor de sedimentación.

Objetivos específicos:

1. Diseñar la estructura del sistema de auto-agitación, considerando el sistema mecánico de agitación, accionamiento, hardware de adquisición de datos y software de control.
2. Implementación del dispositivo de auto-agitación en base al diseño definido y especificado en el objetivo específico 1.
3. Realizar pruebas de funcionamiento y análisis de resultados del prototipo.

2 Diseño de la solución

Una vez que ya se conoce el problema y la solución propuesta, el siguiente paso es comenzar a diseñar el prototipo que permita poder cumplir con los objetivos planteados. Esto es, y tal y como se mencionó anteriormente, mejorar el proyecto realizado por Camilo González, a modo de obtener un sistema completamente automático.

2.1 Diseño estructura mecánica

Se busca lograr controlar automáticamente la agitación de las probetas para las pruebas de sedimentación. Esto será posible con el diseño de una estructura, que primero sea fabricada con un material adecuado que soporte corrosión debida a los químicos y minerales, y al constante movimiento oscilatorio provocado por la agitación, un ejemplo puede ser algún tipo de metal.

Para lograr tener una mejor idea, y así también poder visualizar de mejor manera la solución propuesta, se diseña la estructura que se busca conseguir para el funcionamiento del proyecto. Para esto, se utilizará el software Rhinoceros en su versión 6.0, ya que nos permite no solo modelar, si no también presenta la opción de renderizar nuestro diseño con una amplia librería de materiales.

En las Figura 2-1, Figura 2-2 y Figura 2-3 se pueden observar 3 distintas vistas de la estructura modelada en Rhinoceros . Importante es notar que, en comparación con la versión anterior de Camilo González, esta estructura cuenta con 4 probetas situadas una al lado de la otra, permitiendo realizar 1 ensayo de sedimentación adicional. También se implementa inicialmente el acople de manera directa de un motor, el cual permitirá realizar la agitación de las probetas mediante un programa desarrollado en LabVIEW-Arduino. Finalmente se añade un panel led en la parte trasera, el cual permitirá otorgar luz de manera uniforme facilitando a la cámara la obtención de las imágenes, para el subsiguiente tratamiento de estas.

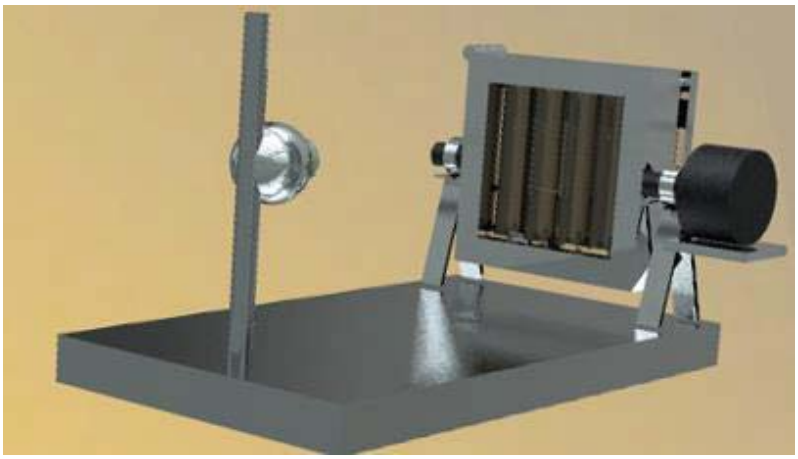


Figura 2-1 Vista perspectiva diseño 3D.

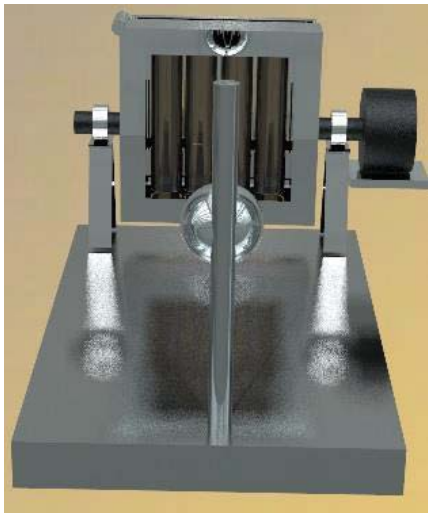


Figura 2-2 Vista frontal diseño 3D.

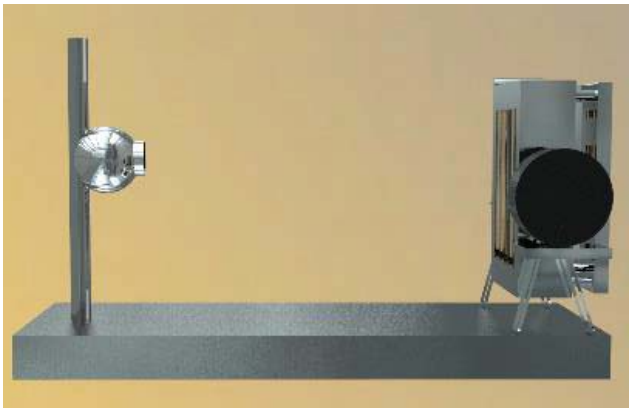


Figura 2-3 Vista lateral diseño 3D.

Este proyecto fue postulado al Proyecto DIE PUCV 2018, en donde luego de obtener fondos, se optó por la compra de una estructura, comercializada por la empresa Serquimet, que se aproxima bastante a los requerimientos mostrados en los diseños creados y modelados en Rhinoceros, ver Figura 2-4. Esta estructura fue entregada a fines de Julio donde, debido a algunos inconvenientes técnicos en la soldadora utilizada para su construcción, se presentó un retraso en la fecha de entrega prevista inicialmente.

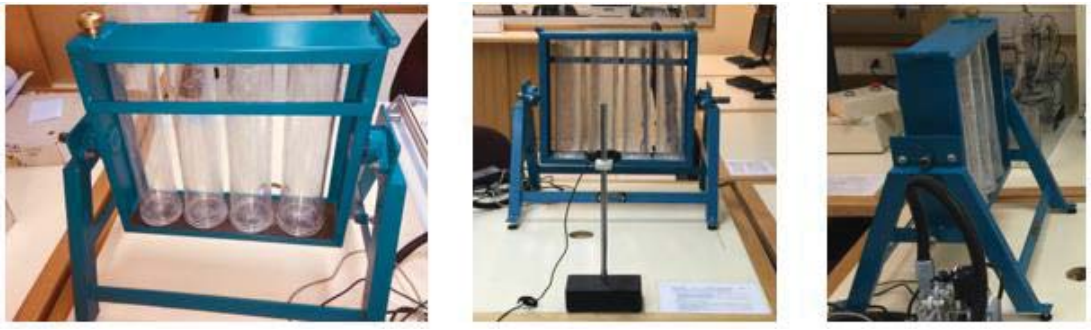


Figura 2-4 Estructura adquirida.

En la Tabla 2-1 se presenta el detalle de las dimensiones de la estructura adquirida, destacando los valores de las probetas, soporte y la estructura móvil en donde se sitúan las probetas que deben ser agitadas.

Tabla 2-1 Resumen dimensiones de la estructura.

Estructura	Dimensiones
Estructura móvil.	42,5 × 38 × 11 [cm]
Altura de las probetas.	36 [cm]
Diámetro interno de las probetas.	6,7[cm]
Soporte.	56 × 51 × 3 [cm]

2.2 Diseño sistema de accionamiento

Uno de los puntos más importantes es lograr que la estructura posea auto-agitación, para esto será necesaria la implementación de un sistema controlado por un motor eléctrico, el cual mediante un programa regule y controle el movimiento de los tubos.

Los tubos (probetas) deben ser agitados, antes de iniciar el ensayo de sedimentación, para lograr que la mezcla, del líquido y el sólido, quede lo más homogéneo posible. Además, el sólido se deposita en la parte inferior, muchas veces adhiriéndose al fondo, lo que supone un error en el ensayo y en sus resultados. Importante es considerar que los tubos deben quedar en posición vertical luego de ser agitados.

Para lograr determinar que motor, o motores, pueden ser utilizados necesitamos primero definir algunos parámetros y relaciones, tales como el peso de la carga, el radio de trabajo o el torque necesario.

2.2.1 Dimensionamiento

Se debe realizar un dimensionamiento del motor, por lo tanto, es preciso conocer los requerimientos de fuerza, torque o potencia demandados por la estructura. Luego se sobredimensionan los cálculos obtenidos, buscando así evitar que el motor trabaje en condiciones extremas y, además poder tener un rango de trabajo por si se produce algún peak de potencia no deseado e imprevisto. Inicialmente se consideró realizar solo los cálculos enfocados en el torque necesario, sin embargo, se efectuaron consultas con los profesores de la escuela Jorge Medina, René Sanhueza y Javier Riedeman, los cuales dieron algunos consejos para poder enfrentar de mejor manera la implementación del motor. Especialmente el profesor Javier Riedeman recomendó no enfocarse en el torque, sino más bien en la potencia, para lo cual en conjunto se hicieron los cálculos necesarios para el dimensionamiento del motor.

A continuación, se muestran los cálculos pertinentes, tanto para un enfoque en el torque como en potencia.

Enfoque en el torque: La medida cuantitativa de la tendencia de una fuerza para causar o alterar la rotación de un cuerpo se denomina Torque [9].

El torque, o momento de torsión, se define como la capacidad de una fuerza para hacer girar un objeto en torno a su eje. Para visualizarlo de una mejor forma, la Figura 2-5 muestra el giro que se provoca en el punto A cuando se ejerce una fuerza , de magnitud F, en el punto B de la barra. Para el cálculo se utiliza la ecuación (2-1), donde T es el torque o momento de torsión, F es la fuerza aplicada, D es la distancia al eje de giro y ɵ es ángulo de aplicación de la fuerza.

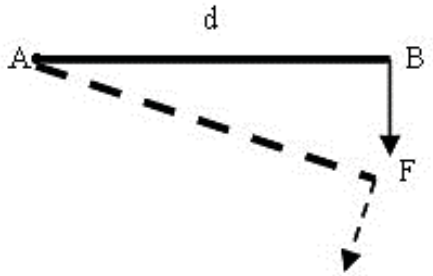


Figura 2-5 Torque.

La magnitud y dirección de la fuerza son importantes, pero también lo es la posición del punto de aplicación. En la Figura 2-6, se está usando una llave inglesa para aflojar un tornillo apretado. La fuerza F_b, aplicada cerca del extremo del mango, es más eficaz que una fuerza igual F_a aplicada cerca del tornillo. La fuerza F_c no sirve de nada, ya que se aplica en el mismo punto y tiene la misma magnitud que F_b pero está dirigida a lo largo del mango [9].

Entonces se tiene que:

- Si ɵ=90° el torque será máximo.
- Si ɵ=0° el torque será mínimo.

En el sedimentador automático se considera ɵ=90°, ya que la fuerza del motor será siempre perpendicular.

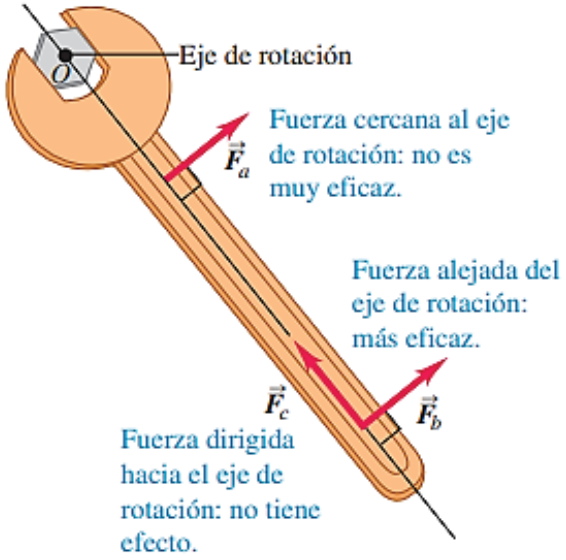


Figura 2-6 Puntos de aplicación de fuerza.

Para el cálculo del peor caso posible, es decir que todo el peso se concentre en un extremo, se consideran los siguientes datos:

- Peso de estructura móvil= 15 [kg].
- Alto de estructura móvil =50 [cm].
- Distancia al eje de giro=25 [cm].

Entonces el torque necesario es:

$$T\,[N \cdot m] = F[N] \cdot D[m] \cdot sen(\theta) \tag{2-1}$$

$$T\,[N \cdot m] = 15[kg] \cdot 9{,}8[\frac{m}{s^2}] \cdot 0{,}25[m] \cdot sen(\frac{\pi}{2})$$

$$T\,[N \cdot m] = 147[N] \cdot 0{,}25[m] \cdot 1 = 36.75\,[N \cdot m]$$

$$T\,[N \cdot m] = 36.75\,[N \cdot m]$$

Enfoque en la potencia: Cuando pedaleamos una bicicleta, aplicamos fuerzas a un cuerpo en rotación y efectuamos trabajo sobre él. Algo similar ocurre en otras situaciones de la vida real, como el eje de un motor que gira, e impulsa una herramienta de potencia o un vehículo. Podemos expresar el trabajo en términos del Torque y el desplazamiento angular, ver ecuación (2-2) [9].

$$P[w] = T[N \cdot m] \cdot \omega[\frac{rad}{s}] \tag{2-2}$$

Además, se puede reemplazar el torque en función de la inercia y la aceleración angular, quedando una nueva expresión que se puede observar en la ecuación (2-3).

$$P[w] = J[Kg \cdot m^2] \cdot \alpha\left[\frac{rad}{s^2}\right] \cdot \omega[\frac{rad}{s}] \tag{2-3}$$

Por otro lado, la inercia es la tendencia de un cuerpo a seguir moviéndose una vez iniciado su movimiento, o la tendencia de un cuerpo en reposo a permanecer en reposo [9]. Se expresa según la ecuación (2-4), sin embargo se puede reemplazar el diferencial para obtener una expresión como en la ecuación (2-5), donde ρ representa la densidad, h la altura de la estructura y r es la distancia al eje de giro.

$$J[Kg \cdot m^2] = \int_0^M r^2 \cdot dM \tag{2-4}$$

Para poder realizar estos cálculos se realizan algunas consideraciones, como el tomar la forma de la estructura como un cilindro, esto debido a la imposibilidad de realizar los cálculos exactos para la estructura, o el definir el promedio de la densidad, de los elementos al interior de la estructura, como 1000 [kg/m^3] ya que mayormente los elementos poseen una densidad promedio similar a la del aire. Además, se trabajó pensando en 12 revoluciones por minuto, y los mismos datos de peso y altura utilizados en el cálculo enfocado en el torque.

$$P[w] = 2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot h \int_0^R r^3 dr \cdot \alpha\left[\frac{rad}{s^2}\right] \cdot \omega[rpm \tag{2-5}$$

$$P[w] = 2 \cdot \pi \cdot 1000\left[\frac{kg}{m^3}\right] \cdot 0{,}5[m] \cdot \frac{0{,}25[m]^4}{4} \cdot \frac{12\pi[\frac{rad}{s^2}]}{30} \cdot \frac{12\pi[\frac{rad}{s}]}{30}$$

$$P[w] = \pi \cdot 1000\left[\frac{kg}{m^2}\right] \cdot \frac{0{,}0039[m^4]}{4} \cdot 1.5791367[\frac{1}{s^3}]$$

$$P[w] = 3{,}07[kg \cdot m^2] \cdot 1.5791367[\frac{1}{s^3}]$$

$$P[w] = 4{,}84[w]$$

2.2.2 Elección del motor

Motor DC: Estos son los motores más comunes, se caracterizan por poseer un valor alto de revoluciones por minuto (RPM) y un bajo torque. Si se necesita tener un mayor torque, está la posibilidad de utilizar una caja reductora, la cual se encarga, mediante engranajes, de disminuir los RPM para aumentar el torque. Estos motores además son baratos y su driver de control es un puente H relativamente sencillo, pero posee el inconveniente de ser impreciso ya que no presenta ningún tipo de feedback. Ver Figura 2-7.



Figura 2-7 Motor DC con reductora.

Servomotor: Un servomotor es un tipo especial de motor que permite controlar la posición del eje en un momento dado. Está diseñado para moverse una cierta cantidad de grados y mantenerse fijo en esa posición. Posee la característica de control de posición, sin embargo, no es más que un motor DC al cual se le acopla una caja de engranes para aumentar el torque y permitir mantener la posición fija. Poseen una alta precisión, un torque superior al de un motor DC, pero aún bajo como para soportar 15 [kg]. Ver Figura 2-8.



Figura 2-8 Servomotor.

Motor paso a paso: Es un dispositivo electromecánico que convierte una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos, lo que significa que es capaz de girar una cantidad de grados dependiendo de sus entradas de control. Disponen de bobinas que, activándolas, permiten que el motor vaya dando pasos de pequeños ángulos, lo que proporciona un control de posición. Presenta la ventaja de tener precisión y repetividad en cuanto al posicionamiento, ver Figura 2-9. Es el más indicado ya que se necesita precisión en las secuencias de movimientos a realizar, debido a que las probetas deben quedar en una posición vertical para no entorpecer la toma de fotografías por parte de la cámara.



Figura 2-9 Motor paso a paso.

Considerando los resultados obtenidos en los cálculos de torque y potencia, se adquiere un motor paso a paso NEMA 17 con caja reductora 5:1 de tipo planetaria, el cual presenta un torque recomendado de 41 [kg-cm]. En la Tabla 2-2 se profundiza en sus características más importantes.

Tabla 2-2 Características motor paso a paso Bipolar Nema 17.

Característica	Valor
Relación de engranajes.	5+2/11[-]
Corriente nominal por fase.	1.68 [A]
Voltaje de trabajo.	12-24 [V]
Potencia.	20-40 [w]
Par motor.	41 [Kg-cm]
Torque	50-100 [N]

2.2.3 Acople del motor

Ahora que ya se hicieron los cálculos de torque y potencia, y además se definió el motor, el siguiente paso es determinar la manera en la que se realizará la transmisión de potencia desde el motor hacia la estructura, para que de este modo se produzca la agitación.

Un sistema de transmisión de potencia es un mecanismo en el cual una fuente motriz generadora transmite potencia hacia un dispositivo o máquina. Un ejemplo de esto es la transmisión a través de la rotación de un eje motriz a un eje conducido, aumentando o disminuyendo su velocidad. Los mecanismos de transmisión de potencia son muy utilizados en la industria para la transmisión de energía mecánica entre un elemento, al que se le denomina motriz, hacia un elemento conducido que, a su vez, acciona un dispositivo. El elemento motriz es un mecanismo que puede ser activado mediante energía eléctrica, hidráulica, mecánica, etc. [10].

Tipos de sistemas de transmisión de potencia:

Acople directo: Consiste en la unión de dos ejes ubicados a una corta distancia, para lo cual se utiliza un elemento llamado Acople o Cople, con el que se logra transmitir la potencia. Es un sistema de transmisión que busca asegurar el movimiento y absorber en lo posible la mayor cantidad de vibración entre la unión de ambos ejes. Es de los métodos más complicados de implementar, ya que es necesaria una alineación de ejes precisa, de lo contrario se produce perdida de potencia por fricción, altas vibraciones y ruido, altas tensiones en el acoplamiento que producen sobrecalentamiento y rotura, bajo tiempo de vida y poca eficiencia. Además, la relación entre el diámetro de ambos ejes debe ser lo más cercana a la unidad, de lo contrario se vuelve un método inviable, ver Figura 2-10.

A pesar de ser el método que se pensó usar en un comienzo, tal y como se observa en la Figura 2-1, se descarta totalmente, ya que la diferencia entre los diámetros del motor y el sedimentador es muy grande. Además, el torno del taller electromecánico no se encuentra en óptimas condiciones, por lo que se provocarían desalineamientos.

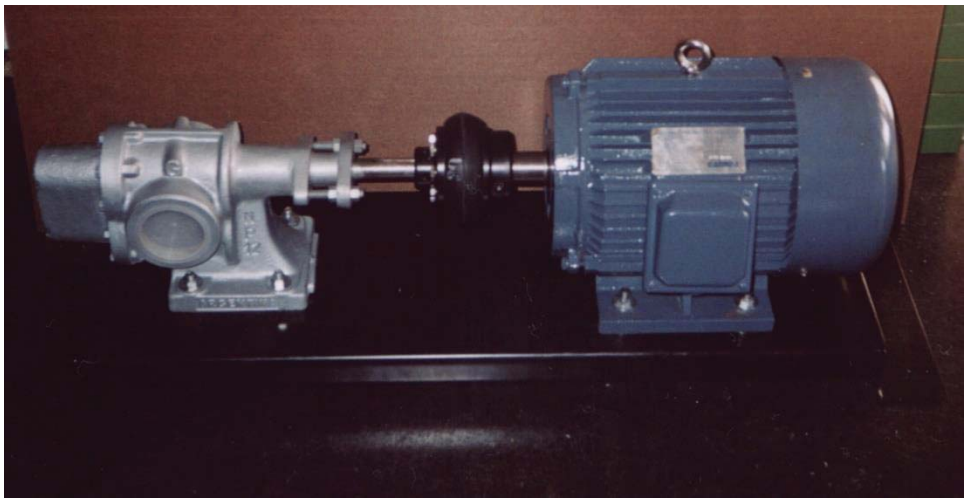


Figura 2-10 Motor acoplado de manera directa.

Bandas, correas y poleas: Está conformado por dos poleas ensambladas, se utiliza generalmente entre ejes paralelos que se encuentren separados por una distancia significativa. Su composición contiene mínimo 2 poleas, una conductora y una conducida, las cuales se encuentran unidas mediante una banda o correa. Es de los métodos más baratos al presentar un bajo costo de instalación, además posee menor complejidad tanto a la hora de implementar como al realizar su mantenimiento. El movimiento se transmite mediante una correa, que impulsa a las poleas y logran transmitir una fuerza tangencial y velocidad gracias al roce y tensión. El problema principal es que la eficiencia de la transmisión de potencia depende de la fricción entre la superficie de la correa y la polea, lo cual lo convierte en uno de los métodos con menor eficiencia, al existir perdidas de potencia significativas por producirse deslizamientos entre estos dos elementos. Otra de las desventajas que presenta es la pequeña duración de las correas, lo que lleva a realizar mantenimiento y cambio de estas de manera constante [10].

Los parámetros que se deben considerar en este sistema de transmisión se observan en la Figura 2-11, donde d_1 y n_1 son el diámetro y velocidad de la polea menor respectivamente , mientras que d_2 y n_2 corresponden al diámetro y velocidad de la polea mayor. En este sentido nos encontramos con una relación de trasmisión, la cual, según estos parámetros antes mencionados, permitirá aumentar o disminuir la velocidad, con un efecto inverso en el torque. Es decir, velocidad y torque son inversamente proporcionales.

Relación de transmisión:

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{t_1}{t_2} \tag{2-6}$$

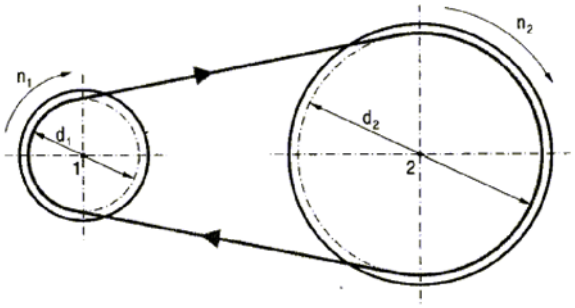


Figura 2-11 Transmisión de potencia polea-correa.

Un ejemplo para este sistema se ve en la Figura 2-12 , donde existe además una caja de velocidades y torque , es decir , según el juego de poleas se modificarán estos parámetros dependiendo del diámetro de cada par de poleas. El motor origina el movimiento que hace girar al eje conductor, el cual mediante la correa transmite la potencia hacia el eje conducido que finalmente hará mover el dispositivo.

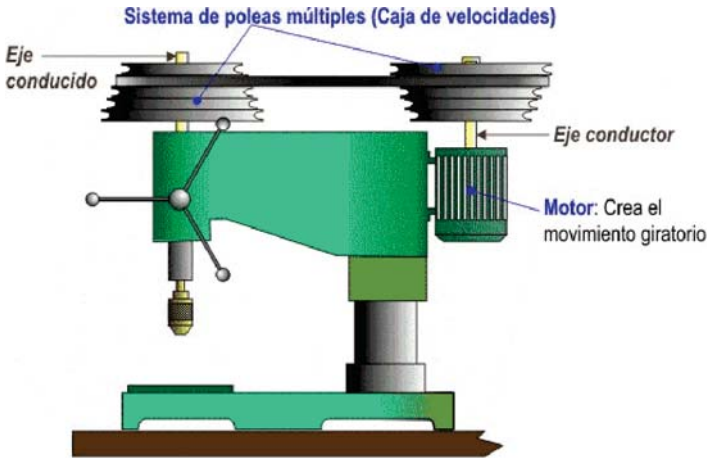


Figura 2-12 ejemplo sistema correa-polea.

Se pensó en primera instancia utilizar este método, sin embargo, debido al deslizamiento se perdería potencia y con ello pasos del motor, además se tendría que estar realizando mantenimiento constantemente, por lo que finalmente se descartó, sin embargo, puede considerarse su uso para futuras versiones si se utiliza otro tipo de motor.

Engranajes: Este es un sistema de transmisión conformado por ruedas dentadas que van montadas sobre sus respectivos ejes, y que se engranan entre sí para producir el movimiento entre ellas, provocando así la transmisión de potencia del eje motriz al eje conducido, ver Figura 2-13.

También posee una relación de transmisión, la cual corresponde al cociente entre la velocidad angular de salida ω_2 y la de entrada ω_1. Esta relación puede tener signo positivo, cuando los ejes giran en el mismo sentido, o signo negativo si los ejes giran en sentido contrario. Además, si la

relación de transmisión es mayor que 1, i>1, se tratará de un mecanismo multiplicador, y si es menor que 1, i<1, se tratará de un mecanismo reductor.

Relación de transmisión:

$$i = \frac{\omega_2}{\omega_1} \tag{2-7}$$



Figura 2-13 Par de engranes.

Posee varias ventajas tales como la sencillez de fabricación e implementación, gran capacidad para transmitir grandes potencias, la gran variedad de opciones constructivas y gran rendimiento. Pero en nuestro caso se presenta el gran inconveniente del espacio a ocupar, debido a que la distancia entre los ejes es considerable como para pensar en utilizar este sistema, además necesita de lubricación y mantención constante lo cual la convierte en uno de los sistemas más caros. Por estos motivos se vuelve un sistema de transmisión de potencia inviable para esta tarea específica [10].

Cadena y piñones: El sistema de transmisión por cadenas consta de piñones montados cada uno en su respectivo eje, unidos por una cadena. Generalmente es el piñón pequeño el que transmite el movimiento al más grande, ya que, al igual que en el sistema de transmisión por poleas y correa, existe una relación de transmisión donde la velocidad y el torque son inversamente proporcionales, entonces, este sistema está enfocado principalmente a sistemas donde se busque trabajar con altos torques a baja velocidad.

Relación de transmisión:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{z_1}{z_2} \tag{2-8}$$

Presenta una serie de ventajas respecto a los demás sistemas de transmisión de potencia, especialmente con el caso de polea-correa, ya que no hay deslizamiento, por lo que no se sufren pérdidas de potencia ni de pasos del motor, generando así una alta eficiencia. Además, no sufre deformaciones plásticas considerables, manteniendo de forma precisa la relación de velocidad y torque entre el eje impulsor y el impulsado.

Por otro lado, es más compacto que el sistema de polea-correa. Para una capacidad determinada, los piñones son de menor diámetro y ancho que las poleas y, por consiguiente, el sistema completo de transmisión de potencia ocupará menos espacio. También no sufre mayores alteraciones en el tiempo, no son afectados por sol, aceite o grasa, y operan a altas temperaturas. Otra gran diferencia es que la cadena, para transmitir de manera efectiva la potencia, no necesita una gran tensión como la correa, esto se puede observar en la Figura 2-14, en donde se ve claramente como un ramal, el de carga, de la cadena se encuentra tensado mientras que en el mismo instante el otro ramal se encuentra destensado [10].

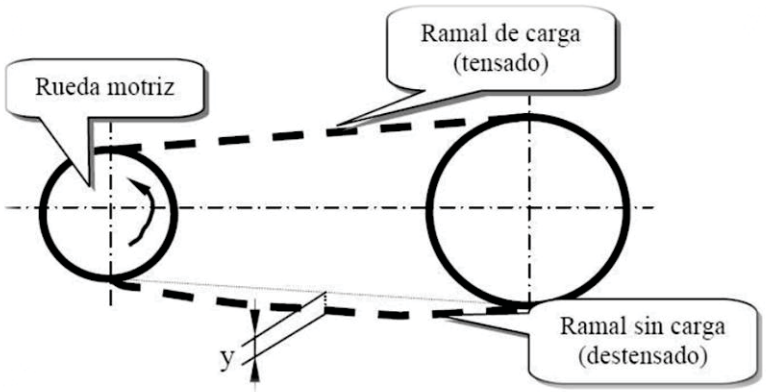


Figura 2-14 Ramal tensado y destensado.

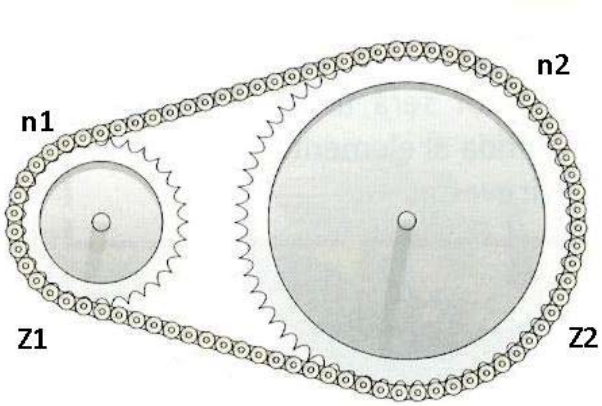


Figura 2-15 Sistema piñón-cadena.

Los parámetros que se deben considerar en este sistema de transmisión se observan en la Figura 2-15, donde z_1 y n_1 son el número de dientes y la velocidad del piñón menor respectivamente , mientras que z_2 y n_2 corresponden al número de dientes y la velocidad del piñón mayor.

Luego de investigar y comparar los distintos sistemas de transmisión de potencia, se concluyó que la mejor opción es este último, ya que está diseñado para trabajar con grandes torques y pequeñas velocidades, no presenta deslizamiento por lo que no se perderán pasos del motor, su implementación es relativamente sencilla y barata, y finalmente es más compacta.

2.3 Esquema de funcionamiento

El accionamiento estará compuesto primeramente por el motor, el cual se determinó que debe ser paso a paso ya que se necesita precisión en las secuencias de movimientos a realizar. Luego, la placa de desarrollo Arduino servirá de intermediario entre el motor y la computadora, además será en ella donde se escriba el código que permitirá que el motor arranque y realice una secuencia de movimientos predeterminada. Finalmente, en la computadora, y mediante LabVIEW, estará la interfaz que permitirá definir el tipo de secuencia y un botón de stop por si se presenta algún inconveniente, ver Figura 2-16.



Figura 2-16 Esquema de funcionamiento.

3 Selección de materiales

En los capítulos anteriores se definió el problema y la solución propuesta a este, así como también los cálculos de torque y potencia requeridos para poder agitar la estructura móvil utilizando un motor, estableciendo el uso del motor paso a paso NEMA 17. Ahora, es posible determinar los distintos elementos y materiales a utilizar para la implementación de la solución, tanto hardware como software necesario.

3.1 Driver de control

Para poder realizar un control sobre el motor es necesario utilizar un driver o controlador. Estos nos permiten manejar los altos voltajes e intensidades que requieren los motores paso a paso, limitar la corriente que circula por las bobinas, y además proporcionan protección para evitar que la electrónica pueda resultar dañada, cuidando principalmente la salud del motor. El control se realiza únicamente mediante dos salidas digitales, una que indica el sentido de giro y la otra para realizar la comunicación que establezca la cantidad de pasos que debe avanzar el motor. Existen 2 driver con gran popularidad, el A4988 y el DRV8825, en los cuales radican algunas diferencias, principalmente en la intensidad máxima con las cuales trabajan. En ambos es posible controlar, mediante un potenciómetro integrado, la corriente máxima que se entregará al motor, con el fin de evitar dañarlo. En la Tabla 3-1 se pueden observar de mejor manera estas diferencias, siendo el punto más importante la fórmula que permite determinar el voltaje de referencia que se debe establecer en el driver que, como se mencionó anteriormente, permite controlar la corriente que circulará por las bobinas del motor.

El A4988 y el DRV8825 son ampliamente empleados en proyectos que requieren uso de motores paso a paso, como maquinas CNC, plotters, robots que dibujan, impresoras 3D, y escáneres 3D, como también en robots, vehículos y estructuras que requieren precisión, mucho torque y poca velocidad. Dicho esto, y dadas las características, se comenzó trabajando con el driver A4988, ya que la corriente máxima que soporta es mayor a la corriente de trabajo del motor, sin embargo, luego de unas cuantas pruebas se decidió reemplazar por uno más potente, el DRV8825, debido que a pesar de contar con la capacidad de trabajar sin mayores problemas se necesitaba añadir no solo el disipador de calor, sino que incluso ventilación forzada por ventilador, puesto que alcanzaba altas temperaturas durante su funcionamiento ,producto de que la corriente pico de trabajo se acercaba demasiado a la intensidad de corriente máxima de funcionamiento.

Tabla 3-1 Comparación entre A4988 y DRV8825.

Modelo	A4988	DRV8825
Intensidad de corriente máxima[A]	2	2.5
Tensión máxima [V]	35	45
Micro pasos	16	32
Resistencia de sensibilidad[Ω]	0.05 , 0.1 o 0.2	0.1
Fórmula	$V_{ref}=I_{max}\cdot 8\cdot R_s$	$V_{ref}=I_{max}\cdot 5\cdot R_s$

En las Figura 3-1 y Figura 3-2 se pueden observar los esquemas para la correcta conexión de los controladores A4988 y DRV8825.

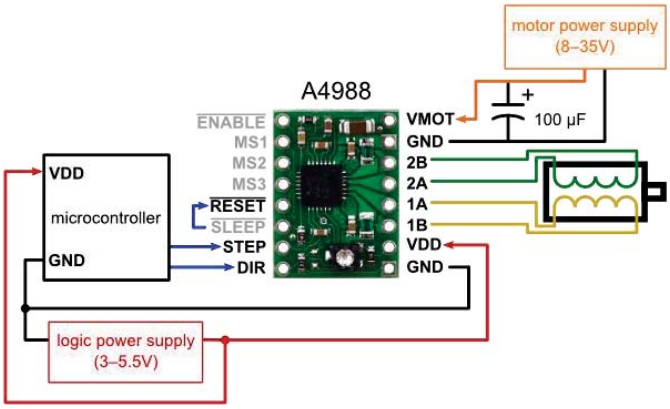


Figura 3-1 Conexión Driver a4988.

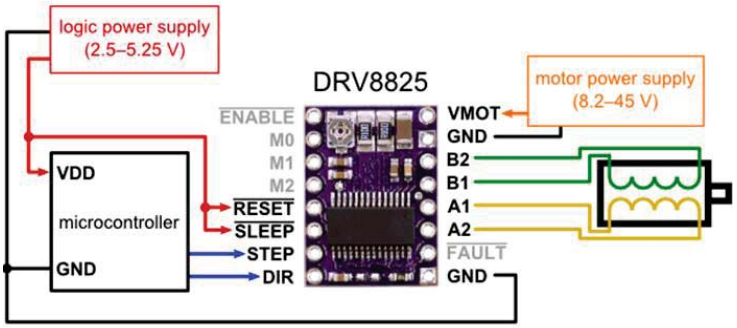


Figura 3-2 Conexión driver DRV8825.

3.2 Arduino

Arduino Uno es una tarjeta de desarrollo de código abierto, open-source, construida con un microcontrolador Atmega328 que posee pines de entradas y salidas analógicas y digitales, ver Figura 3-3. Presenta un entorno de desarrollo que utiliza un lenguaje sencillo y similar al C, llamado Processing/Wiring, y que por su condición de Open-source mantiene una gran comunidad activa, facilitando aún más su uso [11]. La utilización de la placa Arduino tendrá como objetivo la programación de las acciones que ejecutará el motor paso a paso, el cual permitirá controlar la estructura, permitiendo modificar la inclinación/posición de la misma. Sus características más importantes se encuentran en la Tabla 3-2.

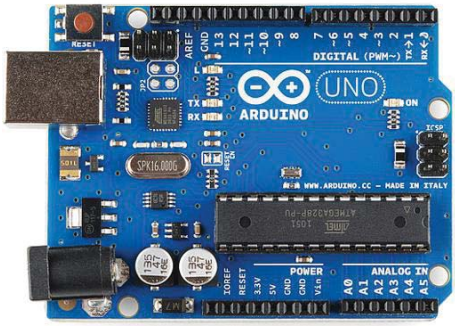


Figura 3-3 Arduino Uno.

Tabla 3-2 Características principales de la placa Arduino Uno.

Característica	Valor
Pines digitales (E/S)	14
Pines análogos (E/S)	6
Pines PWM (S)	6
Voltaje de operación	5 (V)
Voltaje de entrada	7-12 (V)
Velocidad de reloj	16 (Mhz)

3.2.1 Shield CNC

Una de las características que más destaca en la placa de desarrollo Arduino, es la capacidad de incorporar las llamadas Shield.

Las Shield son placas de circuitos modulares que se montan sobre el Arduino, de forma que nos permite dar una funcionalidad extra y amplia el hardware de Arduino. Se pueden comunicar con

Arduino ya sea por algunos de los pines digitales o analógicos o por algún bus como el SPI, I2C o puerto serie. Además, la alimentación se realiza utilizando los pines de 5v y GND propias de Arduino.

La Shield CNC es una pequeña placa que permite el control de hasta 4 motores paso a paso, facilitando la conexión entre estos últimos y Arduino. Soporta el uso de hasta 4 controladores de potencia drv8825 o A4988, esta se puede observar en la Figura 3-4.

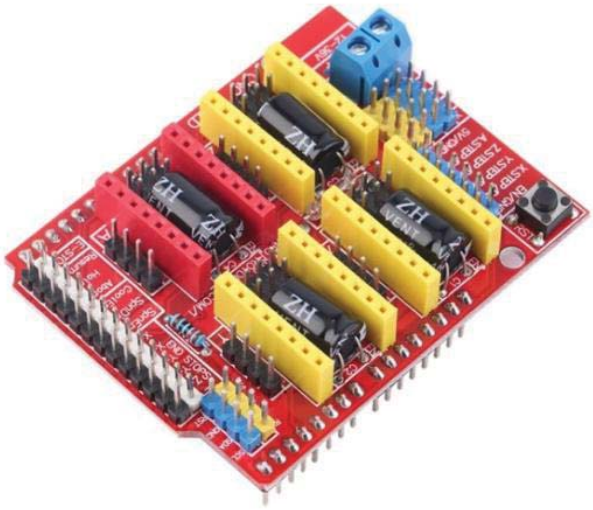


Figura 3-4 CNC Shield.

3.3 LabVIEW

LabVIEW (Laboratory Virtual Engineering Workbench) es un Software diseñado por National Instruments (NI) para aplicaciones que requieren pruebas, medidas y control con fácil acceso a información de datos. Utiliza un lenguaje de programación gráfico denominado “Lenguaje G”, el cual facilita la creación códigos de programación al utilizar esencialmente bloques. Otra gran característica, y que hace tan completo a LabVIEW, es que crea de forma paralela una interfaz gráfica de usuario (GUI) con la que podremos modificar y/o activar el programa al aplicar ciertos parámetros o condiciones [12].

Para poder comunicar Arduino con LabVIEW, por el puerto serie, será necesario instalar un complemento adicional llamado NI VISA.

NI VISA: Para poder trabajar y habilitar los puertos e interfaces de comunicación desde LabVIEW, se utiliza el complemento de NI Visa, el cual es posible descargar desde la página oficial de National Instruments. NI Visa es un estándar para configurar, programar y depurar sistemas de instrumentación que comprenden interfaces GPIB, VXI, PXI, serial (RS232/RS485), Ethernet/LXI y/o interfaces USB. NI-VISA es la implementación de National Instruments del estándar de E/S VISA. Proporciona la interfaz de programación entre el hardware y los entornos de desarrollo de aplicaciones como NI LabVIEW, LabWindows™/CVI y Measurement Studio para Microsoft Visual Studio [13].

3.4 Panel led

El funcionamiento del sistema consiste en la obtención y medición de imágenes digitales, por lo que es necesario contar con una fuente lumínica que sea lo más homogénea posible, esta es denominada Backlight, es decir, que se encuentra ubicada detrás de las probetas, ver Figura 3-5. Esto permitirá disminuir los errores producidos por elementos ajenos al proceso. También otorga la opción de eliminar dependencias con iluminación externa al sistema en sí, logrando trabajar incluso en ambientes con poca luz o sin ella.

Un panel led o Backlight se caracteriza por ser delgado, liviano y por entregar luz de manera uniforme. En el mercado existe un estándar para la venta de estos, siendo más indicado el de dimensiones 60 x 60[cm]. El esquema de iluminación es indicado en la Figura 3-6.



Figura 3-5 Imagen referencia panel led.

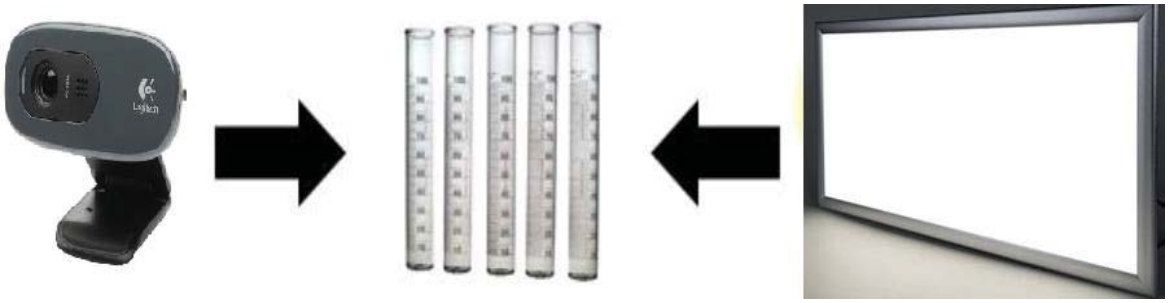


Figura 3-6 Esquema iluminación.

3.5 Cámara Logitech HD C270

Para lograr obtener las imágenes se utilizará la cámara web Logitech HD C270, la misma que se utilizó en el primer prototipo, ver Figura 3-7. Esta cámara destaca por tener un campo visual cercano a 60°, y por soportar resoluciones de hasta 1280 pixeles de ancho por 960 pixeles de alto. Cabe destacar que el pixel, o Picture Element, se define como la más pequeña de las unidades homogéneas en color que componen una imagen de tipo digital.

Para conocer la resolución de las imágenes a captar se utiliza la siguiente ecuación:

$$Resolución\left[\frac{mm}{px}\right] = \frac{Altura[mm]}{Altura[px]} \tag{3-1}$$



Figura 3-7 Cámara Logitech C270.

3.6 Fuente Switching

Para la alimentación tanto del motor como del driver DRV8825, se utiliza una fuente Switching o conmutada, como la mostrada en la Figura 3-8.

Una fuente conmutada es un dispositivo usado para entregar energía a equipos eléctricos con un rango controlado de voltajes de salida. La entrega de energía se hace a través de circuitos que emplean transistores de potencia, trabajando en conmutación a altas frecuencias.



Figura 3-8 Fuente Conmutada.

3.7 Caja

Para poder integrar de una manera óptima el Arduino, la CNC Shield y la fuente conmutada, se diseña una caja a medida. Para ello se deben considerar las dimensiones indicadas en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3 Dimensiones.

Estructura	Dimensiones
Fuente Conmutada.	11 × 8 × 3,5 [cm]
Arduino+CNC Shield.	7 × 5,2 x 3,3 [cm]
Interruptor.	2 × 1,3 x 2,7 [cm]
Caja.	16 x 15 x 5,5 [cm]

En las Figura 3-9, Figura 3-10 y Figura 3-11 se muestra el diseño final desde distintas vistas, especialmente en la última se observa que en la parte superior se añadió ventilación tanto para la fuente conmutada como para el Arduino, facilitando el flujo de aire al interior que evite sobrecalentamientos. La estructura ya impresa se puede observar en una vista frontal y superior en la Figura 3-12 y Figura 3-13.



Figura 3-9 Diseño de caja vista superior.

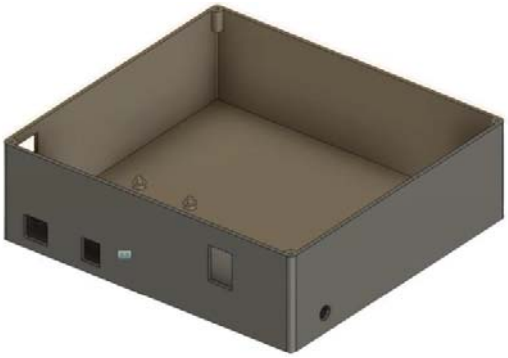


Figura 3-10 Diseño de caja vista en perspectiva.



Figura 3-11 Vista diseño final en perspectiva .



Figura 3-12 Vista frontal.



Figura 3-13 Vista superior.

4 Implementación de la solución

En este punto ya se cuenta con la solución y los elementos requeridos para su correcto funcionamiento, el siguiente paso es implementarlos. Por lo tanto, en este capítulo se describen los pasos realizados para lograr el control por computador del motor, tanto el código realizado en Arduino como en LabVIEW, y su integración al código general en LabVIEW, el ensamble de una base para el sistema completo y el acople del motor.

4.1 Control por computador

Una vez definido utilizar el motor paso a paso NEMA 17, el cual se acoplará mediante el sistema de transmisión de potencia por cadena y piñones, el siguiente paso es realizar el control por computador del mismo. Lo primero es poder realizar el código en Arduino que, mediante el driver DRV8825, ordene las acciones a ejecutar por el motor. Sin embargo, estas acciones tendrán que ser controladas desde una interfaz gráfica de usuario en el software LabVIEW, por lo tanto, tendrá que existir comunicación serial entre la placa de desarrollo Arduino y LabVIEW.

La comunicación entre LabVIEW y Arduino sigue una estructura lógica, la cual se define a continuación. Desde la interfaz gráfica de LabVIEW el usuario tiene a su disposición la opción de poder elegir una secuencia de agitación predefinida, la que al ser seleccionada envía, mediante comunicación por puerto serie, una instrucción única hacia el microcontrolador, Arduino. Es importante mencionar que una vez seleccionada una secuencia no se podrá elegir otra hasta que la anterior finalice, esto es por precaución si es que por error se elige más de una secuencia de manera seguida, además no se puede acceder a iniciar el proceso de sedimentación hasta que la estructura se encuentre detenida y en posición. Una vez que Arduino recibe la instrucción, asociada a la secuencia de agitación elegida en LabVIEW, procede a iniciar la acción vinculada con dicha instrucción. Antes de finalizar la secuencia de agitación, desde Arduino son enviados por puerto serie dos mensajes, uno es “iniciar “y el otro es “READY”. LabVIEW recibe estos mensajes y activa las opciones para poder iniciar el ensayo de sedimentación. Finalmente, para poder terminar el proceso se cuenta con un botón, el cual al ser accionado provocará que se detenga la recepción de instrucciones por parte de Arduino.

En la Figura 4-1 se observa un resumen de la estructura en la comunicación entre LabVIEW y Arduino.

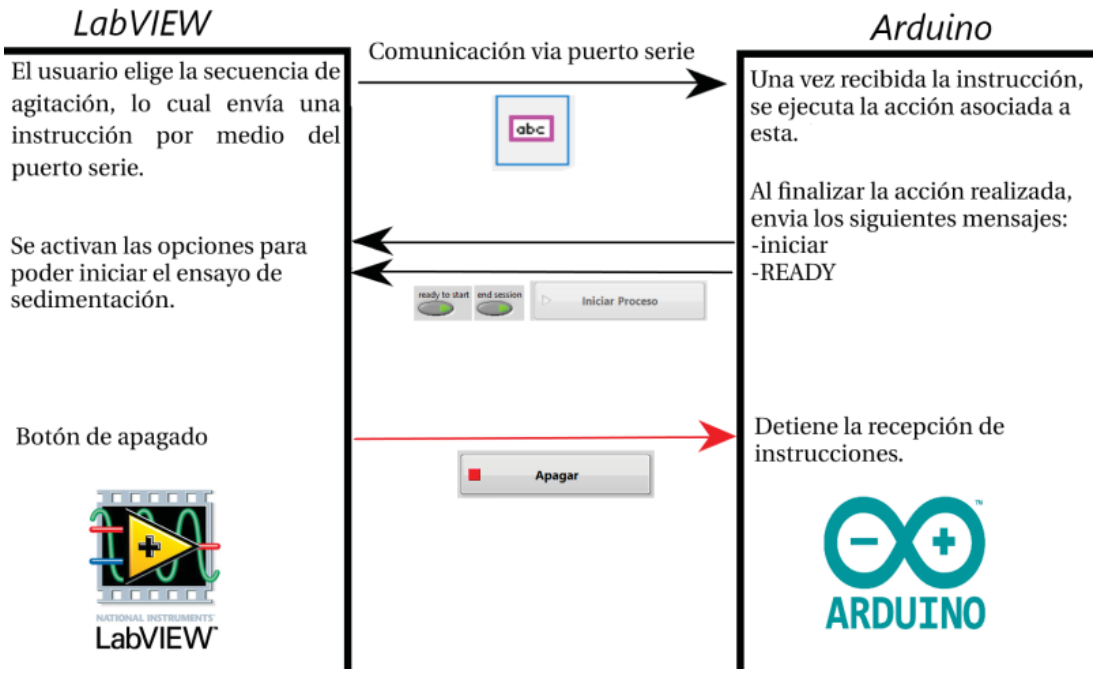


Figura 4-1 Comunicación serie LabVIEW-Arduino.

4.1.1 Programa en Arduino

Es en Arduino donde se escribe el código que permite definir la comunicación con LabVIEW y las diferentes acciones que debe ejecutar el motor. Para esto es necesario descargar el Software IDE Arduino, ver Figura 4-2, donde se utiliza un lenguaje de programación por líneas de comando muy similar al lenguaje C.

En la Figura 4-3 se expone el diagrama de flujo del código en Arduino, el cual ejemplifica el proceso del programa luego de recibir la instrucción, vía puerto serie, por parte de LabVIEW.

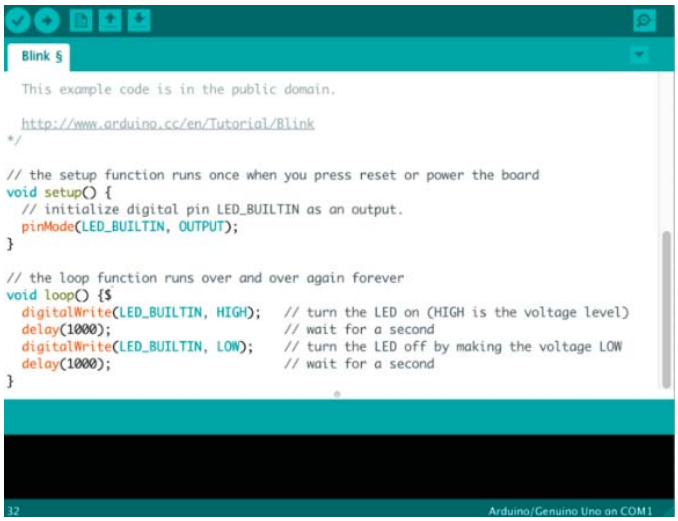


Figura 4-2 IDE Arduino.

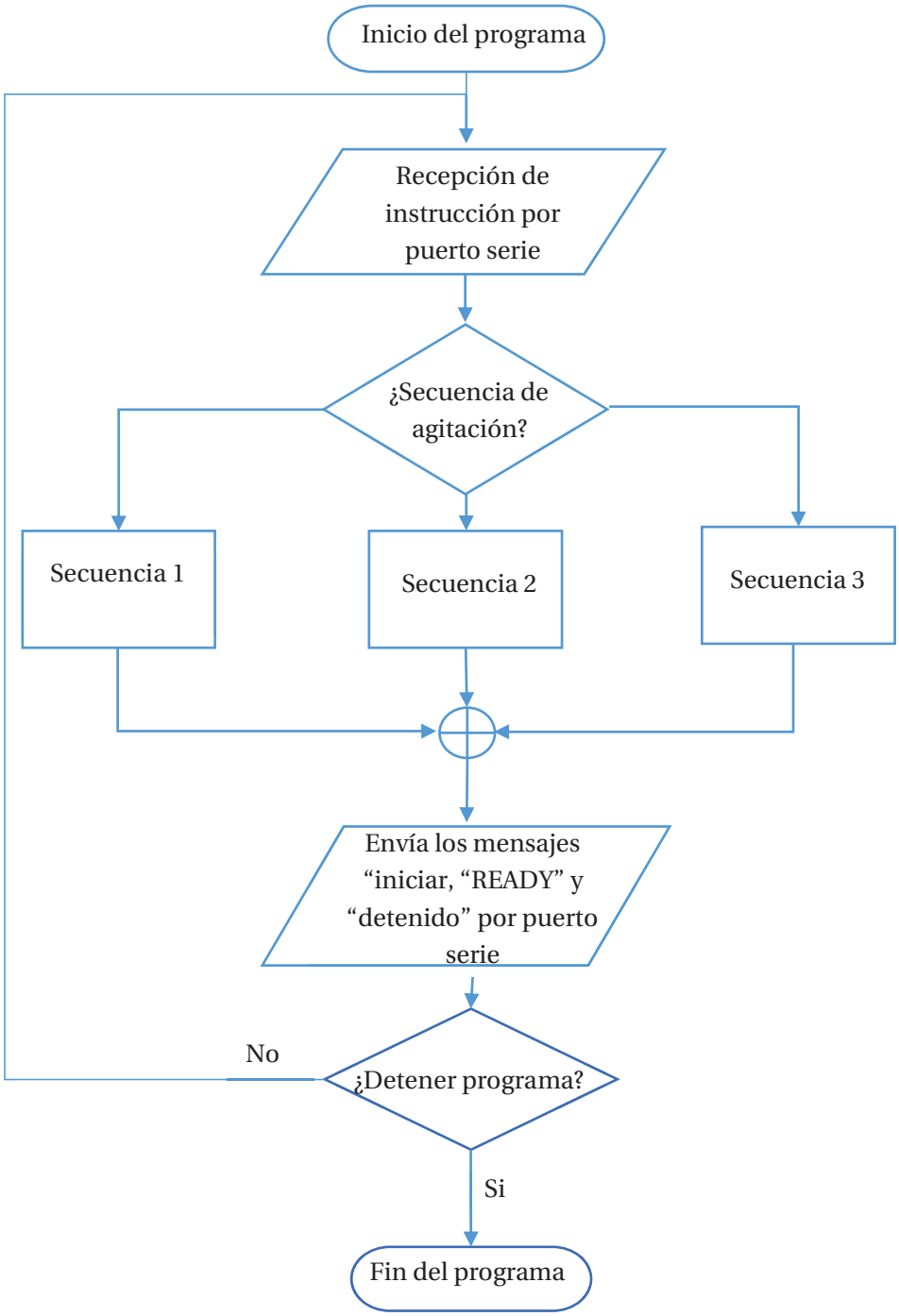


Figura 4-3 Diagrama de flujo.

Debido a que se trabaja con botones, además del envío de mensajes por puerto serie, es que no se puede utilizar o no se recomienda el uso de la función delay, ya que estos se iteran si se encuentran dentro de un Loop, provocando que el bucle principal se interrumpa y con ello se produce una mala respuesta en la ejecución del programa. Es por esto que se reemplaza su uso por una serie de variables, marcadas en rojo en Listado 4-1, las cuales modifican su valor en cada

uno de los pasos que realiza el motor. Un condicional if se encarga de mantener corriendo el programa mientras se cumpla la condición micros_ahora - last_micros>speed_delay. Sin embargo, lo realmente importante es mencionar que utilizando nuevos condicionantes if se establece el momento exacto cuando serán enviados los mensajes desde Arduino, y por el puerto serie, hacia LabVIEW. Estos deben enviarse cuando esté por finalizar la secuencia de agitación, para que así se active la opción de iniciar el ensayo de sedimentación desde la interfaz gráfica de usuario.

```
1  void girar() {
2    long micros_ahora = micros();
3    if (micros_ahora - last_micros > speed_delay) {
4      digitalWrite(pin_steps, !digitalRead(pin_steps));
5      last_micros = micros_ahora;
6      if (!digitalRead(pin_steps)) {
7        current_steep++;
8        if(current_steep==20000){
9        Serial.write("READY");
10                                }
11       if(current_steep==20200){
12       Serial.write("iniciar");
13                               }
14       if(current_steep==20400){
15       Serial.write("detenido");
16                               }
17                                   }
18                                                    }
19               }
```

Listado 4-1 Código envío de mensajes.

Otro aspecto importante es definir los pines que se utilizarán, en este caso debido al uso del driver DRV8825 y la CNC Shield. Se deben configurar como salida los pines establecidos para el control de los pasos que el motor realizará, los pines que definen la dirección y los que activan el uso de la Shield, marcadas en naranja en el Listado 4-2. Por otro lado, para poder iniciar la recepción y envío de información por puerto serie basta con escribir el comando Serial. Begin, solo teniendo cuidado de poner la misma tasa de baudios entre el receptor y el emisor.

```
1  void setup() {
2    pinMode(pin_steps, OUTPUT);
3    pinMode(pin_direccion, OUTPUT);
4    pinMode(EN, OUTPUT);
5    digitalWrite(EN, LOW);
6    Serial.begin(9600);
7              }
```

Listado 4-2 Código Void Setup.

Finalmente, el siguiente aspecto importante es conocer cómo se realiza la recepción y lectura de instrucciones por el puerto serie. Para ello en el Listado 4-3 se muestra en rojo que , en primera instancia, un if ejecuta las líneas siguientes si es que está activa la recepción de instrucciones por puerto serie. Una vez que la comunicación está activa, la variable var1, mostrada en naranja, lee y toma el valor recibido desde LabVIEW, estos pueden ser los caracteres a, b y d. Es así como, mediante el uso de una estructura de control else-if, se ejecuta la acción asociada al carácter recibido.

```
void loop()
{
  if (Serial.available())
  {
    char var1 = Serial.read();

    if (var1 == 'a' && !modo1 && !modo2 && !modo3)
    {
      modo1 = true;
      modo2 = false;
      modo3 = false;
      current_steep = 0;
      secuencia_completada = false;
    }

    else if (var1 == 'b' && !modo1 && !modo2 && !modo3)
    {
      modo1 = false;
      modo2 = true;
      modo3 = false;
      current_steep = 0;
      secuencia_completada = false;
            }
    else if (var1 == 'd' && !modo1 && !modo2 && !modo3)
      {
      modo1 = false;
      modo2 = false;
      modo3 = true;
      current_steep = 0;
      secuencia_completada = false;
    }
    else
    {
    }
  }
```

Listado 4-3 Elección de secuencia.

4.1.2 Programa en LabVIEW

Una de las características esenciales de LabVIEW es que crea, de forma paralela al programa realizado, una interfaz gráfica de usuario, desde la cual es posible accionar mediante botones y otro boléanos.

En la Figura 4-4 se observa el programa realizado en LabVIEW que permite controlar el motor mediante comunicación serial con Arduino. Este consiste en una estructura de casos que se encuentra dentro de un While Loop y que envía un carácter distinto para cada caso o secuencia elegida. Importante es mencionar que se debe instalar el complemento NI VISA, este nos permitirá tener acceso a distintos bloques para poder llevar a cabo la comunicación por el puerto serie. Los bloques a usar son los que se muestran en la Figura 4-5.

Específicamente las entradas y salidas usadas en cada bloque son:

VISA Configure Serial Port: En la entrada VISA resource name se debe crear un control desde el cual se elige el puerto al que está conectado nuestro motor. En baud rate se crea una constante cuyo valor se establece en 9600, siendo el mismo valor de baudios definidos en el código de Arduino. Finalmente Visa resource name out y error out son salidas que se deben conectar respectivamente en las entradas Visa resource name y error in del bloque Visa Write.

VISA Write: La entrada Write buffer es la encargada de recibir la información que será luego enviada por el puerto serie, para ello creamos una constante a la cual definiremos un carácter para cada secuencia. Finalmente Visa resource name out y error out son salidas que se deben conectar respectivamente en las entradas Visa resource name y error in del bloque Visa Close.

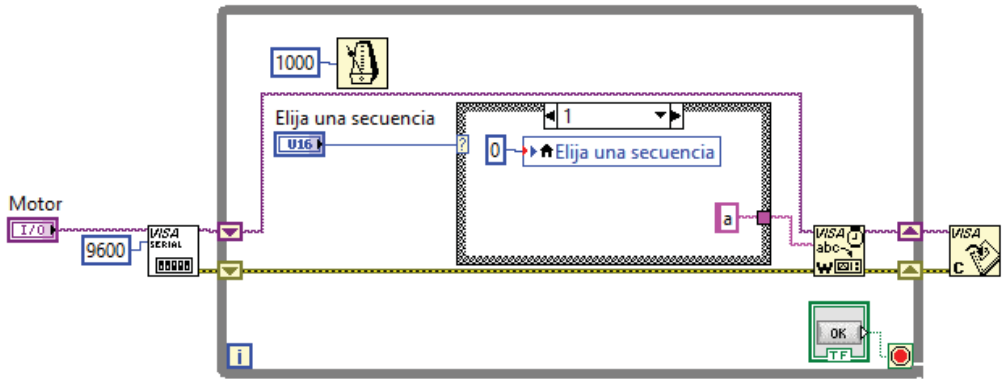


Figura 4-4 Programación comunicación en LabVIEW.

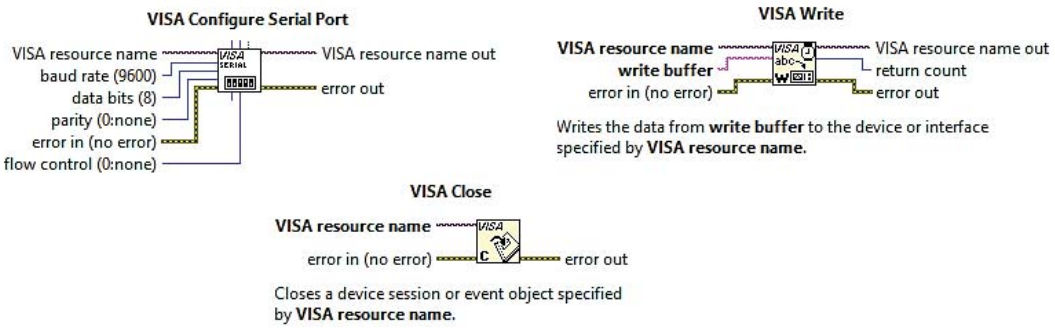


Figura 4-5 Bloques VISA.

La interfaz gráfica de usuario resultante del programa de la Figura 4-4 es la que se observa en la Figura 4-6 , esta permite al usuario accionar y controlar el proceso.

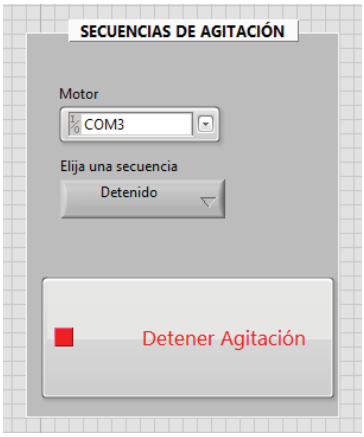


Figura 4-6 Interfaz Gráfica.

En la Figura 4-7 se observa la interfaz gráfica de usuario, una vez integrado el programa de control del motor al programa principal de Sedilab. Aquí además se enumeran los pasos y etapas a realizar, siendo los siguientes: En primera instancia se debe elegir correctamente el puerto al cual está conectado el microcontrolador (1), Arduino en nuestro caso. Luego se tiene que realizar una calibración a la zona de interés en la que nos interesa que se realicen las mediciones de velocidad de decantación (2), para esto se cuenta con 1 columna para cada probeta en donde podemos modificar el área de trabajo tanto a la izquierda, derecha, arriba y abajo. El tercer paso consiste en la elección de la secuencia de agitación (3) que deseamos utilizar. Por último, una vez que esté por finalizar la secuencia de agitación, los botones (4) pasarán a un estado alto, permitiendo al mismo tiempo que se activen los botones que permiten el inicio y detención de la prueba de sedimentación (5).

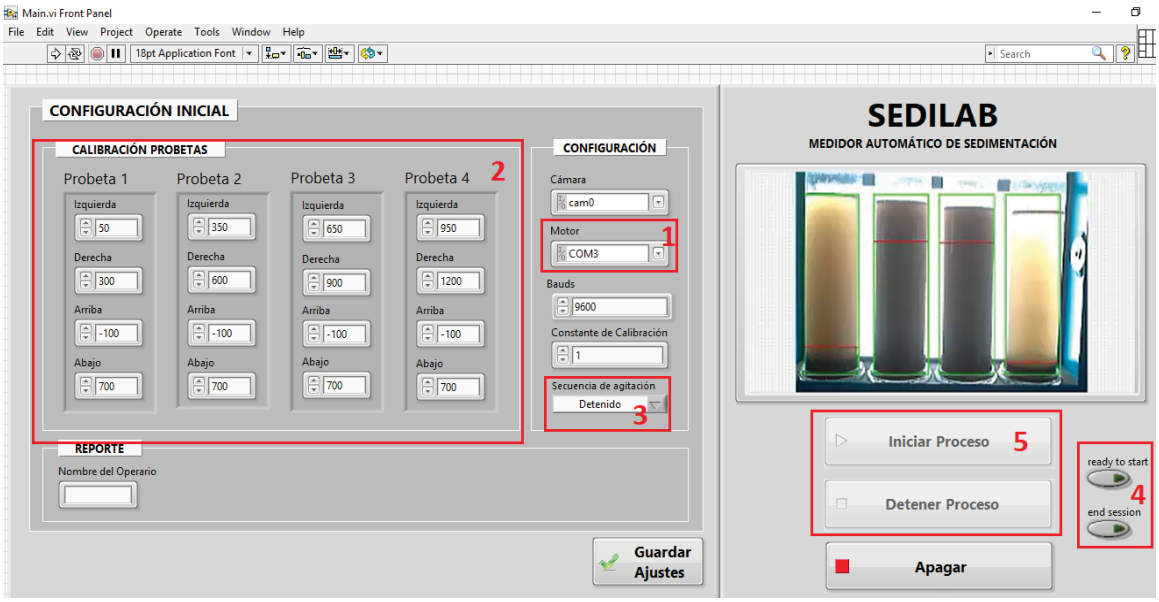


Figura 4-7 Interfaz de usuario.

4.2 Ensamble de la estructura

Se trabajó en conjunto con Renzo Gallardo del taller electromecánico, para la realización de la base y el acople del motor. En el proceso se fueron presentando una serie de problemas, los cuales dificultaron y demoraron la tarea. Entre ellos se destaca que la estructura adquirida presentaba un descuadre, ver Figura 4-8. También cabe mencionar que existe exceso de peso en uno de los extremos, lo cual provoca que exista un momento donde se exige más al motor, a lo que se suma además que las probetas son de 1.5[L] y no de 1[L] como se suponía, generando aún más desbalanceo. Una de las formas para mitigar estos efectos indeseados es disminuir la velocidad del motor y aumentar el torque, utilizando la relación de transmisión, es decir, usando dos piñones con una buena diferencia de numero de dientes, específicamente se utiliza un piñón de 11 dientes y otro de 38, lo que implica que se disminuye la velocidad 3.5 veces y se aumenta el torque en la misma proporción.

Pero, el real problema presentado fue el desalineamiento de su eje, ya que esto provocaba un sobreesfuerzo del motor evitando su buen funcionamiento y desempeño. También produce perdidas de energía e incremento en las vibraciones mecánicas.



Figura 4-8 Estructura descuadrada.

Sin embargo, a pesar de los problemas que fueron surgiendo, se logró realizar un buen acople de los piñones y con un buen funcionamiento del motor, el cual lograba agitar sin problemas la estructura.

En las Figura 4-9, Figura 4-10 y Figura 4-11 se observa el resultado de implementar tanto la base como el acople del motor utilizando la transmisión de potencia mediante piñón y cadena. Además, en la Tabla 4-1 se presenta el detalle de las dimensiones de la base diseñada para soportar el sistema en su totalidad.



Figura 4-9 Acople de motor vista lateral derecha.



Figura 4-10 Acople motor vista lateral.



Figura 4-11 Vista frontal.

Tabla 4-1 Base para estructura Sedilab.

Estructura	Dimensiones
Base Sedilab	76 × 51 x 3 [cm]

Adicionalmente fue necesario implementar un sistema de resorte que disminuya el movimiento provocado por el desalineamiento, ya que las pérdidas de potencia continuaban siendo significantes. Este nuevo sistema fue diseñado por Marco Chappa del taller electromecánico, ver Figura 4-12.

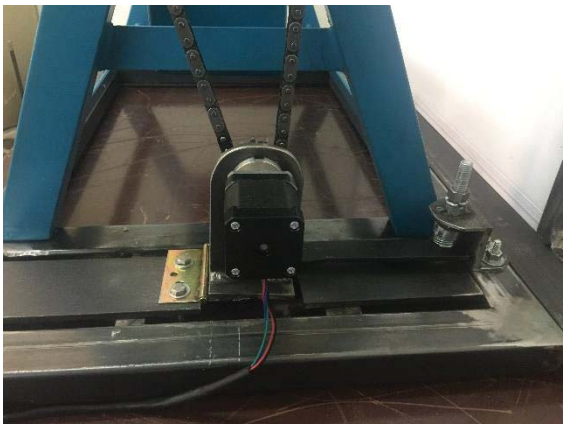


Figura 4-12 Sistema de resorte.

Para el sistema de iluminación se decidió utilizar un panel led como el de la Figura 3-5, el cual tiene unas dimensiones de 60 x 60[cm]. El resultado de incorporarlo al sistema completo se observa en las Figura 4-13 y Figura 4-14. Además, ante alguna falla o situación, que amerite un cambio del panel, presenta un desmontaje sencillo.



Figura 4-13 Estructura con panel , vista frontal.



Figura 4-14 Estructura con panel, vista posterior.

En la Figura 4-15 se observa el sistema con el panel Backlight encendido, mientras que en la Figura 4-16 se muestra el sistema en completo funcionamiento.

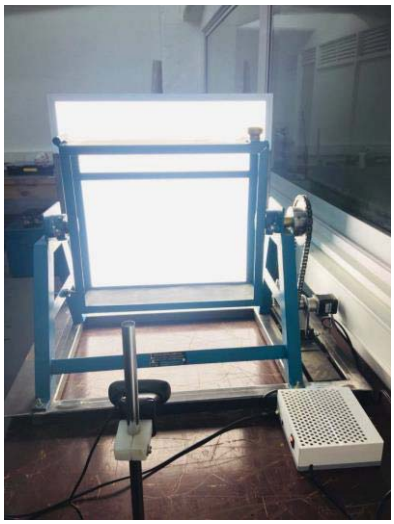


Figura 4-15 Sedilab

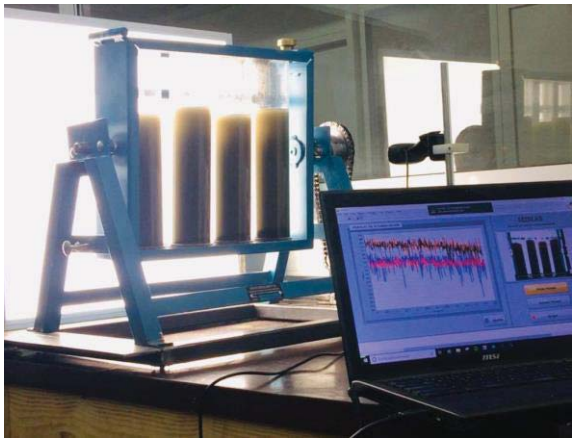


Figura 4-16 Sedilab en funcionamiento

4.3 Secuencias de giro

Las secuencias de agitación se pueden modificar desde el código creado en Arduino, sin embargo, se deben tener en cuenta algunas consideraciones a la hora de decidir implementar algunas distintas. Primero, se debe tener cuidado con las revoluciones por minuto que se le asigne, ya que si la velocidad es muy baja puede ocurrir que el sólido no se distribuya de manera homogénea, depositándose en el fondo de la probeta, y por el otro extremo si es que consideramos una velocidad muy alta puede que la mezcla a estudiar presente problemas de turbulencias, en ambos casos se perjudicaría la realización de los ensayos, pudiendo obtener grandes errores de medición. En segundo punto está la determinación del número de vueltas a realizar, en este ámbito Rodrigo Urtubia de Serquimet comentó y dio algunos consejos y recomendaciones para una buena implementación y trabajo, tanto para la correcta realización de los ensayos como para

la inclusión del sistema de auto agitación. Entre los que destacan, desde su experiencia, que el número de vueltas para la agitación de las probetas está estandarizado y corresponde a 25. También mencionó que las revoluciones por minuto (RPM) aconsejadas son de al menos 3 a 5 RPM.

En el Listado 4-4 se observa en rojo la línea del código en la que se puede modificar la cantidad de pasos que dará el motor, determinando así el número de vueltas que esté realizará, es importante mencionar que se debe tener en cuenta, para el cálculo de los pasos, que el motor cuenta con una caja reductora con una relación de transmisión exacta de 5 + 2/11, además de la relación de transmisión 38/11 de los piñones en el acople. Por otro lado, en azul se muestra la línea del código donde es posible modificar el delay entre cada paso del motor, incidiendo así en la velocidad de agitación del sistema, pero debido a que se trata de un delay mientras menor sea su valor mayor será la velocidad del sistema.

```
1 const int speed_delay = 1000;
2 const int total_steps = 20516;
3 long last_micros = 0;
4 int current_steep = 0;
5 long delay_cambio_direccion = 500;
6 long millis_last_sec = 0;
7
```

Listado 4-4 Modificación de secuencias de giro en Arduino.

La Figura 4-17 muestra donde elegir la secuencia de agitación en la interfaz gráfica de usuario creada con LabVIEW.

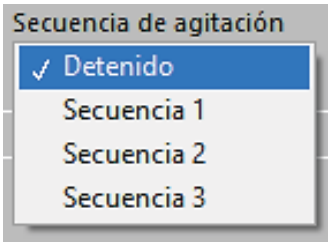


Figura 4-17 Elección secuencia de agitación en LabVIEW.

5 Pruebas y resultados

En este último capítulo se exponen los resultados al ir realizando distintas pruebas de funcionamiento, tanto en el proceso de acople del motor, como en el sistema final obtenido. En este contexto se realizan pruebas utilizando un relave similar, en su granulometría, al relave utilizado en pruebas se sedimentación manual de las que se participó. Se emplearon porcentajes de solido de 5%, 7.5%, 10% y 15%.

5.1 Pruebas Iniciales

Una vez que ya se encontraba acoplado el motor, surgió el primer problema o desafío. En los cálculos de torque y potencia, vistos en el capítulo 2, se consideró un sistema balanceado y perfectamente alineado, sin embargo, en la realidad la estructura presenta un desalineamiento importante, además de un desbalanceo producido por la presencia de una barra en un extremo, una tuerca de seguridad para permitir la apertura y cierre de la tapa, y el que las probetas sean de 1.5 [L] y no de 1 [L] como se suponía. En la Figura 5-1 se presenta una secuencia de fotogramas donde se observa el movimiento impropio de la cadena, debido al desalineamiento del eje de la estructura.

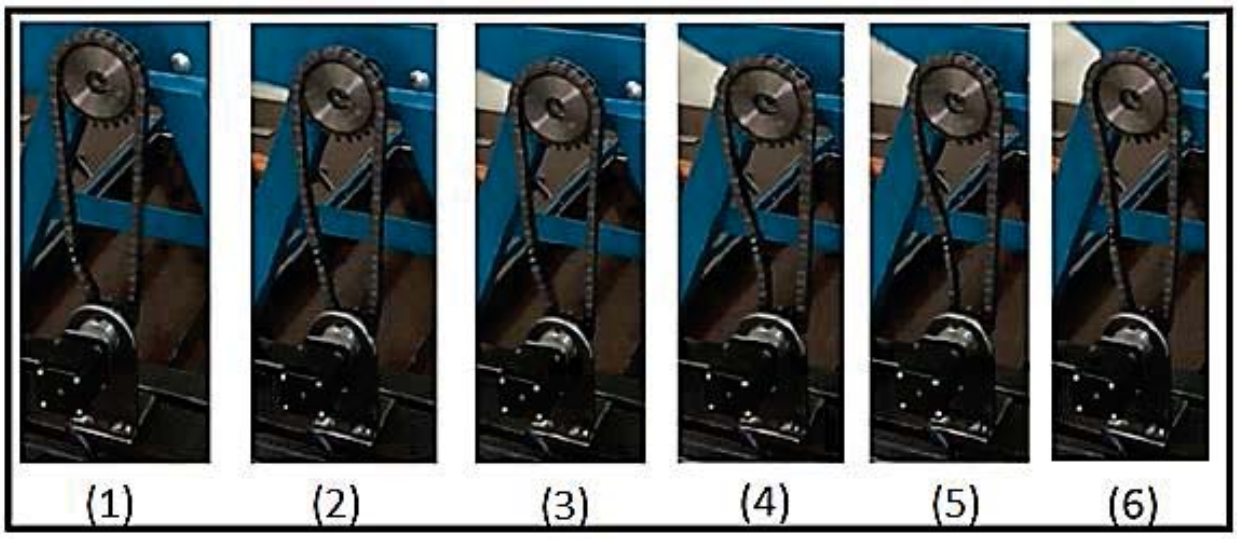


Figura 5-1 Desalineamiento.

Esto provoca un mal funcionamiento del sistema no solo por el movimiento inesperado de la cadena, sino además se producía un exceso de carga y perdidas de potencia en ciertos momentos, por lo que escapa de las condiciones de trabajo para las que fue pensado el motor. Es por ello que la primera medida tomada fue aumentar el tamaño del piñón acoplado al eje de la estructura, es decir modificar la razón de transmisión. Con esto se logra aumentar el torque a costa de disminuir la velocidad, sin embargo, aún se alcanza los 12 RPM a utilizar. Este nuevo piñón se observa en la Figura 5-2, dando la relación de transmisión final de 38/11.



Figura 5-2 Nuevo piñón utilizado.

Aun así, el problema de desalineamiento, y consiguiente un movimiento impropio de la cadena, no estaba solucionado, solo se había aumentado el torque para evitar un sobreesfuerzo del motor. En la Figura 5-3 se muestra como es necesario un elemento externo para mantener la tensión de la cadena uniforme.

Para mitigar este problema se diseñó e implementó el sistema de resorte de la Figura 4-12.

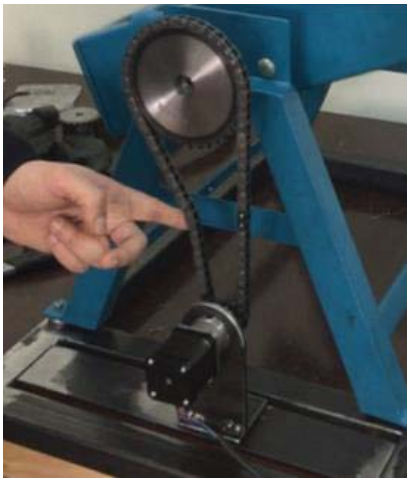


Figura 5-3 Problema en el movimiento de la cadena.

Finalmente, luego de las medidas implementadas se logró disminuir el sobreesfuerzo en el motor y se obtuvo un movimiento mucho más uniforme y natural en la cadena. Gracias a esto el motor es capaz de realizar las secuencias de agitación definidas. La Figura 5-4 muestra una serie de fotogramas correspondientes al video de una prueba realizada con las probetas con 1 [L] de agua cada una. Esta prueba consistió en realizar secuencias de 20 vueltas a 12 RPM, tanto en sentido horario, anti horario y mixto, y en donde se comprobó el funcionamiento del sistema.

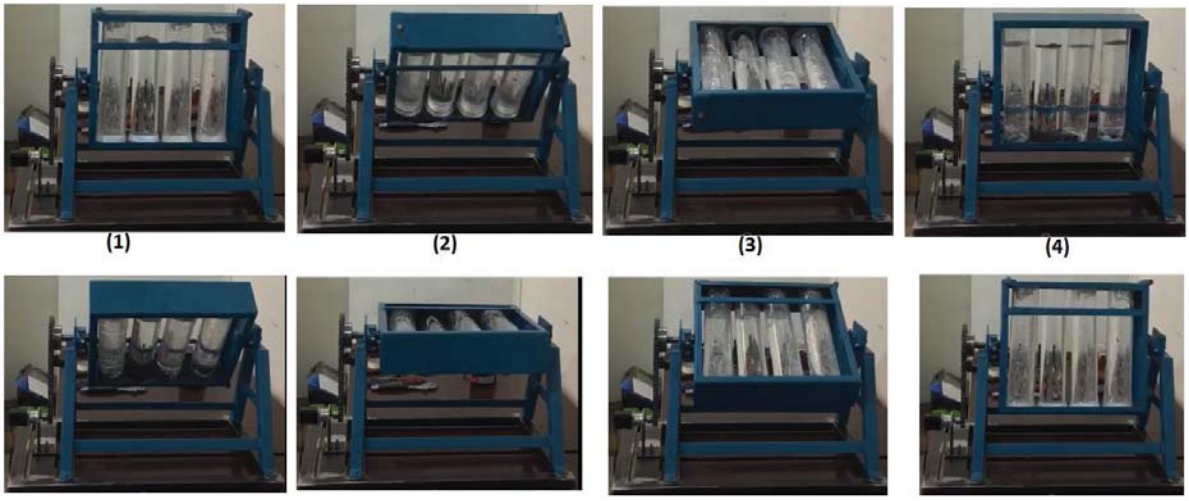


Figura 5-4 Prueba con probetas llenas.

5.2 Pruebas finales

Una vez realizadas las pruebas para comprobar que efectivamente el motor logre agitar la estructura, obteniendo un resultado positivo, el siguiente paso es realizar pruebas, pero comprobando además que el software creado en LabVIEW funcione sin problemas.

Anteriormente se mostró la interfaz gráfica de usuario al integrar el control del motor, ver Figura 4-7. Ahora se deben realizar pruebas utilizando un relave similar, en su granulometría, al relave utilizado en pruebas se sedimentación manual de las que se participó junto a alumnos de la escuela de química. Para esto se emplearon porcentajes de solido de alrededor del 5%, 7.5%, 10% y 15%. En la Figura 5-5 se contempla como el software detecta la altura del solido en cada una de las probetas, se destaca también la presencia del panel led ubicado en la parte trasera.

En la Figura 5-6 se muestra la interfaz gráfica al iniciar el proceso de agitación de las probetas (1),pero también se observa como las opciones para poder dar comienzo a la toma de datos se encuentra inhabilitada (2), esto es para evitar comenzar el cálculo de velocidad de sedimentación estando el sistema en movimiento.

Para que se activen las opciones, que permiten iniciar la toma de datos, se necesita que la agitación esté por concluir, ya que en ese momento Arduino envía 3 mensajes, vía puerto serie, los cuales son recibidos por LabVIEW. En la Figura 5-7 se expone claramente que la secuencia de agitación finalizó (1), y con ello se puede dar inicio a las pruebas de velocidad de sedimentación (2).



Figura 5-5 Interfaz gráfica.

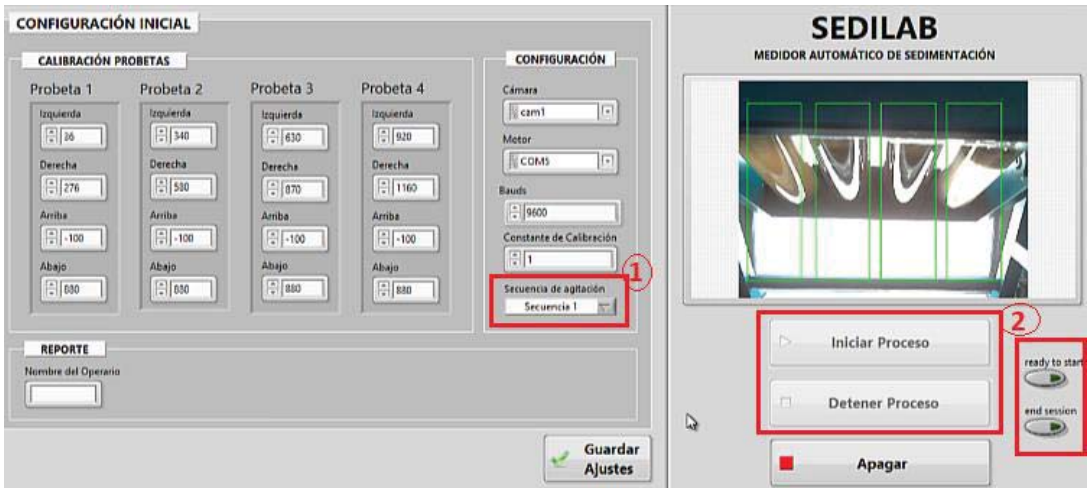


Figura 5-6 Inicio de agitación.

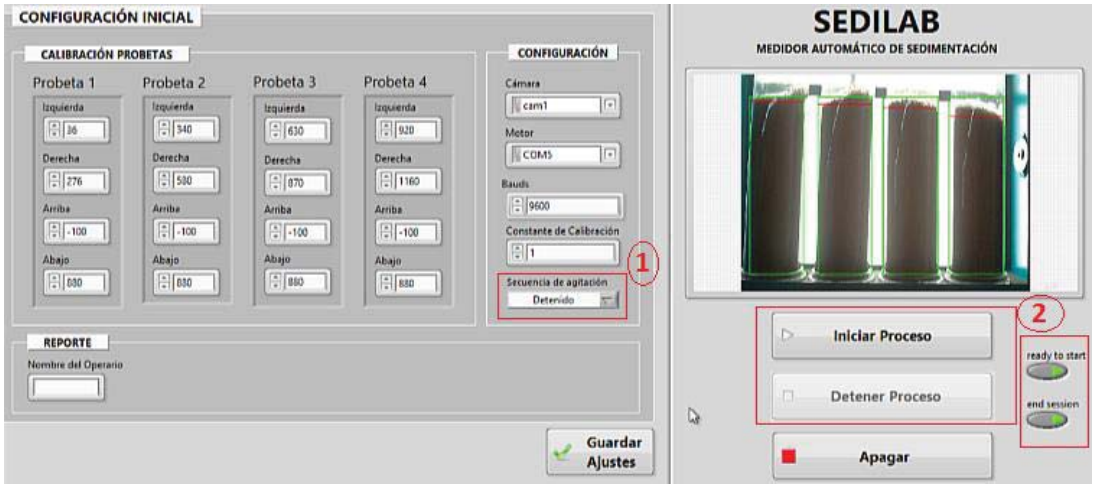


Figura 5-7 Fin de agitación.

Con la secuencia de agitación finalizada, se inicia la toma de datos para las pruebas de sedimentación, ver Figura 5-8. El relave se demora aproximadamente 12 minutos en sedimentar completamente. La Figura 5-9 muestra el avance en el proceso de sedimentación después de 5 minutos, mientras que en la Figura 5-10 se observa el resultado una vez finalizada la decantación del relave. En esta última se observa que existe problema, por parte del software, para reconocer la altura real del sedimento, esto puede deberse a que la probeta asociada a la línea roja es la que contenía un menor porcentaje de relave, por lo que su sedimentación fue mucho más rápida que las demás, y el software comenzó a reconocer diversas perturbaciones.

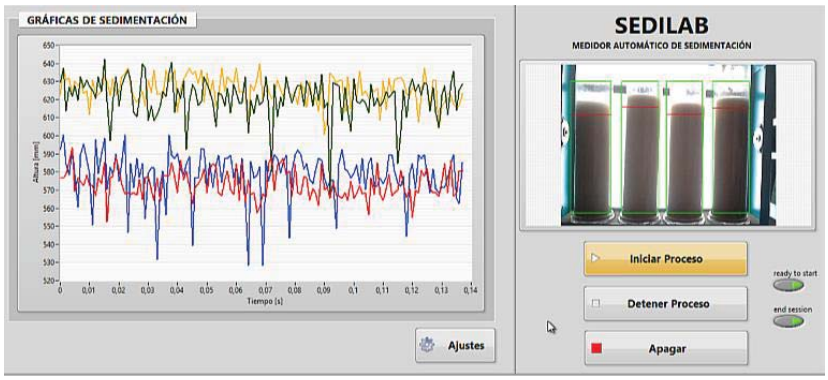


Figura 5-8 Inicio pruebas de sedimentación.

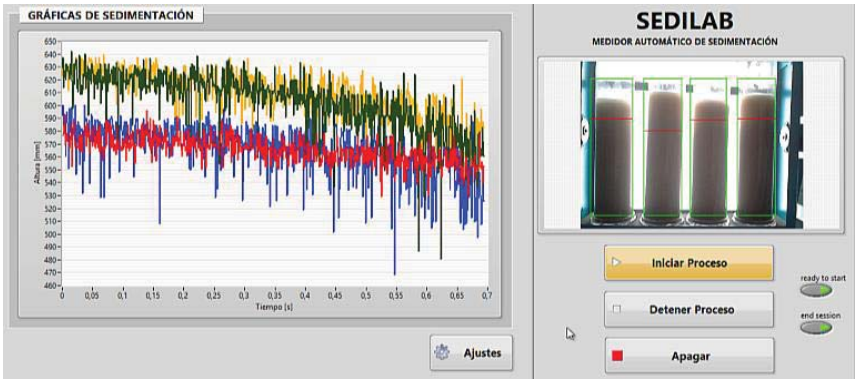


Figura 5-9 Prueba de sedimentación.

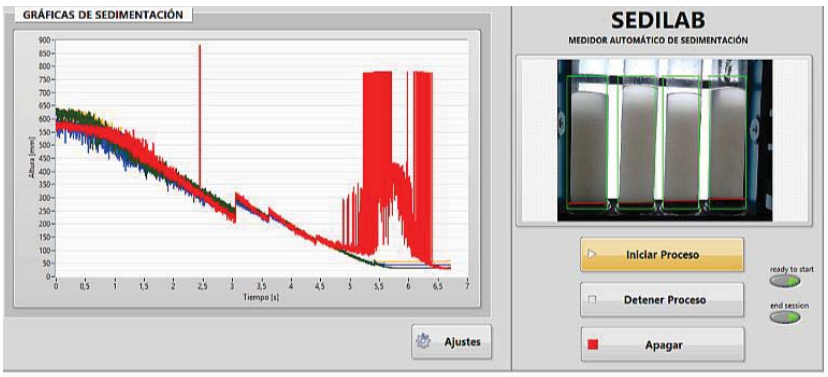


Figura 5-10 Fin pruebas de sedimentación.

Discusión y conclusiones

A lo largo del desarrollo del presente proyecto, y tal como su nombre lo indica, se logró desarrollar un sistema de auto agitación controlado por computador mediante una interfaz gráfica de usuario en LabVIEW. En este contexto y basados en el anterior trabajo realizo por Camilo González, se reemplazó la estructura por una más compacta que permite aumentar a 4 el número de probetas a estudiar, además de permitir acoplar un motor que agita las 4 probetas de manera simultánea, logrando eliminar la anterior tarea donde cada probeta debía agitarse manualmente una por una, lo que afectaba la comparación de los resultados obtenidos luego de las pruebas de sedimentación. Sin embargo, el desarrollo no estuvo exento de distintos problemas y dificultades, los que no impidieron que el objetivo fuese cumplido.

Respecto a la primera parte del capítulo 1, se concluye que fue posible resolver algunas dudas teóricas respecto de dónde y cómo se realiza el proceso de sedimentación, y la consiguiente utilización de químicos floculantes, ya que se pensaba que esto ocurría en los tranques de relave. Realmente la sedimentación se utiliza en el proceso llamado espesamiento, donde para aumentar la velocidad de decantación se usan químicos floculantes. Además, con el fin de poder dimensionar gráficamente la importancia de obtener un correcto ensayo de sedimentación, se realizó un ejemplo ilustrativo basado en información obtenida de la compañía minera Candelaria, complementado con distintos informes y documentos. Por último, se explicó la importancia del proyecto, ya que este se encuentra inmerso en un contexto donde se busca el buen uso del recurso hídrico, que es escaso especialmente en las zonas mineras del país, por lo que la reutilización de las grandes cantidades de agua, necesarias para los procesos mineros, es vital.

Basado en los objetivos y características del proyecto, se logró realizar y proponer una solución, iniciando con el diseño de una nueva estructura, la cual fuese más compacta, con capacidad para 4 probetas y lo más importante que contara con una parte móvil que fuera capaz de ser agitada a la vez por un motor, ver Figura 2-1, Figura 2-2 y Figura 2-3. Aunque finalmente se decidió adquirir una estructura, que es muy similar al diseño propuesto, en la empresa Serquimet, ver Figura 2-4.

Una vez que ya se contaba con la estructura, se procedió a realizar los cálculos para dimensionar el motor, es decir poder conocer el torque y la potencia requerida por el sistema para ser agitada. Para ello se realizaron consultas con distintos profesores de la escuela de ingeniería eléctrica PUCV, con el motivo de lograr obtener resultados lo más fiable posible, ya que de esto dependía

la decisión de que motor comprar. Ya con estos cálculos realizados, se determinó que el motor más apto, para la tarea y las necesidades del proyecto, resultaba ser el motor paso a paso, específicamente un NEMA 17 que cuenta con una caja reductora y que es especialmente usado en sistemas que requieren altas potencias a bajas velocidades, ver Figura 2-9.

El siguiente paso lógico resultaba ser el acople del motor a la estructura, sin embargo, no resulta tan sencillo como parece, ya que fue necesario investigar detalladamente para poder concluir que modo o sistema resultaba más conveniente y efectivo. En este ámbito podemos decir que existen diferentes sistemas de trasmisión de potencia, entre los que destacan los sistemas de acople directo, acople por bandas y poleas, engranajes y finalmente el de cadena y piñón. Ya con la información necesaria recabada, se concluyó que la mejor opción es el sistema de transmisión por piñón y cadena, ya que está diseñado para trabajar con grandes torques y pequeñas velocidades, no presenta deslizamiento por lo que no se pierden pasos del motor, su implementación es relativamente sencilla y barata, y finalmente es más compacto. Sin embargo, aunque se investigó y definió el mejor sistema de transmisión de potencia, una vez acoplado el motor a la estructura se presentaban ciertos problemas, especialmente relacionados con un desalineamiento del eje de la estructura. Es así como se probaron e implementaron una serie de soluciones y modificaciones, concluyendo con la mitigación en gran medida de los problemas presentados.

Se logró escribir un código en Arduino que no solo permitiera controlar el motor paso a paso, sino que además realizara comunicación por puerto serie con LabVIEW. Es así como se reciben y envían instrucciones que significan el cumplimiento de uno de los objetivos trazados, específicamente el relacionado con el control del motor por computador. Aunque en el diseño del programa en LabVIEW se presentaron algunos inconvenientes, ya que no se poseía instrucción ni experiencia en este entorno de desarrollo, por lo que fue necesario dedicar mucho más tiempo del esperado. Aun así, se concluyó con el diseño de un programa con interfaz gráfica que permite accionar y controlar el motor.

Ya con el sistema completo, se realizaron algunas pruebas de desempeño, que corroboraron el buen funcionamiento del mecanismo de agitación. Pero, también se terminó con una prueba general, donde se comprobó que la integración del software desarrollado por Camilo González con el software para el control del motor diseñado en el presente informe funcionara de manera correcta, obteniendo como resultado las pruebas mostradas en las Figura 5-6, Figura 5-7, Figura 5-8, Figura 5-9Figura 5-10 y Figura 5-10 .

Se trabajaron además las habilidades blandas, ya que a lo largo del desarrollo del proyecto fue necesario realizar tareas en conjunto con una serie de personas, tanto de la escuela de química como de la EIE, y principalmente con el personal del taller electromecánico, primero con Renzo Gallardo y luego con Marco Chappa. En este contexto se exploraron áreas del conocimiento ajenas a las enseñanzas recibidas a lo largo de los años que comprende la carrera de Ingeniería Civil Electrónica, especialmente los diversos conceptos y procesos que se realizan en el ámbito de la minería.

Para futuros trabajos y mejoras del sistema Sedilab, se propone en primera instancia el cambio o modificación de la estructura adquirida en Serquimet, ya que esta posee un desalineamiento importante que afecta el correcto funcionamiento del motor, y a pesar de que sus efectos fueron minimizados en gran medida al incorporar un sistema de resortes, se busca diseñar una estructura comercial y compacta, por lo tanto, es preciso eliminar la mayor cantidad de elementos posibles. También está la posibilidad de añadir un sensor de posición, que permita controlar una posición definida de las probetas, específicamente un estado vertical, es decir que después de cada agitación la estructura vuelva a un estado inicial, el cual corresponde a la posición vertical.

Finalmente, el proyecto representó un verdadero desafío, ya que aborda una serie de áreas distintas, las que en su mayoría resultaban extrañas y ajenas, por lo que fue necesaria mucha investigación y estudio, aun así, se logró cumplir con el objetivo general y la mayoría de los objetivos específicos, dejando por realizar comparaciones de resultados con pruebas realizadas de manera manual con relave real.

Bibliografía

[1] Cochilco, «www.cochilco.cl,» 2017. [En línea]. Available: https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/Consumo%20de%20agua%20en%20la%20mineria%20del%20cobre%20al%202016%20-%20version%20final.pdf.

[2] C. A. González López, «Desarrollo e implementación de un sistema de medición de velocidad de sedimentación,» Valparaíso, 2016.

[3] Codelco, «CodelcoEduca,» 2018. [En línea]. Available: https://www.codelcoeduca.cl/site/edic/base/port/flotacion.html.

[4] B. Minero, «Fundación tecnológica,» 2016. [En línea]. Available: http://www.fundaciontecnologica.cl/ sonami/wp-content/uploads/2017/05/Art%C3%ADculo-FT-Boletin-Minero-1299_2016_05.pdf.

[5] P.-H. Dodane y M. Bassan, «Tanques de sedimentación y espesamiento,» de *Manejo de lodos*, Londres, IWA publishing, 2014.

[6] C. Minero, «Uso Eficiente de Aguas en la Industria Minera y Buenas Prácticas,» Noviembre 2002. [En línea]. Available: https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2018/03/Acuerdo-marco-de-producci%C3%B3n-limpia-sector-gran-miner%C3%ADa.- Buenas-pr%C3%A1cticas-y-gesti%C3%B3n-ambiental.pdf.

[7] E. Chaparro Ávila, «Los procesos mineros y su vinculación con el uso del agua,» Abril 2009. [En línea]. Available: https://www.cepal.org/ ilpes/noticias/paginas/1/35691/Eduardo_Chaparro_agua_y_mineria.pdf.

[8] A. M. processing, «ampmineral,» http://www.ampmineral.com/ equipos/ control-automatico-de-sedimentacion.php, 2017.

[9] H. D. Young y R. A. Freedman, Física Universitaria, Pearson, 2009.

[10] V. A. Cruz Vásquez, «Diseño de una transmisión de potencia entre bomba y motor para bombeo de lodo,» Facultad de ingeniería, UDEP, Piura, 2009.

[11] Arduino, «Arduino,» [En línea]. Available: https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3.

[12] H. Vargas Oyarzún, *Fundamentos de LabVIEW,* Escuela de Ingeniería Eléctrica PUCV.

[13] N. Instruments, «NI,» [En línea]. Available: http://sine.ni.com/ nips/cds/view/p/lang/es/nid/12145.

[14] Lancet, «Understanding D.C Motor Characteristics,» 2007. [En línea]. Available: http://lancet.mit.edu/motors/motors3.html.

[15] Primatics. [En línea]. Available: https://www.primatics.com/sites/default/files/inline-files/primatics_unit_conversions.pdf.