Universidad Técnica Federico Santa María
Departamento de Informática
Valparaíso-Chile

Desarrollo de la Interfaz de una Aplicación Industrial para la Identificación y Separación de Minerales de Cobre de alta Ley mediante Visión por Computador

Nombre: Eduardo Sebastián Vera Ampuero

Carrera: Ingeniería Ejecución Informática
Profesor Guía: Hubert Hoffmann
Profesor Correferente: Christopher Nikulin

Fecha: Agosto de 2017

Agradecimientos

Deseamos extender el más cordial de los agradecimientos para nuestros compañeros de equipo del programa de las memorias multidisciplinarias, versión primer semestre de 2016, Eduardo Piñones, de Ingeniería en Diseño de Productos, y Gabriela Gondeck, de Ingeniería Civil Electrónica. También a sus respectivos profesores guías, el profesor Christopher Nikulin del Departamento de Ingeniería en Diseño de Productos y al profesor Marcos Zúñiga del Departamento de Ingeniería Electrónica.

Sin su valiosa ayuda a través de los dos semestres que duró el programa, este proyecto nunca habría llegado a destino, ambicioso como es, y es también uno de los primeros pasos que da nuestra Universidad en el campo de los proyectos colaborativos inter-carrera. Y confiamos que, a medida que pasa el tiempo, cada vez más de los trabajos de titulación de los alumnos sigan esta modalidad.

Universidad Técnica Federico Santa María
Departamento de Informática
Valparaíso-Chile

Dedicatoria

Dedico esta memoria a Iván, Zackary, Érica y Andrea, cuyo valioso apoyo me permitió sobreponerme a los momentos más tristes durante mi estadía en la universidad. Ustedes me dieron esperanza en un futuro mejor no sólo para mí, sino para toda la humanidad. En la creencia de que el futuro de una persona no está escrito. Que las personas nos volvemos mejores sobrepasando las dificultades, inevitables como son dentro de la condición humana. Y que como seres humanos podemos forjar nuestro propio destino, mientras seamos consecuentes con nuestras elecciones.

Universidad Técnica Federico Santa María
Departamento de Informática
Valparaíso-Chile

Resumen

En los últimos años la minería de cobre chilena ha disminuido sus utilidades al disminuir la ley del mineral en los yacimientos por la explotación del recurso no renovable, lo cual implica un aumento del costo monetario y el uso de recursos hídricos y energéticos para obtener la misma cantidad de mineral útil. No existen soluciones fáciles y a corto plazo para esta tendencia.

Se pretende desarrollar una aplicación industrial que permita identificar la ley de los minerales en tiempo real mediante el uso de visión por computador, y luego separarlos del flujo para que sólo pasen a ser procesados los minerales que tengan un alto retorno para la empresa (rocas de alta ley). Esta aplicación es desarrollada por un equipo de trabajo. En esta memoria se desarrolla la interfaz con el usuario. El desarrollo se realiza en el framework Visual Studio, con el lenguaje de programación C++, con la modalidad de proyecto MFC.

El objetivo final de esta memoria es desarrollar un prototipo de la aplicación real que funcione a nivel de laboratorio, con flujos de minerales muy acotados, que identifique las rocas por su ley y las separe por este criterio. De esta forma, se espera comprobar que la idea es factible de realizar a una mayor escala, para que la siguiente iteración de este proyecto sea capaz de procesar los flujos con los que funcionan las pequeñas empresas mineras.

Universidad Técnica Federico Santa María
Departamento de Informática
Valparaíso-Chile

Abstract

In the latest years, chilean copper mining has decreased its profits by the descent of the yield of the deposits by the exploitation of the non-renewable resource, which implies an increase of the monetary cost and the use of hydric and energetic resources to process the same amount of useful mineral. There are no easy short-term solutions for this tendency.

The intention is to develop an industrial application that allows to identify the yield of the minerals in real-time by the use of computer vision, and then separate them from the flow, so that only pass to being processed the minerals that have a high yield for the mining company. A work team was developing the application. In this document is described the development of the user interface in the framework Visual Studio, with the programming language C++, with the project modality MFC.

The final goal of this thesis is to develop a prototype of the real application that functions at a laboratory level, with very small mineral flows, that identify the yield of the rocks and separate them by this criterion. In this way, we can confirm that it is feasible to implement this idea in a larger scale, so that the next iteration of this project is capable to process the flow with which small mining companies operate.

Glosario

Ley del Mineral: Corresponde al porcentaje promedio de un determinado mineral dentro de una roca extraída de un yacimiento.

Heterogeneidad del Material: Las rocas extraídas de los yacimientos poseen distinta ley si se les analiza individualmente.

Costos Operativos: Todos los costos relacionados al proceso de extracción del mineral. Debido a la baja de las leyes de los yacimientos y a la baja del precio de las materias primas, éstos han ido en aumento en los últimos años.

Planta concentradora: Parte de la línea de procesos mineros en que se realiza el refinamiento del material proveniente del yacimiento. Es aquí donde se concentra el mayor gasto de energía eléctrica.

Optimización del Proceso Minero: Dado que el material extraído es heterogéneo, se puede suponer que existe material que contiene baja ley del mineral requerido, por lo que no se justifica procesarlo en la planta concentradora, al generar más gastos que los beneficios que reporta.

Seleccionadores (Sorting): Tecnología utilizada en distintas industrias en las cuales se cuenta con un flujo de material que se quiere separar, dado que sus componentes presentan distintas propiedades.

Identificación de composición de Minerales: Siguiendo la metodología de los seleccionadores, es necesario conocer la composición del material, pero ya que este se encuentra en movimiento en la línea de procesamiento, es que es inviable realizar un análisis químico. Ante esto se presenta la opción de identificar la composición de las rocas mediante su espectro visual.

Tecnologías de Visión: Dado que el espectro de las rocas es tan amplio, se debe acotar al espectro que entregue mayor información sobre la composición del mineral. Para ello existen distintas tecnologías (NIR, XRF, XRT, etc.), cada una de las cuales entrega un rango del espectro determinado.

Separación del Flujo de Minerales: Una vez que se conoce la composición del material que está en la línea de procesos, se busca separar automáticamente del flujo que será refinado aquellas rocas que posean una baja ley.

Soporte a nivel industrial: Considerando que la aplicación está pensada para la industria minera, es que el software de la misma será desarrollado con herramientas de programación que están adaptadas para el sistema operativo Windows, que entrega amplio soporte técnico para empresas.

Prototipo: Corresponde al producto que se generará al final del proyecto, el cual será una máquina funcional a escala laboratorio, pero que incluirá características a nivel industrial, de tal manera que se facilite la transición a un flujo de mineral real en el futuro.

Índice

1 Introducción 10

2 Estado del Arte/Soluciones Existentes 12

2.1 Tipos de Equipos 13

2.1.1 Máquina tipo Tolva 13

2.1.2 Máquina de Correa 14

2.2 Sensores de Visión 14

2.2.1 Sensores Radiométricos 15

2.2.2 Rayos X 15

2.2.3 Visible 16

2.3 Infrarrojo 16

2.4 Microondas 17

2.5 Electromagnéticos 17

3 Marco Conceptual del Proyecto Sorting 19

3.1 Alternativas de Solución 20

3.1.1 NIR 21

3.1.2 XRF/XRT 21

3.1.3 Visión 21

3.2 Acercamiento a la Solución 22

3.2.1 NIR 23

3.2.2 Correa 23

3.3 Contexto general del prototipo 24

3.3.1 Prototipo de Laboratorio 24

3.3.2 Recursos Limitados 24

3.4 Diseño del Prototipo 24

3.4.1 Arquitectura del Sistema 24

3.4.2 Diagrama de proceso de materiales 25

3.4.3 Requisitos específicos 26

3.4.4 Descripción General de Módulos 27

3.4.5 Diseño de los Módulos 28
3.5 Desarrollo de la interfaz 29
3.5.1 Hitos 29
3.5.2 Dificultades 41
3.6 Validación y Testeo 58
3.6.1 Obtención del umbral de detección 58
3.6.2 Plan de Testeo 59
3.6.3 Análisis Crítico y Evaluación de Riesgos 61
4 Conclusiones 62
4.1 Resultados 62
4.2 Trabajo Futuro 63
5 Referencias 65
6 Anexos 69
6.1 Diagrama de Flujo de la Interfaz de Calibración 69
6.2 Estudio Legal y Ambiental 69
6.3 A Framework of Sorting Technologies and its Applicability to Copper Mining 72

1 Introducción

La minería en Chile adquiere un rol importante en términos económicos, ya que ésta equivalió aproximadamente a un 10% (Comisión Chilena del Cobre, 2012) del Producto Interno Bruto durante el año 2015, y el 9% correspondió al cobre (se explota cobre, oro, plata y molibdeno). Es por esto que se hace necesario la investigación de tecnologías acordes a las necesidades de la minería nacional, ya que se procesan grandes cantidades de mineral, 5.74 millones de toneladas métricas en cobre y 44.16 toneladas métricas en oro anuales (Consejo Minero, 2016).

Debido a que la ley del mineral de las minas disminuye a medida que éstas se explotan (Comisión Chilena del Cobre, 2012), es imperativo lograr reducir los costos de producción de minerales mediante la implementación de un "Sistema avanzado para la identificación y separación inteligente de materiales mineros".

En la actualidad, no existen soluciones al problema de clasificación y separación en línea, simplemente se procesa todo el material sin importar la ley que éste tenga. Se han hecho múltiples investigaciones respecto a estos sistemas con mineral chileno, en específico de cobre, las cuales han mostrado resultados prometedores para la aplicación de esta tecnología con el mineral de las minas chilenas.

Para enfrentar este problema es que se propone el proyecto Sorting, una aplicación industrial, desarrollado por un equipo de trabajo conformado por memoristas de distintas carreras de la Universidad Santa María, que permite identificar la ley de los minerales mediante visión por computador, y luego separarlos del flujo para que sólo pasen a ser procesados aquellos minerales que tengan un alto retorno para la empresa.

En este documento se detallará el estado actual de la tecnología en el área de selección de minerales mediante visión por computador, se explicará el contexto del prototipo de la aplicación industrial que se pretende generar, los diferentes módulos, sus características, diseño, y estado de avance en cada uno de ellos. A la vez se propondrá una metodología de testeo y un plan de avance futuro.

2 Estado del Arte/Soluciones Existentes

A nivel mundial, la metodología para abarcar esta clase de problemas ha sido el uso de seleccionadores. Estos consisten de un sistema de procesamiento el cual se compone de varios subprocesos (“Sensor-based sorting”, s. f.):

- Preparación de la alimentación: Consiste en pasar el flujo de minerales a través de un vibrador, el cual crea una capa de material donde cada roca individual está lo suficientemente separada para que sea posible la correcta identificación del material.
- Presentación: La principal función de este subproceso es generar un flujo constante de material, predecible y de velocidad constante, para facilitar el análisis y separación del mismo.
- Detección: En esta etapa, se detectan las características que se buscan en el material para su posterior separación. Para esto existen diferentes tecnologías, las cuales se analizan con mayor detalle en otras secciones. Existen tecnologías de reflexión y de transmisión. Las de reflexión deben pasar por una etapa previa en la cual se condiciona el material para la correcta detección del sensor.
- Análisis de la data: La información espacial y espectral es recolectada por el sistema de detección y luego analizada para generar una respuesta del tipo si/no, es decir si se activa el mecanismo de eyección o no.
- Separación de partículas: En esta sección se procede a eliminar del proceso de refinamiento del mineral, aquellas rocas que no cumplan con el criterio con el que se definió la identificación. Este subproceso es dependiente del anterior proceso de análisis, y de que se haya hecho correctamente para que la eyección cumpla con el requerimiento principal del seleccionador, es decir que se remueva del flujo el residuo, o roca con poco valor. Actualmente se utilizan eyectores neumáticos, como por ejemplo válvulas de aire (Jet pulse).

El uso de este tipo de tecnologías ha ido en aumento y actualmente se encuentra instalada en más de 200 empresas del área de la minería, principalmente en la industria de minerales preciosos como el diamante, y también está presente en otras industrias, como por ejemplo, la industria agrícola. En las empresas mineras de Sudáfrica, esta tecnología ha tenido una gran adopción, un ejemplo claro es la mina de oro en Sudáfrica Kloof (von Ketelhodt, 2012). Otro ejemplo, en Sudáfrica, se encuentra en la provincia de North West con diamantes (von Ketelhodt, 2009). En Ontario Canadá existe una mina de talco que pudo continuar sus operaciones gracias a la separación del material extraído debido a la reducción de costos y el poder explotar mineral de baja ley (Hersey, 2007), otro ejemplo de gran importancia es la mina de cobre Los Verdes de México ("sensor-based sorters enable miners to process ore faster", 2015). Estos son claros ejemplos de las ventajas que se obtienen al utilizar esta tecnología en la minería.

A continuación de esta descripción del estado del arte general, se explicará el estado del arte para cada componente que participa en el proceso.

2.1 Tipos de Equipos

A lo largo de los años, en los cuales se ha desarrollado esta tecnología se han diseñado variados tipos de máquinas, tales como rueda de cangilones, tipo cono y tipo canal. En la industria minera se utilizan principalmente las máquinas con tolvas y de correa. Ambas tienen tanto ventajas como desventajas, por lo cual se debe analizar en qué situación se aplicarán ("Sensor-based sorting", s. f.).

2.1.1 Máquina tipo Tolva

Este tipo de maquinaria, tiene un costo más bajo de utilización y de inversión, debido a que contiene menos partes movibles. En general es aplicable cuando se utiliza detección por superficie, es decir reflexión, debido a la posibilidad de escanear la partícula por ambos lados.

2.1.2 Máquina de Correa

Normalmente es utilizada donde la roca alimentada al sistema es pequeña y se necesita adhesión. Además, la presentación del material es más estable debido que se encuentra sobre una superficie, lo que la hace excelente candidata cuando el material es muy heterogéneo y en aplicaciones más complicadas.

2.2 Sensores de Visión

Hoy en día existen diferentes tecnologías en sensores de visión, además de la alta velocidad de respuesta de los procesadores de los últimos años, que hacen posible la implementación de soluciones que permiten disminuir el alto costo de los procesos en minería. Estos sensores utilizan el espectro electromagnético para obtener diferentes características del material y poder clasificarlo. A continuación, se presenta una tabla en la figura 1 en la cual se muestran las diferentes tecnologías utilizadas y las características que miden.

Table 1. Available sensor systems for sorters, the detected material property, and examples of mineral applications

Sensor system	Abbreviation	Material property measured	Mineral application
Radiometric	RM	Natural gamma radiation	Uranium, precious metals
X-ray transmission	XRT	Atomic density	Base/precious metals, coal, diamonds, industrial minerals
X-ray fluorescence	XRF	Elemental composition	Base/precious metals
X-ray luminescence	XRL	Visible fluorescence under X-rays	Diamonds
Visual spectroscopy	VIS	Reflection/absorption of visible radiation	Metals, industrial minerals, gemstones
Red, green, blue camera	COL	Colour, reflection, brightness, transparency	Base/precious metals, industrial minerals, gemstones
Photometric	PM	Monochromatic reflection, absorption	Industrial minerals, gemstones
Near-infrared spectroscopy	NIR	Reflection/absorption of near-infrared radiation	Base metals, industrial minerals
Thermal infrared camera	TIR	Microwave excitation and thermal infrared radiation	Base metals, precious metals

Figura 1: Tecnologías utilizadas en sensores para seleccionadores en minería (Robben, Wotruba, Robben, von Ketelhodt, & Kowalzcyk, 2013).

2.2.1 Sensores Radiométricos

Estos se basan en la medición de la radiación natural de los minerales, debido a que cada elemento tiene una radiación diferente es que se puede utilizar en la separación de materiales. Esta tecnología es mayoritariamente utilizada para la extracción de uranio.

El principio por el que se rige es la medición de fotones del material, al ser irradiado con radiación de alta energía, como radiación γ. Los fotones emitidos son dirigidos a un sensor de luz, el cual emitirá una señal al liberar electrones (Knapp, Neubert, Schropp, & Wotruba, 2014).

2.2.2 Rayos X

Dentro de la tecnología de rayos X existen tres tipos diferentes: de trasmisión, de fluorescencia y de difracción.

2.2.2.1 XRT - X-Ray Transmision

La tecnología XRT funciona bajo el mismo principio de un scanner de rayos X en un aeropuerto. El material es irradiado con rayos X y mediante un receptor se obtienen los rayos X no absorbidos. En otras palabras, mediante la absorción de la energía es que se diferencia el mineral, por lo que depende en la variación del número atómico de los elementos que forman el mineral. Finalmente, en la imagen que se obtiene, el mineral que es más denso atenúa los rayos X que logran pasar al receptor, por lo que aparecen de color más oscuro, mientras que los minerales con un número atómico más pequeño en promedio, se observan más claros (Knapp et al., 2014).

2.2.2.2 XRF - X-Ray Fluorescence

Rayos X de fluorescencia excitan los átomos del material mediante la radiación de rayos X. Radiación de rayos X de alta energía genera que los átomos se ionicen, y así los electrones de capas internas se desprenden. Luego los electrones, al volver a su estado inicial, emiten lo que se llama fluorescencia de rayos X. La fluorescencia emitida es característica según la abundancia de algún elemento en específico, por lo que se puede utilizar para la cuantificación de la composición química del material. A diferencia de la tecnología explicada en el apartado anterior es capaz de medir las características de las partículas en la superficie (Knapp et al., 2014).

2.2.2.3 XRD - X-Ray Difraction

El principio bajo el cual funciona la tecnología XRD es la difracción. Se emite un haz de rayos X al material y se observa el patrón de difracción generado por átomos en una estructura cristalina. Esto es posible debido a que la longitud de onda del rayo X es alrededor de 1-100 Å (angstrom [10E-10 m]), lo cual es una longitud comparable a la separación entre átomos en una estructura cristalina. Debido a la medición de la densidad de electrones del material es que es posible obtener la posición promedio de los átomos, los enlaces químicos, entre otra información("X-Ray Crystallography", s.f.). Esto hace posible que sean reconocidos los diferentes elementos que componen un mineral, gracias a que varias estructuras son cristalinas y se pueden formar mediante sales, metales, minerales y semiconductores.

2.2.3 Visible

La tecnología visible se basa en la detección de diferentes colores, transparencias y brillo de las partículas en la superficie del mineral, que se encuentran en el rango visible del espectro electromagnético. Normalmente se utilizan cámaras CCD (Charge-Coupled Device), por lo que se requiere una superficie limpia antes de pasar por el sensor (Knapp et al., 2014).

2.3 Infrarrojo

Existen varias tecnologías que actúan en el rango infrarrojo en el espectro, pero se hará una breve descripción a la tecnología cercana al infrarrojo.

NIR-Infrared

La base de la tecnología NIR es la detección de la reflexión de energía emitida cercana al infrarrojo, con una longitud de onda alrededor de 180 y 2500 [nm]. NIR es capaz de determinar la composición de una muestra midiendo la excitación de átomos pertenecientes a moléculas NIR-activas. Para poder aplicar esta tecnología es necesario que existan ciertas correlaciones entre la absorción característica y materiales específicos, y de esta manera poder aplicar algoritmos de separación (Knapp et al., 2014). Por ejemplo para la separación del pórfido de cobre[1], el cual no es NIR-activo, se busca, en general, calcita y muscovita y las rocas que contienen tales minerales se separan y son eliminadas del proceso, debido a la relación indirecta existente entre el cobre y calcita, y muscovita (Shekwonyadu et al., 2015).

2.4 Microondas

Para la separación de material mediante microondas, se excita el material mediante estas ondas, y luego se observan los cambios de temperatura que sufre la roca. De igual manera que las otras tecnologías, el aumento de temperatura, a una misma cantidad de radiación y tiempo, es intrínseco del material por lo que hace posible la separación de éste.

Para la utilización de esta tecnología es necesario tener cámaras infrarrojas, que sean capaces de detectar un mínimo cambio de temperatura, por lo que se recomienda el uso de cámaras con una resolución de 1°C(Knapp et al., 2014).

2.5 Electromagnéticos

Los sensores electromagnéticos utilizan la interacción entre metales y campos magnéticos como un criterio. Estos consisten de dos elementos principales, una bobina transmisora y una receptora. La bobina transmisora emite un campo electromagnético alterno que interactúa con el metal. Esta interacción es medida por la bobina receptora, la cual emite una señal que luego es procesada para la separación del material (Mesina, De Jong, & Dalmijn, 2003).

[1] Se denomina pórfido cuprífero o pórfido de cobre y molibdeno a un tipo de mineralización de origen magmático e hidrotermal. Los pórfidos cupríferos constituyen la principal fuente de extracción tanto de cobre como de molibdeno ("Pórfido cuprífero", s.f.).

Esta separación es posible debido a que la corriente inducida en el metal es específica para cada material, permitiendo la clasificación. Es importante destacar que la sensibilidad de este tipo de sensores puede ser ajustada con precisión para apuntar a cierta conductividad del material (Murphy, van Zyl, & Domingo, 2012).

En el mundo existen dos grandes empresas que venden estas soluciones a la industria minera, TOMRA y Steinert GmbH. El principal problema de estas soluciones es que contienen una gran variedad de sensores dentro de los equipos, para poder aplicarlos a variados minerales, lo que encarece el valor de adquisición. El hecho que contengan una gran variedad de sensores es debido a que se deben hacer varias pruebas con los diferentes sensores para obtener el más idóneo para cada mineral y cada yacimiento. Este último aspecto es el más importante, ya que la composición general de las rocas extraídas dependerá directamente de su yacimiento, cambiando completamente las características que se desean analizar.

3 Marco Conceptual del Proyecto Sorting

Una revisión de la literatura, muestra que ha habido muy pocos avances en las metodologías de selección de mineral. Estos sistemas son creados para minas y minerales específicos. De esta manera al querer implementar algún sistema ya investigado en otra mina, se necesita hacer cambios considerables para adaptarlo. Esto representa grandes costos monetarios, disminuyendo el desarrollo de nuevas tecnologías y metodologías. Por esto es que sólo serán asequibles para grandes empresas mineras, o mineras que exploten minerales con un gran retorno en la inversión. Además, la naturaleza de las minas es importante a la hora de elegir la tecnología, lo que hace más difícil la elección de alguna de éstas para un mineral en específico, es decir que para un mismo mineral existen diferentes tecnologías dependiendo de su formación geológica.

Hipótesis científicas: En estas hipótesis se quiere alcanzar un alto nivel a la hora de seleccionar el mineral, con velocidades cercanas a 24 ton/hr app. Para poder alcanzar esta meta es que se tienen los siguientes supuestos.

1. Mediante el uso del espectro visual se podrá seleccionar mineral de interés, utilizando segmentación visual y cuantificación en base a colores y textura.
2. Se diseñará un sistema de visión, cámara, filtros e iluminación, basado en las longitudes de onda de interés identificadas.
3. Con los datos obtenidos se desarrollará software que sea capaz de clasificar las imágenes del mineral basado en su ley estimada. Se estudiarán técnicas de Clustering, por ejemplo, KMeans, Fuzzy K-Means, etc, y técnicas de Machine Learning, como SVM, Convolutional Neural Networks (CNN), etc, para desarrollar nuevos modelos para la clasificación de minerales. El software desarrollado debe ser lo suficientemente flexible para poder acomodarse a nuevos tipos de material, luego de un simple procedimiento de calibración, debido a que las características del material extraído dependen de la mina.

4. Se desarrollará software de control, para poder controlar los mecanismos del seleccionador basado en la salida del sistema de visión.
5. Durante el desarrollo del proyecto se diseñará y construirá un prototipo que contenga todos los elementos descritos anteriormente: sensores, software, controladores, etc.

3.1 Alternativas de Solución

Dadas estas características del problema es que se proponen 2 posibles soluciones:

1. Implementar el mecanismo de identificación y separación de minerales después de las máquinas chancadoras, de manera que se pueda aumentar la ley del flujo de minerales que pasan por la correa transportadora antes de su procesamiento, y de esta forma obtener una mayor productividad resultado del mismo proceso que actualmente usan las mineras.
2. Implementar la maquinaria después del relave, que son los desperdicios resultantes del proceso de extracción del cobre. La idea en este caso es revisar los minerales que son desechados y recuperar un porcentaje importante de mineral útil de ellos. En este caso se agrega una etapa más al proceso que actualmente usan las mineras, por lo que potencialmente su costo de operación es mayor que la solución anterior.

Dentro de las tecnologías del sistema es que se presentan varias opciones en el ámbito de sensores, mientras que en tipos de máquinas la más idónea para la aplicación es del tipo tolva, esto debido a que la mayoría de las tecnologías de visión posibles son del tipo reflectantes y además es de un costo más reducido que del tipo correa.

A continuación, se analizarán las opciones que presentan mayores ventajas para la detección de cobre.

3.1.1 NIR

El uso de una imagen infrarroja, especialmente el uso de imágenes en el infrarrojo cercano, e infrarrojo de onda corta (Near Infrared o NIR, y Short Wave Infrared o SWIR), permite la detección de materiales susceptibles a reflejar la energía emitida de estas tecnologías, y así poder extraer el mineral de interés. El espectro de onda corta ha mostrado buenos resultados en el pasado (Shekwonyadu et al., 2015) en el momento de analizar la composición del mineral de oro y cobre, ambos elementos de interés en el proyecto y en la minería en Chile

3.1.2 XRF/XRT

De la misma manera que NIR, estas tecnologías han mostrado buenos resultados en las pruebas con cobre chileno (Knapp et al., 2014). de algunas minas del norte. Debido a que estos sensores trabajan con radiación potencialmente dañina para el ser humano es que se debe tener en cuenta las regulaciones existentes, las cuales se nombran en la sección de anexos de este documento. Debido al riego para la salud y el consiguiente aumento del costo monetario para cumplir con las regulaciones, es que esta tecnología no resultó factible para el desarrollo del proyecto.

3.1.3 Visión

Esta es la solución más utilizada, debido a su simpleza que permite ahorrar costos en capacitación al momento del desarrollo. Es importante notar que sólo es posible utilizarla si el mineral a extraer tiene contraste con el material no útil.

Normalmente este tipo de sensor es utilizado en conjunto con otros sensores. Un caso es de un tipo de cobre que venía con magnetita, por lo que en primera instancia se separaba la dolerita con magnetita de la carbonatita, luego pasaba por un sensor electromagnético, el cual separaba la magnetita de la dolerita. De esta manera se obtenían dos productos (Seerane & Rech, 2011).

3.2 Acercamiento a la Solución

El proyecto Sorting involucra el desarrollo de una maquinaria capaz de realizar una selección en tiempo real de aquellas rocas que posean una mayor ley de mineral, lo cual se logrará mediante una serie de módulos (alimentador vibratorio, correa transportadora, sistema de visión, procesador de datos, válvulas de aire y chute separador) que preparan el mineral proveniente de las primeras etapas de la concentradora para que pueda ser analizado de forma correcta por un sistema de visión especializado, el cual mediante un algoritmo de visión por computador permitirá que el procesador identifique cuáles de las rocas poseen una mayor ley de mineral para que a continuación sean separadas por un sistema de válvulas de aire o un sistema batch (Akhloufi et al., 2016), generando un producto final con una mayor concentración del mineral deseado. Se escogió esta solución por las características del problema, que nace de un aumento continuo en el uso de recursos para procesar las mismas cantidades de cobre fino a lo largo de los años, y cuya causa es la disminución de las leyes de mineral que se están extrayendo de las minas.

Esto implica que cada día se está volviendo menos eficiente el procesamiento de los minerales, no por la capacidad de las máquinas utilizadas, la cual ha mejorado constantemente, sino porque en el material que está entrando a las máquinas para ser procesado ha disminuido el contenido del mineral que se requiere extraer.

La forma de enfrentar este problema, de manera que efectivamente se reduzcan los costos operacionales de una empresa, es aumentando nuevamente las leyes del mineral que está entrando a las etapas de procesamiento, lo cual se puede lograr sacando de las etapas de procesamiento aquellas rocas que contienen un bajo o nulo contenido del material deseado, generando una reducción del desperdicio de recursos en procesar rocas que no generan ningún valor para la empresa.

El objetivo de este proyecto es generar una aplicación industrial, que funcione a nivel de laboratorio, que sea capaz de identificar la ley de las rocas que pasan por la correa y generar una señal electrónica que le indique a un sistema de separación que saque la roca de la correa si es que ésta posee una baja ley. Debido a estos requerimientos funcionales, y otros requerimientos no funcionales respecto al costo monetario de los materiales del prototipo y de la capacitación necesaria para el desarrollo mismo del proyecto, es que las tecnologías seleccionadas, son las siguientes:

3.2.1 NIR

Se seleccionó debido al bajo riesgo que tiene la tecnología NIR, y por la versatilidad que se puede obtener para identificar diferentes minerales, además de ser una tecnología cuyo uso va en aumento. Existen múltiples investigaciones (Shekwonyadu et al., 2015.Knapp et al., 2014) que dan cuenta de la factibilidad de esta tecnología sobre el cobre, las cuales muestran ser muy prometedoras.

3.2.2 Correa

Se seleccionó debido a los recursos limitados que se tienen para la construcción del prototipo, ya que no es posible implementar el módulo de detección en dos caras del mineral. Por lo que esta alternativa es por defecto la que se utilizará. También presenta ventajas de ser compatible con la tecnología de visión que se eligió, que permitirá el análisis de la superficie de la roca al pasar por la correa.

3.3 Contexto general del prototipo

3.3.1 Prototipo de Laboratorio

El proyecto Sorting tiene por objetivo final la construcción de una maquinaria capaz de integrarse en la línea de proceso de la minería del cobre. Para lograr esto, primero es necesario validar la capacidad de separación de los minerales del proyecto, con un prototipo construido a una escala pequeña. Esto debido a que obligatoriamente se debe detener el funcionamiento de la línea de proceso para instalar la máquina en una planta minera, y dados los volúmenes de minerales que se procesan, es importante para las empresas conocer el tiempo de retorno de sus inversiones. Es por esto que como proyecto de memoria se plantea realizar un prototipo a nivel laboratorio, el cual incluye la mayor parte de las funcionalidades que debiera tener a nivel industrial, incluyendo algunas que no serían necesarias en un ambiente real de funcionamiento, pues de esta manera se puede obtener conocimiento técnico (know-how) para su implementación a una escala mayor.

3.3.2 Recursos Limitados

Para la realización del proyecto se cuenta con recursos de dos fuentes, el CCTVal (Centro Científico Tecnológico de Valparaíso), que es la organización dependiente de la Universidad que patrocina el proyecto, y de la cual se depende para fondos. Y el apoyo monetario por parte del programa de las Memorias Multidisciplinarias. Sin embargo, ya que para el funcionamiento del sistema se debe utilizar necesariamente una cámara multi-espectral, se destinaron gran parte de los fondos disponibles a su adquisición, dejando un margen reducido para el resto de los componentes. Es por esto que al momento de decidir los materiales o componentes a utilizar en la construcción tuvo mayor influencia el valor monetario de éstos.

3.4 Diseño del Prototipo

3.4.1 Arquitectura del Sistema

La figura 2 (Batchelor et al., 2016.) muestra el diagrama general que resume el funcionamiento de los sistemas seleccionadores para la industria minera.

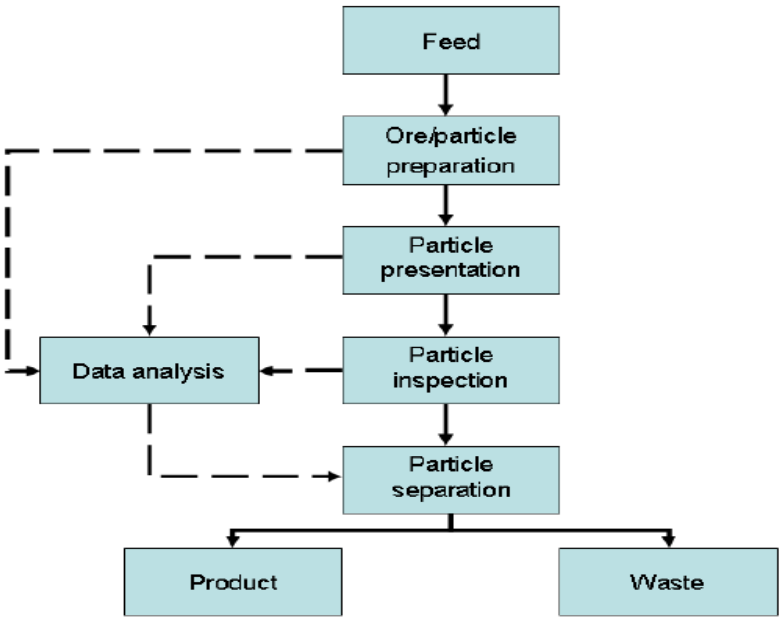

Figura 2: Diagrama General de Funcionamiento de Seleccionadores (Batchelor et al., 2016.)

La idea al construir el prototipo es encontrar una forma para que sea implementado dentro del proceso ya existente en la empresa, en que los materiales extraídos de los yacimientos pasan a la fase de procesamiento donde se extrae el mineral útil.

3.4.2 Diagrama de proceso de materiales

Dado que el producto final tiene como base el procesamiento de materiales, se desarrolló un diagrama (ver Figura 3), el cual permite visualizar cada una de las etapas por las cuales debe pasar el material para ser analizado y seleccionado, separando aquellas etapas relacionadas al área de hardware de las relacionadas con el área de software.

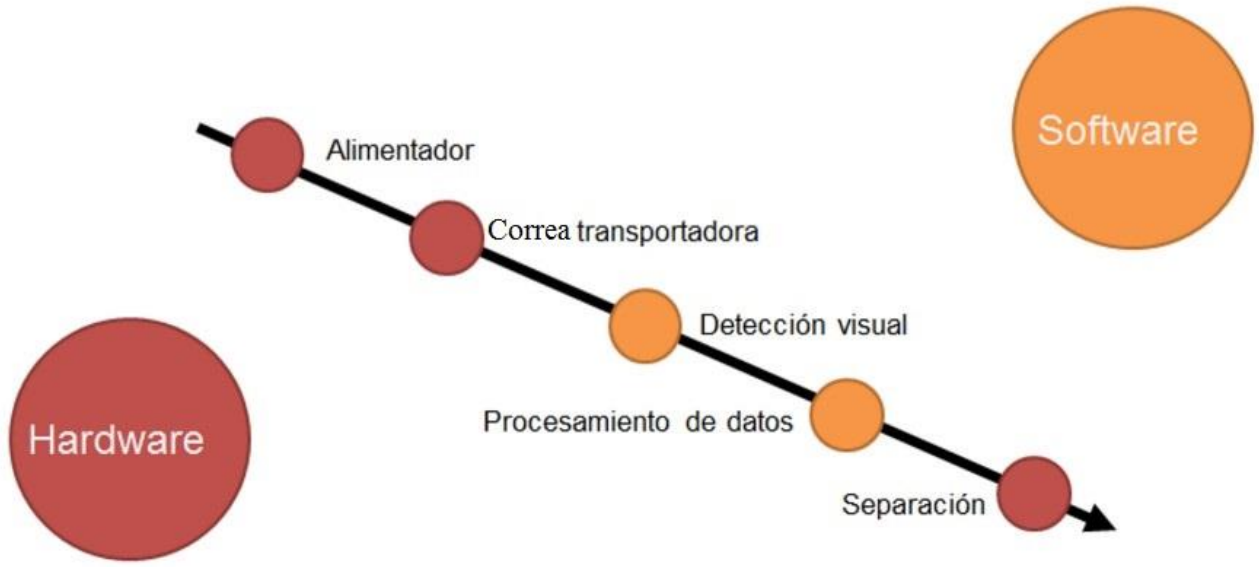

Figura 3: Etapas de Procesamiento

Cada una se las etapas mostradas en este diagrama se relaciona directamente con los módulos que se desarrollarán.

3.4.3 Requisitos específicos

Los requisitos específicos del contexto tienen relación con los flujos de material que se manejan en la industria de la minería, la solución que se desarrollará durante la memoria será capaz de identificar y seleccionar los materiales según su composición química, pero para que ésta pueda ser implementada a nivel industrial, se debe aumentar considerablemente la capacidad del producto en varios aspectos, como lo son: ancho de la correa, velocidad de la correa, área analizada por la cámara, cantidad de válvulas, potencia del alimentador, etc.

Además de los cambios de escala se deben considerar otros componentes cuya utilidad sólo se visualizará al desarrollar la solución a nivel industrial, como por ejemplo el uso de un "encoder" el cual permite registrar de forma exacta la velocidad de la correa en cualquier momento, pues cuando se trabaja con grandes cantidades de material la correa puede cambiar su velocidad y arruinar la sincronización con el sistema de válvulas de aire, impidiendo una correcta separación.

3.4.4 Descripción General de Módulos

Módulo	Función
1. **Alimentador**	Es el lugar por el cual entra el material a analizar, éste debe ser capaz de preparar cada una de las rocas para que sean dispuestas de una forma óptima sobre la banda transportadora de tal modo que se tengan muestras separadas, pero a la vez manteniendo un flujo constante.
2. **Correa transportadora**	Este subsistema se encarga de transportar las muestras debidamente preparadas hacia el subsistema de visión, para lo cual requiere una velocidad a la vez alta y constante, de tal manera que funcionen en forma sincronizada las válvulas de aire que impulsarán las rocas fuera de la línea de producción.
3. **Visión**	Aquí se genera un ambiente altamente controlado, en el cual se encontrará una cámara que sea capaz de detectar las diferencias de composición de los minerales y además de los emisores electromagnéticos (luz visible, infrarroja, rayos X, etc.) que requiera la cámara para trabajar.
4. **Controlador**	Es el vínculo entre todos los componentes electrónicos, el cual permitirá que todos trabajen de manera sincronizada. Su función más importante es hacer que cada vez que la cámara detecte una roca que se quiera sacar de la línea, active el sistema mecánico de separación que la expulsará del flujo.
5. **Separador**	Es la parte final de la máquina en la cual las rocas son mecánicamente separadas según su composición.

Figura 4: Descripción General de Módulos

3.4.5 Diseño de los Módulos

Los objetivos del producto son la identificación y separación de minerales según sus composiciones químicas, es por ello que los módulos que componen la solución responden estas necesidades, ya sea directa o indirectamente.

En primera instancia una correa transportadora entrega un flujo constante de rocas a la máquina de sorting, este flujo al ser concentrado, impide que se puedan analizar todas las rocas presentes, además de dificultar su separación de forma exacta al encontrarse demasiado cercanas unas de otras. Ante este problema nace el primer módulo, llamado “Alimentador”, que se encarga de repartir las rocas en una única capa homogénea, lo cual permite analizarlas individualmente aunque aún están demasiado juntas, es aquí donde la transición al segundo módulo juega un papel fundamental pues por una diferencia en la velocidad a la que se mueve el material se puede mantener la disposición homogénea a la vez que se separan las rocas.

Una vez que se tienen las rocas presentadas de una forma que permita analizarlas y separarlas, son transportadas al módulo de visión (módulo 3), el cual recopila información del espectro infrarrojo que es reflejado por la superficie de las rocas, una vez adquirida esta información, el Controlador (módulo 4) se encarga de procesar la información y determinar de forma aproximada la composición de las rocas, decidiendo automáticamente qué rocas continuarán en la línea de procesos y cuáles serán desviadas. Finalmente está el sistema de separación (módulo 5), el cual al activarse de forma sincronizada es capaz de desviar las rocas de su curso normal. Después de que las rocas sean separadas en distintas trayectorias, se direccionan mecánicamente mediante un Chute el cual entrega el material a sus distintos destinos.

3.5 Desarrollo de la interfaz

3.5.1 Hitos

3.5.1.1 Capacitación inicial

Primero se tenía pensado desarrollar el software de la aplicación en la herramienta Qt (www.qt.io, 1996) para el sistema operativo Linux, pero después de un análisis se cambió a la plataforma Windows y el programa a Visual Studio, ya que Windows y Microsoft ofrecen soporte para aplicaciones industriales, ambiente donde se espera que la aplicación funcione. Con esto decidido, se procedió a descargar una versión para estudiantes de Microsoft Visual Studio 2013, desde Microsoft Imagine, aprovechando el acuerdo que la Universidad Santa María tiene con el programa Dreamspark de Microsoft.

Luego se hizo un proyecto de prueba para familiarizarse con Visual Studio 2013 (Hong K., 2016), consta de una ventana inicial de la aplicación del software con 3 botones para acceder a otras ventanas (Ver Figura 5), las cuales representan las funcionalidades que se espera tenga la aplicación una vez que esté terminada. En aquel momento, las ventanas secundarias representaban un “mockup” no funcional, y no tenían funcionalidades asociadas.

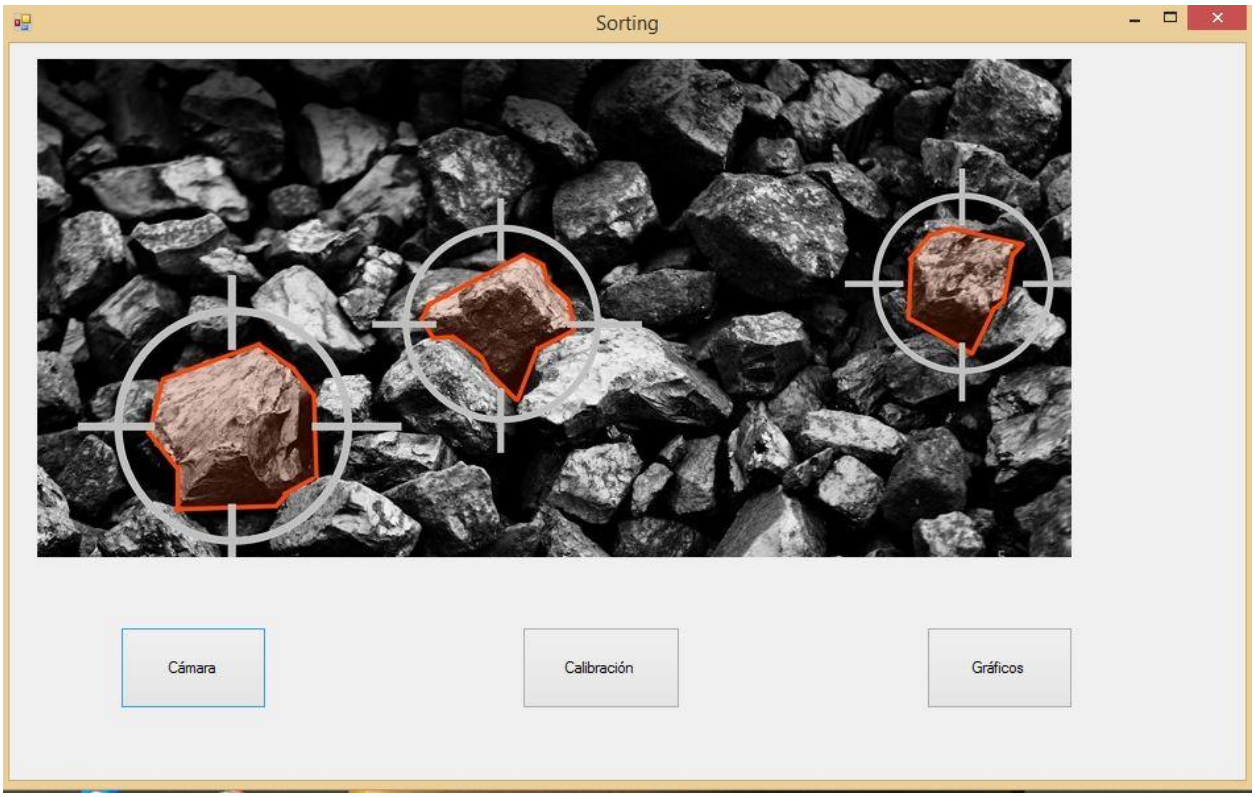

Figura 5: Pantalla principal de la aplicación.

3.5.1.2 Interfaz de Calibración

Después de un análisis, se instaló OpenCV para usar sus funcionalidades en la ampliación de la interfaz de calibración (Shermal Ruwantha, Fernando, 2013). Usando las funciones nativas de Visual Studio (Antariksha Kar, 2014) se creó una funcionalidad en que se puede hacer click con el mouse en cualquier parte de la ventana de calibración, y actualiza la posición en pixeles del cursor, mostrando las coordenadas en dos labels (Ver Figura 6). Luego se agregó a la interfaz una nueva funcionalidad de guardar los puntos que se cliquean en pantalla dentro de una lista de puntos para lograr la calibración.

Tiempo después, habiéndose completado la migración de la interfaz, se agregó a ésta un botón “Calibrar” que aplica la función OpenCV findHomography (Mallick S., 2016) para obtener una matriz de transformación que convierte las coordenadas que se ingresan a las coordenadas de la imagen. Luego se agregó la función de que el botón “Calibrar” se active sólo después que los 4 puntos de asociación estén ingresados.

A continuación se investigó sobre la función de homografía inversa (Math.stackexchange.com, 2016) y su uso apropiado para obtener las coordenadas de los puntos de calibración. Se logró generar la matriz de homografía inversa a partir de la homografía que se genera con el proceso desarrollado anteriormente, con el código inversa=h.inv(); que luego se debió transformar a una matriz de valores del tipo double con el código inversa.convertTo(inversa, CV_64F); para poder hacer las multiplicaciones de matrices. Luego se generaron matrices (double) de 3 filas y 1 columna, donde la primera fila es la coordenada X del primer punto de destino, la segunda fila es la coordenada Y del primer punto de destino, y la tercera fila es el valor fijo 1. Luego se generó una nueva matriz de valores del tipo double que es el producto de la multiplicación de las matrices anteriores (vect = inversa*vec;). A continuación se definió un cv::Point en que la coordenada X es la división de la primera fila por la tercera fila de la matriz producto, y la coordenada Y es la división de la segunda fila por la tercera fila. Este punto es justamente las coordenadas en pixeles del primer punto de calibración. Luego se repitió este proceso para los otros 3 puntos, y se lograron obtener las coordenadas en pixeles correctas para cada punto de calibración. Se espera que este enfoque ayude en el desarrollo de la futura funcionalidad de calcular la posición de las rocas en el tiempo después de que dejan el campo de visión de la cámara, lo cual es necesario para la correcta activación del sistema de separación de la aplicación Sorting.

Para finalizar esta funcionalidad se agregó la característica de que al presionar el botón “Calibrar”, después de calcular la homografía se dibuja un cuadrado rojo sobre los puntos de calibración en la imagen, para que exista una confirmación visual de que el proceso de calibración se realizó correctamente. Esto se hace mediante las funciones de OpenCV line que dibujan una línea en una imagen entre dos puntos que se le ingresan como parámetro, con lo cual invoca la función 4 veces y se le ingresan los puntos de destino de la imagen como parámetro, después de esto se invoca una función especial que transforma la imagen OpenCV a una MFC picture, con lo que el software reemplaza la imagen que se tiene en la interfaz de calibración por la misma imagen con el cuadrado rojo dibujado sobre los puntos de calibración. El resultado final de este desarrollo se muestra en la Figura 6.

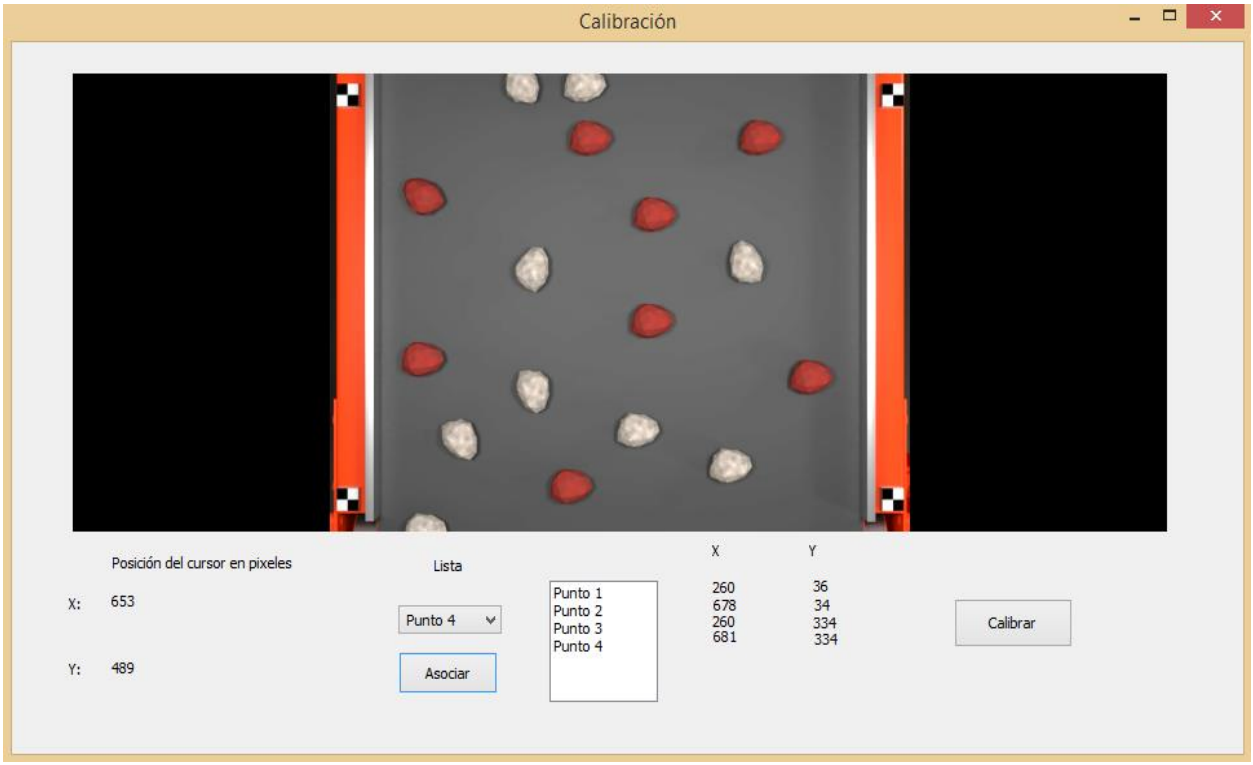

Figura 6: Interfaz de Calibración de la aplicación.

3.5.1.3 Entrada y salida de datos

La siguiente funcionalidad añadida fue la entrada y salida de datos mediante archivos XML. Existen dos clases de archivo XML con las que trabaja el software, una clase que contiene las medidas de la correa, y otra clase donde se guardan las matrices de homografía generadas por el proceso de calibración, y desde donde se pueden recuperar directamente. Para la primera clase, se logró cargar los datos del archivo XML en variables de tipo INT (enteros). Para lograr esto se debió agregar al proyecto la biblioteca pugixml (Kapoulkine Arseny, 2006), que se escogió por la herramienta XPATH, que simplifica enormemente la búsqueda dentro de los archivos XML. También se debió estandarizar la estructura de los archivos XML, para tener las coordenadas X e Y de los puntos dentro de su propio nodo para posibilitar su recolección como variables individuales. Luego, en vez de considerar las coordenadas X e Y como atributos, se debió considerar que dentro de los nodos X e Y sólo existe un valor, por lo que éste se puede acceder directamente y transformarlo a enteros.

A continuación, se logró utilizar los datos recuperados desde el archivo XML en la función de homografía, al definir globalmente un flag booleano que es FALSE por defecto y que se vuelve TRUE si es que se usa el botón de "Cargar XML". Después se agregó una editbox que permite ingresar el nombre del archivo XML a leer, y al leer el archivo XML y cada nodo por separado, transforma los datos de coordenadas X e Y a enteros y los guarda dentro de un arreglo de enteros declarado globalmente, que luego la función de homografía puede acceder para obtener los nuevos puntos de destino. Después se modificó el archivo XML para que tuviera coordenadas diferentes a las usadas por defecto anteriormente, lo cual causó que efectivamente la función de homografía entregara una matriz diferente a la que entregaba al usar los datos originales.

Para la segunda clase de archivos XML, se logró guardar la matriz de homografía generada por la funcionalidad de calibración del software del proyecto Sorting en un archivo XML, usando las herramientas incluidas con las bibliotecas OpenCV, y luego leerla para recuperar la matriz y hacer el proceso de calibración automáticamente. Se debe primero hacer todo el proceso para generar la matriz de homografía, luego se puede usar la editbox de la interfaz de calibración para ingresar el nombre que se quiere tenga el archivo donde se guarda la homografía y luego al presionar el botón "Guardar XML", se utiliza la función de OpenCV FileStorage para generar un archivo XML, donde se puede mostrar la matriz de homografía con el comando fs << "h" << h; donde h es la matriz de homografía generada por el software guardada como variable global. En este archivo XML están listadas las características de la matriz OpenCV y luego sus datos en notación científica. A continuación se arregló para que el botón de guardar XML esté desactivado hasta que se genere una homografía al menos una vez con las funcionalidades de la calibración.

El siguiente paso fue adaptar la funcionalidad de "Cargar XML” para que pudiera leer los archivos generados por "Guardar XML" y guardar la matriz de homografía de los archivos en una variable global que puede ser usada por la aplicación para otros propósitos.

Finalmente también se agregó la opción para que pueda reconocer los archivos XML que contienen medidas de los que sólo contienen la homografía, para que si son archivos XML de medidas, pueda hacer las funcionalidades desarrolladas anteriormente, y si son archivos XML de homografía, pueda ejecutar esta funcionalidad. Los resultados de esta funcionalidad se pueden apreciar en las figuras 7 y 8.

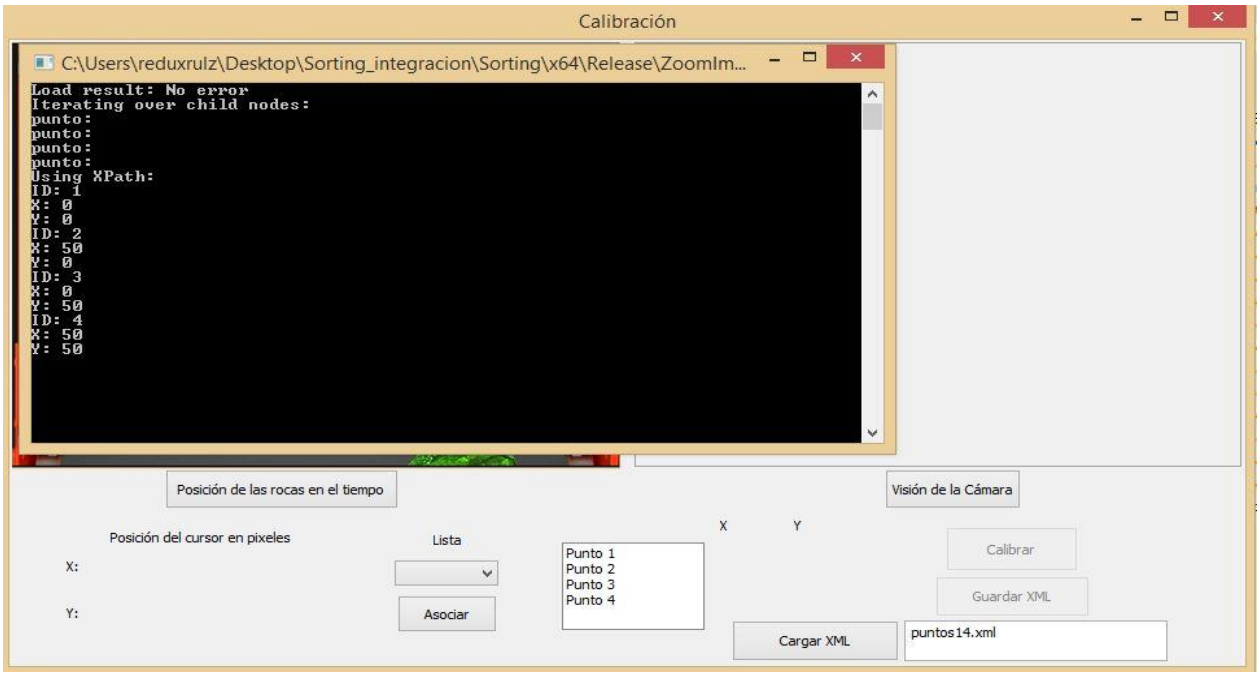

Figura 7: Lectura de archivo xml de medidas.

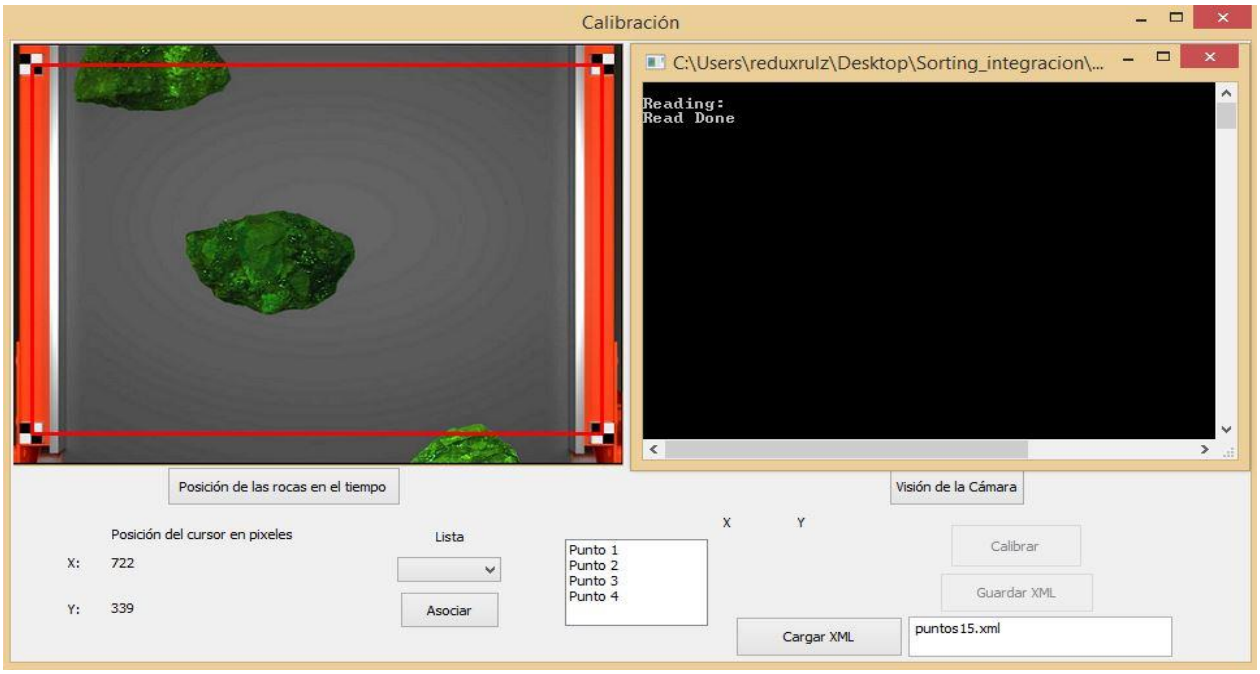

Figura 8: Lectura de archivo xml de homografía.

3.5.1.4 Calibración de Imágenes RGB y NIR

Las siguiente funcionalidad de la calibración es verificar, pixel a pixel, si las imágenes recibidas por la cámara, la RGB (3 canales) y la NIR (1 canal) son iguales, ya que si coinciden sólo se necesitará hacer una sola calibración, y si no lo son se deberá desarrollar una funcionalidad para calibrar individualmente cada imagen. Se logró comparar pixel a pixel las imágenes que se sacaron anteriormente con la cámara, con las funcionalidades hechas por los encargados del procesamiento de datos. Primero se leyeron las imágenes desde la ruta donde estaban guardadas con la función cv::imread, luego se descubrió que esta función siempre lee las imágenes en 3 canales, por lo que no fue posible compararlas directamente ya que ambas matrices tenían un número distinto de filas. Eventualmente se decidió transformar ambas matrices a escala de grises después de leerlas (cvtColor(mat1, temporal1, CV_BGR2GRAY);).

Ya con este arreglo fue posible comparar las imágenes pixel a pixel utilizando dos métodos. Primero un XOR (Or exclusivo) bit a bit de las imágenes, de manera que si los bits de las imágenes eran iguales, se crearía una matriz de sólo ceros (bitwise_xor(temporal1, temporal2, destino);). El segundo método fue restar directamente las matrices, de manera de que si cada par de bits eran iguales daría como resultado una matriz de sólo ceros (destino = temporal1 - temporal2;). En ambos casos, y probando con distintos pares de imágenes de las que se sacaron anteriormente, dio como resultado una matriz de sólo ceros, por lo que se llegó a la conclusión de que la cámara captura la misma imagen independiente de si se usa el modo RGB o el modo NIR, por lo que sólo se necesita un proceso de calibración para calibrar la cámara en vez de dos. El resultado de esta funcionalidad se puede apreciar en la figura 9.

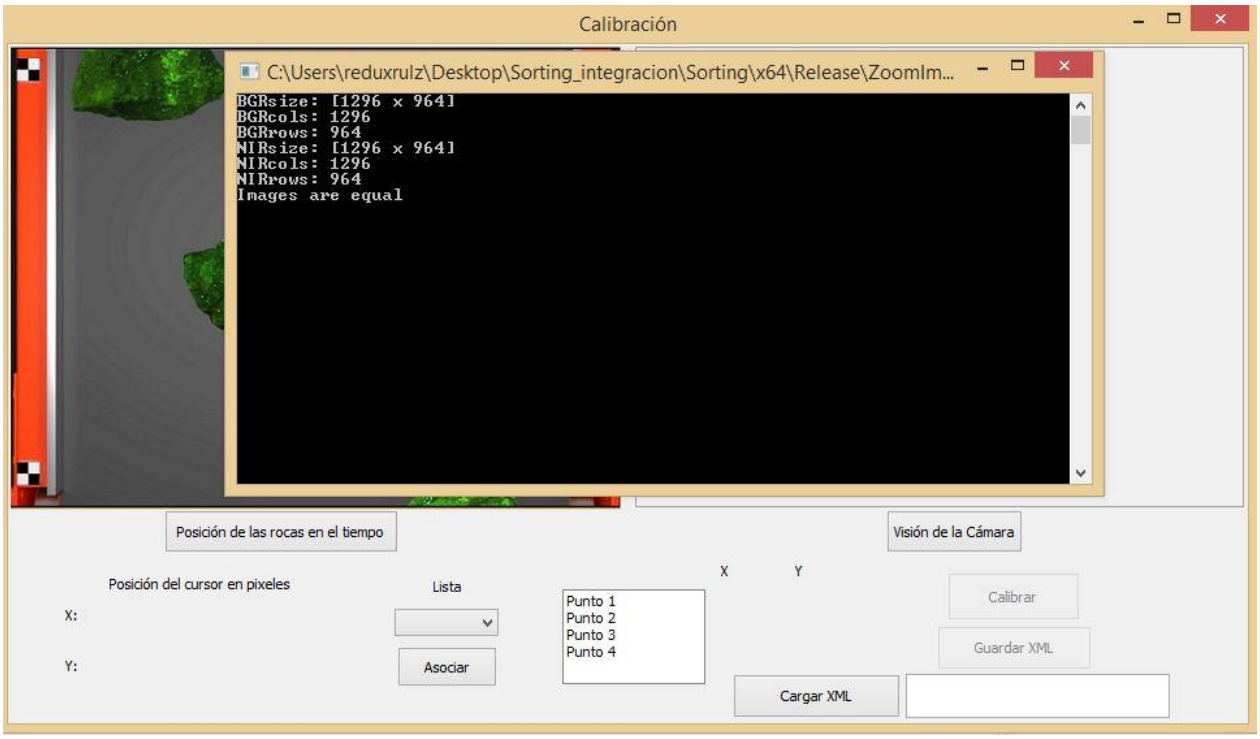

Figura 9: Comparación imágenes RGB y NIR.

3.5.1.5 Posición de las rocas en el tiempo

Para concluir la funcionalidad de la calibración, se debe usar la homografía que se calcula con las funcionalidades ya realizadas, y multiplicarlas por el centroide de una roca para obtener un vector con la posición de la roca en el tiempo después de que deja el rango de visión de la cámara, para poder generar una señal electrónica y que el sistema separador mecánico de la aplicación pueda remover la roca del flujo de minerales si es que tiene baja ley. En preparación para desarrollar esta funcionalidad se agregaron en la carpeta de imágenes una nueva simulación que se hizo esta vez con rocas con colores más "realistas", que se mueven más lento por la correa, y por donde pasan menos rocas a través de la correa de las que habían en la primera simulación.

De esta nueva simulación, se sacó una nueva imagen para trabajar con las funciones de la ventana de calibración. Luego se rediseñó el dialog para que los botones de "visión de la cámara" y de "ventana de calibración", que ahora se renombró a "posición de las rocas en el tiempo", estuvieran debajo de las respectivas ventanas donde se realizan sus funcionalidades.

Además de esto, se tomaron de nuevo las imágenes fijas de ambas simulaciones, esta vez sin el borde negro que se muestra al tener maximizada las simulaciones en Windows Media, para que no afecte al tomar la homografía, y se agregaron estas imágenes al proyecto como imágenes BMP, ajustando el dialog de la calibración de nuevo para adaptarse al nuevo tamaño de las imágenes. A continuación se cambiaron las posiciones del resto de los objetos en el dialog para que fuera amigable con los otros cambios en diseño que se hicieron, todo esto mediante el archivo de recursos como código, ya que el modificar el dialog directamente aún no se puede debido a que el programa se congela al tratar de abrir el archivo de recursos como GUI.

Finalmente se hizo un nuevo archivo de medidas con las coordenadas de la nueva ventana, con la ya mencionada función de mostrar en consola las coordenadas en pixeles de la imagen en una ventana OpenCV cuando se hace click en pantalla con el mouse, y se sacó una nueva homografía que se guardó en un nuevo archivo de homografía, y que luego se usó para generar el cuadrado rojo para asegurarse de que la funcionalidad de Calibrar funciona correctamente con todos los cambios que se hicieron. El nuevo aspecto de la interfaz de calibración, resultado de todos estos preparativos, se muestra en la figura 10.

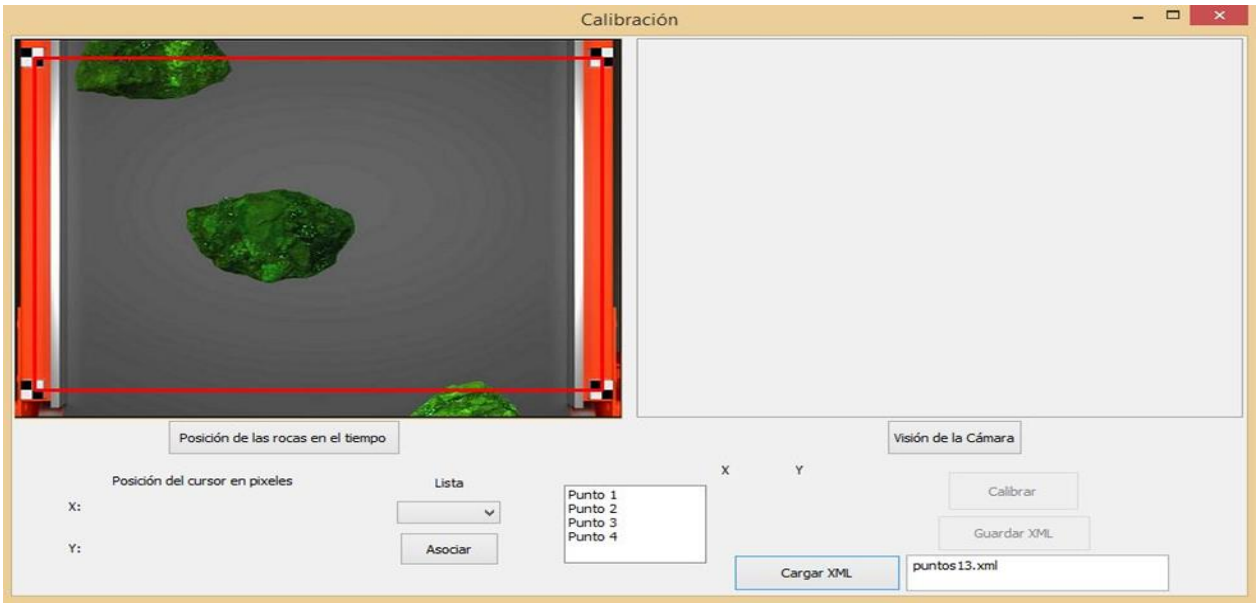

Figura 10: Interfaz de Calibración con funcionalidades adicionales.

Ya con todas estas preparaciones se estudió cómo aplicar a la simulación la función OpenCV createBackgroundSubtractorMOG2 para extraer el fondo de la nueva simulación con rocas realistas. La idea era remover de la simulación la correa transportadora, que es un fondo estático, y quedarse sólo con las rocas que se mueven sobre un fondo negro, y así la identificación de los centroides será mucho más fácil. La dificultad más importante que se presentó fue que el software no podía acceder a la simulación para modificarla con las herramientas de OpenCV.

Eventualmente se descubrió que una de las excentricidades de la versión 3.0 de OpenCV es que se debía copiar el archivo opencv_ffmpeg300_64.dll en la carpeta donde está el archivo del proyecto ZoomImageDisplaySample.vcxproj para que el programa lo leyera como entrada, parecido a lo que se hizo anteriormente al integrar el software, con lo que se logró acceder finalmente a la simulación.

Ya con esto se logró aplicar la función createBackgroundSubtractorMOG2 con los parámetros que habían determinado los encargados del procesamiento de datos anteriormente, para extraer la correa de fondo de la simulación, y crear dos nuevas simulaciones donde pasan las rocas realistas a través de un fondo negro, y otra en blanco y negro donde pasan la silueta blanca de las rocas sobre el fondo negro.

El siguiente paso fue encontrar una forma eficiente de aplicar la función OpenCV connectedComponentsWithStats sobre la simulación de las siluetas blancas de las rocas pasando sobre un fondo negro. Se decidió presionar una tecla para detener la simulación y calcular los centroides de las rocas que se muestran en el frame en ese momento. Esto era parecido a un avance que se había hecho mucho tiempo atrás durante el primer desarrollo de la funcionalidad para mostrar las coordenadas en pixeles del punto de la pantalla en donde se hace click con el mouse, pero que eventualmente no se utilizó, como aquel código estaba respaldado, se pudo buscar en el respaldo y reusarlo aquí.

Gracias a esto se logró detener la simulación al presionar Enter y aplicar el código que se tenía anteriormente de la función connectedComponentsWithStats, y mostró en consola los centroides de las rocas actualmente en el frame, junto a un centroide más, que luego se determinó pertenecía al mismo fondo negro de la imagen como primer objeto detectado.

Posteriormente se determinó que multiplicar la homografía por los centroides directamente no era viable debido a que no eran matrices del mismo tamaño, entonces se construyó una nueva Mat fv de 3x1 donde se ingresaban las coordenadas X e Y de los centroides en las primeras 2 filas, y se asignaba el valor 1 en la tercera fila. Luego y sabiendo que las variables nlabels que obtiene la función connectedComponentsWithStats son uno más de las siluetas de rocas blancas en pantalla, debido a que el primer objeto es el fondo negro, se construyó un loop for con el contador que va desde el nlabel 1, para omitir el fondo, hasta la cantidad de nlabels total calculada por la función connectedComponentsWithStats, donde en cada iteración se va construyendo el vector fv asignando las coordenadas del centroide actual a las primeras 2 filas y rellenando la tercera fila con el valor 1, y luego multiplica la matriz de homografía h, obtenida de un archivo XML generado anteriormente, por el vector fv, para obtener una Mat fm con la posición en el tiempo t+1 del centroide de la roca, para luego desplegar toda esta información por consola.

A continuación se investigó cómo incluir las ventanas OpenCV que se generan por la funcionalidad dentro de las ventanas MFC de la interfaz de calibración, pero debido a que son simulaciones en movimiento, no fue tan fácil de hacer como con la funcionalidad de las líneas rojas, así que se optó por mostrar automáticamente las ventanas OpenCV, al momento en que estas se generan, en las posiciones de la pantalla que están reservadas para las imágenes, para esto se utilizó la función movewindow y se calcularon sus parámetros mediante ensayo y error. El resultado final del desarrollo se muestra en la figura 11.

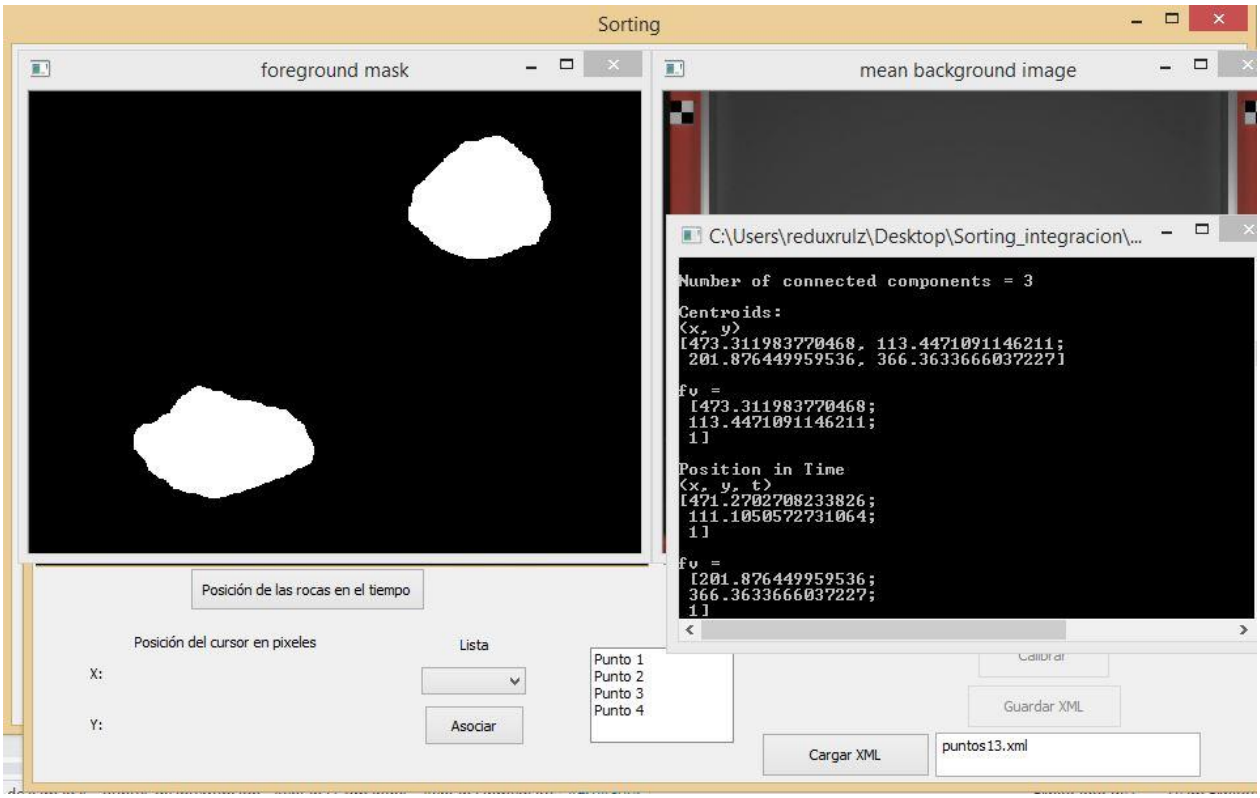

Figura 11: Funcionalidad de calcular la posición en el tiempo de las rocas.

3.5.2 Dificultades

3.5.2.1 Migración de la interfaz

Surgió el problema de que la integración de la interfaz con el resto del software de la aplicación resultó más difícil de lo que se esperaba, debido a que los proyectos Visual Studio de la cámara y de la interfaz eran incompatibles. Por ello debió poner en espera el desarrollo continuo de la interfaz de la aplicación, y reconstruir la interfaz dentro del proyecto Visual Studio que venía incluido con la compra de la cámara. Esto significó crear 2 nuevos dialogs dentro del proyecto ZoomImageDisplaySample.rc, uno para que sirviera como pantalla principal de la aplicación y otro para la funcionalidad de la calibración.

Más adelante, el equipo de trabajo encargado del procesamiento de datos agregó otro dialog para contener sus funcionalidades, y así los desarrollos de software no interfirieran entre sí. El siguiente paso fue rehacer las funcionalidades que se habían hecho dentro del proyecto Windows Forms dentro del dialog Calibración. Esta migración de funcionalidades también demoró más tiempo del esperado, pues se debió realizar con herramientas de programación de más bajo nivel (Functionx.com, 2015), y por lo tanto más difíciles de utilizar al ser más cercanas al lenguaje máquina, que las que se usaron para construir la primera interfaz (uso de MFC en el proyecto de la cámara versus uso de Windows Forms en la primera interfaz).

Tras terminar la reconstrucción de la interfaz, se integró la interfaz reconstruida en MFC con el resto de las funcionalidades desarrolladas por el equipo de trabajo encargado del procesamiento de datos. Esto significó clonar el proyecto Git (Gitlab.com, 2011) donde se habían subido los avances en el procesamiento de datos del proyecto, aplicar los cambios directamente sobre el código, agregar componentes, variables de objeto y hacer debugging. Finalmente, se subió el proyecto integrado hacia la rama “Development” del proyecto. La figura 12 muestra las semejanzas de las interfaces a pesar de que la programación de ambas es muy diferente.

Figura 12: Pantallas principales de la aplicación en Windows Forms y en MFC

3.5.2.2 Manejo de dialogs sin interfaz gráfica

Luego se arregló un bug que surgió inesperadamente por razones desconocidas. "RC2108: expected numerical dialog constant". Impedía compilar el proyecto, y debido a esto cualquier otro avance. La solución (Microsoft.com, 2013) fue editar el resource file ZoomImageDisplaySample.rc, abriéndolo como archivo de texto y editar manualmente el código que causa los problemas.

Para abrir el archivo en formato de texto, se debe hacer Archivo->Abrir->Archivo->seleccionar el archivo ZoomImageDisplaySample.rc desde donde esté guardado en la carpeta del proyecto->Abrir con...->Editor de código fuente de C++. Había 3 líneas dentro del resource file que causaban problemas. Dentro de IDD_INICIO, estaba la línea que definía la foto que se usa en la pantalla de inicio. Luego en IDD_CALIBRACION había dos líneas problemáticas que definían las 2 fotos que se usaban, la imagen en formato NIR y la imagen en formato RGB. Esto permitió solucionar el problema de compilación inmediato, pero causó que el programa visual studio se congelara cada vez que se necesitaba abrir la interfaz gráfica de los dialogs para modificar algo, por lo que se prefirió usar el archivo de recursos como código c++ cuando se necesitara modificar el aspecto de los dialogs. Este bug persistió en el proyecto durante un largo tiempo, al punto en que se empezaron a modificar los dialogs sin usar la interfaz gráfica, trabajando sólo con el archivo de código. También este bug luego causaría que los encargados del procesamiento de datos desarrollaran sus funcionalidades sin una interfaz para usuario, lo cual extendió el tiempo de desarrollo del proyecto al momento de la integración final del software. La figura 13 muestra las dos modalidades de desarrollo.

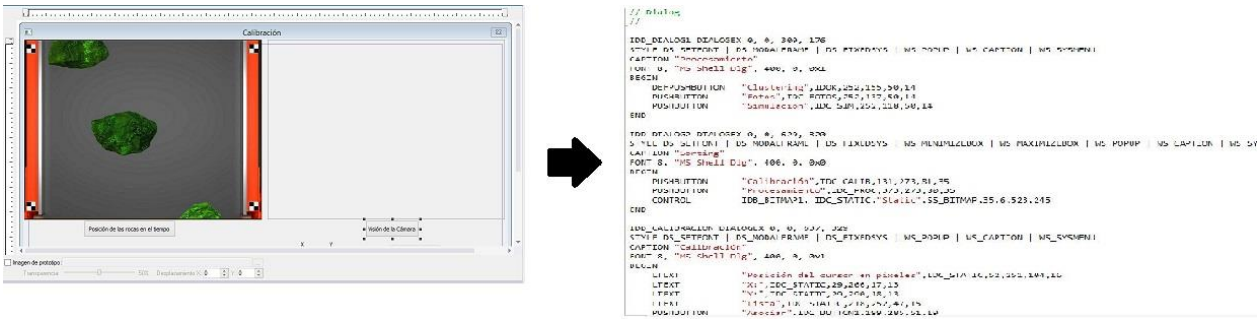

Figura 13: GUI de dialogs y Archivo RC

3.5.2.3 Integración preliminar

Debido a que la versión de OpenCV con la que se trabajaba no tenía las funcionalidades adecuadas para obtener los resultados que se buscaban, es que el equipo de trabajo encargado del procesamiento de datos decidió usar una versión más avanzada de OpenCV, cambiando de la versión 2.4 a la versión 3.0, por lo que nuevamente se debió migrar el software, reconstruyendo la interfaz de calibración dentro del proyecto realizado por ellos. Esta vez el proceso fue más expedito, pero de igual forma surgieron dificultades inesperadas, cómo la que se explicó anteriormente en que, al tratar de abrir el archivo de recursos ZoomImageDisplaySample.rc con la interfaz gráfica de Visual Studio, el programa se congelaba y era necesario reiniciarlo.

A pesar de esto, se pudo seguir avanzando en la integración al abrir el archivo de recursos como código con un editor de texto de C++, y copiar las líneas de código de una copia del proyecto allí para obtener la interfaz que se buscaba. Sin embargo algunas funcionalidades no se pudieron copiar directamente. Luego se descubrió que era debido a que los componentes que se necesitaban no habían sido definidos dentro del archivo Resource.h del proyecto, así que se abrió el archivo Resource.h de la copia del proyecto con la que se trabajó hasta antes de iniciar la integración, y se copiaron las líneas de los recursos faltantes en el archivo del proyecto del software integrado.

Estas fueron IDB_FOTO2, IDC_EDIT2, IDC_BUTTON5, IDC_PICTURE, IDC_BUTTON6 .Ya con esto se pudo copiar en el archivo de recursos todos los componentes que faltaban del dialog de la calibración, y quedó la interfaz de la calibración en el proyecto de software integrado igual a la interfaz de calibración que se había desarrollado en la versión anterior del proyecto. Sin embargo algunas funcionalidades aún estaban incompletas. Para arreglar la función de homografía se debió modificar ligeramente sus argumentos de entrada al convertirlos en cv::Mat antes de pasarlos a la función findHomography. Para arreglar la función de cargar archivos XML, se debió agregar los archivos que venían con la biblioteca pugixml.cpp y pugixml.hpp en los source y header files del proyecto respectivamente para solucionar los errores de vinculación, y se debió modificar el formato del archivo XML de medidas, de manera que el nombre del nodo raíz no sea igual al que se le pasa como argumento en el programa para diferenciar los archivos de medidas de los de homografía. Ya con esto se llegó a la funcionalidad que se tenía en la interfaz de calibración hasta antes de comenzar la nueva integración.

3.5.2.4 Correcciones a la funcionalidad de calcular la posición de las rocas en el tiempo

La siguiente dificultad surgió durante una reunión con los profesores que supervisan el proyecto para aclarar algunas dudas que surgieron respecto de las últimas funcionalidades.

Primero se determinó que la homografía debe transformar de coordenadas en pixeles a coordenadas en centímetros, no de coordenadas en pixeles a coordenadas en pixeles como se hacía, por esto los puntos de destino de la homografía deben hacerse con el marco de referencia en centímetros que se definió por conveniencia [(0,0);(0,50);(50,0);(50,50)].

La funcionalidad de dibujar el cuadro rojo sí se puede hacer con las coordenadas en pixeles de la ventana OpenCV. Luego se definió que el multiplicar la homografía con el centroide de la roca actual (h*(xim,yim,1)) da un vector con coordenadas en un marco referencial (xw,yw,w), y w puede de hecho ser 1, debido a las características del proyecto. Luego se usan las transformaciones X=xw/w, Y=yw/w, para obtener las coordenadas en centímetros de la roca en la correa. El resultado que se debe obtener al final es el vector de coordenadas en el tiempo (X,Y,t), t=timestamp cuando se sacó el frame de la roca, por lo que se tiene el centroide en centímetros con el tiempo cuando se sacó el frame respecto del inicio de la simulación, la posición de la roca en un tiempo t+delta no se calcula en esta parte del desarrollo. También se definió que la velocidad de la correa no se incluirá en esta parte del desarrollo, y que no se debe detener la simulación para obtener las centroides de las rocas, se deben obtener los centroides de las 35 rocas presentes en la simulación.

Avanzando en las correcciones a esta funcionalidad, se logró agregar la timestamp del frame actual de la simulación de siluetas de rocas blancas pasando sobre el fondo negro como dato al vector de resultados final.

El código fue simplemente definir la timestamp con las funciones de OpenCV (long stamp = cap.get(CV_CAP_PROP_POS_MSEC);), y luego agregarla al vector de resultados que se genera al final (fr.at<double>(2, 0) = stamp / 1000;), convirtiéndola a segundos primero, ya que la función de OpenCV la genera en milisegundos.

El siguiente paso fue calcular automáticamente la posición de todas las rocas de la simulación sin necesidad de detener ésta con la interacción del usuario al presionar la tecla enter. Primero se copió el código de la funcionalidad desarrollada por los encargados del procesamiento de datos para sacar el histograma de cada roca en una simulación de rocas realistas que pasa frame por frame, en el dialog de la calibración. El objetivo era tener la funcionalidad de abrir la simulación e irla pasando frame por frame, y que cuando la roca llegue hasta el fondo de la correa muestra un mensaje en consola diciendo que aquí deberían ir las funcionalidades de calcular la posición de las rocas en el tiempo. Luego de lograr esto, se determinó que con la función que se agregó a la interfaz de calibración, se podía agregar en uno de sus bucles iteradores el código que ya se había desarrollado para calcular la posición de las rocas a partir de la simulación de las rocas blancas pasando por un fondo negro. Ya con esto se logró determinar la posición de las rocas en cada frame, después de que aparece la primera roca, así que las marcas de tiempo empezarían desde el segundo 1.2 aproximadamente, y mostrar estos resultados por consola.

Luego se avanzó en mostrar los resultados obtenidos por esta funcionalidad a través de la interfaz de calibración. Se realizó un primer bosquejo de la muestra de los resultados de la posición de las rocas en el tiempo. En este se agregaron labels de texto estático indicando el número de la roca en la simulación, su posición X e Y en centímetros, y la timestamp en segundos. Luego se agregaron 3 labels de texto estático donde se mostrarán la posición X e Y del centroide de la roca más la marca de tiempo en segundos. Para esto se usó un código parecido al que se usó en la funcionalidad de mostrar las coordenadas en pixeles de un punto de la interfaz de calibración cuando se hace click izquierdo con el mouse.

Se definieron las variables que están vinculadas al recurso generado por el label de texto estático (CWnd *label26 = GetDlgItem(IDC_STATIC26);), luego se definieron variables Cstring para cada nuevo label (Cstring sx), y luego se usó la función Format para transformar de las variables de tipo Double donde están guardados los resultado generados por la función para calcular la posición de las rocas en el tiempo a variables de tipo Cstring(sx.Format(_T("%f"), w.x);), el %f era porque las variables son de tipo Double, y no tipo Int como antes. Ya con esto, y después de arreglar el bug del archivo de recursos de nuevo, se logró compilar el programa, cargar la homogafía, correr la funcionalidad de calcular la posición de las rocas en el tiempo, y esto resultó en que se corriera la simulación, y cuando empezó a calcular la posición de las rocas, se actualizara automáticamente la posición en centímetros del centroide de la primera roca con la marca de tiempo en que se tomó en la interfaz de calibración. Luego se mejoró la muestra de los centroides y el timestamp que se había hecho anteriormente, pues se mostraban las coordenadas con muchos dígitos, lo cual hacía menos amigable la interfaz, así que cambió en la función Format de ("%f") a ("%g"), con lo que efectivamente acotó las coordenadas, y se mostraron en la interfaz números más pequeños.

Luego se amplió la muestra de centroides de rocas en la interfaz, usando el mismo método que se usó anteriormente, creando labels de texto estático y definiendo Cstrings donde se usa la función Format para convertir las variables del software en strings que se muestran en la interfaz. Esto también presentó dificultades ya que no se podía ajustar para que las coordenadas de los centroides de las rocas se mostrarán correctamente en los labels estáticos de la interfaz. Si bien se logró alguna mejora definiendo que el código que las variables de los nuevos labels estáticos estuvieran dentro de ifs que dependen del contador de los nlabels, se determinó que el principal error es debido a que la función bounding box de los encargados del procesamiento de datos detecta ruido en las imágenes además de las rocas, así que futuros desarrollos en esta funcionalidad quedaron en espera hasta que se mejore la precisión en la detección de las rocas.

Luego se usó la función del procesamiento de datos paintRectangulos como base para construir la función paintNumeros, que dibuja un número en las rocas que pasan por la simulación, los cuales disminuyen una vez que una roca deja el rango de visión de la cámara. Se copió el código de la función paintRectangulos en la clase de la interfaz de calibración, y luego se agregó a esta función, la función opencv puttext que dibuja un string sobre una imagen en un point que se le pase como argumento. Así que sabiendo que la función paintRectangulos tiene como argumento un vector de rect bbox, el cual recorre iterativamente en un bucle for y en el cual la función para dibujar rectángulos cv::rectangle llama al rect actual con el código it->second, se sacó el centroide del rect actual con el código cv::Point center_of_rect = (it->second.br() + it->second.tl())*0.5;, y luego se invocó la función puttext usando este centroide como argumento cv::putText(img, str, center_of_rect, FONT_HERSHEY_PLAIN, 2, Scalar(0, 0, 255, 255));, donde str es el número de la roca el cual aumenta en cada iteración del for, el cual se agregó como paso iterativo dentro del bucle for: for(it = bboxes.begin(); it != it_end; it++, count++) sprintf(str, "%d", count);. Ya con esto se llamó a la función paintNumeros con el código paintNumeros(img, bboxes); y al abrir la simulación dibuja un cuadro rojo que rodea las rocas que pasan por la correa y también dibuja un número sobre el centroide de este cuadro rojo, el cual depende de cuantas rocas haya en la imagen.

Luego se hizo más precisa la detección de rocas, eliminando algo del ruido de la imagen. El primer paso fue agregar una función que se había usado en la versión anterior de la funcionalidad, GaussianBlur(fg, fg, cv::Size(11, 11), 3.5, 3.5); esto permitió eliminar la mayor parte de la interferencia del ruido dentro de la imagen. Luego se agregaron dos funciones opencv de morfología para eliminar aún más ruido: Erode y Dilute. La idea era usar una combinación de estas funciones para mejorar la imagen antes de aplicar la función GaussianBlur. Se probó con varias combinaciones de estas funciones para mejorar la imagen antes de la detección, pero no se llegó a una detección óptima en toda la simulación. Finalmente, la combinación de estas funciones quedó en 2 dilates, seguido por 4 erodes, seguido por 2 dilates de nuevo.

Gracias a esto se determinó que pasado los 6.5 segundos de la simulación, se elimina el cuadro que queda en la imagen después de que se detecta la primera piedra y gracias a esto se comienzan a detectar correctamente las rocas y a mostrar correctamente los resultados en los labels de la interfaz, en los cuales se agregaron 3 ifs, 1 para cada roca, para que contuvieron el código de mostrar las coordenadas de cada roca en cada par de labels.

También se hizo que la simulación apareciera al lado de la interfaz donde se muestran los resultados, reutilizando un método que se había usado antes para mover las ventanas opencv, usando las funciones cv::resizeWindow y cv::moveWindow, y como se cambió el tamaño de la imagen, también se debieron agrandar los números de la función paintNumeros, agrandando la escala del texto y el grosor de la línea, para que se apreciaran en la pantalla y se pudieran asociar visualmente a los resultados que se muestran en la interfaz. Después se arregló un error en que no se borraban las coordenadas de la roca 3 si es que sólo había 2 rocas en la correa. Simplemente había que poner un if dentro del if del contador que contiene el código para mostrar las coordenadas de la segunda roca, y si este contador es igual a nlabels, es decir, sólo hay dos rocas en la visión de la cámara, se ponen las labels que muestran las coordenadas de la roca 3 para que muestren el string "---". Esto se hizo con el código: (label27->SetWindowText(_T("---"));).

Después se intentó adelantar la simulación manualmente en frames para eliminar los errores de detección que ocurren en los primeros 6 segundos de la simulación. Se logró adelantar la simulación en frames hasta el segundo 6.5 con el código vid.set(CV_CAP_PROP_POS_FRAMES, 156); pero de igual forma al empezar a correr la simulación desde este punto detectó mal las rocas que habían en pantalla, dejando su figura en pantalla después que estas habían salido de la visión de la correa.

De cualquier forma se dejó corriendo esta simulación para ver lo que pasaba, y se comprobó que las figuras de las rocas detectadas primero desaparecían después de 6 segundos aproximadamente y empezaba a detectar las rocas correctamente, por lo que se comprobó que es una característica del sistema de detección de rocas que desarrollaron los encargados del procesamiento de datos, y que fue reutilizado para esta funcionalidad, así que en vez de modificarlo, simplemente se dejó como estaba con la simulación desde el principio y se hizo que, ya que detecta una roca al inicio y la sigue detectando hasta el segundo 6.4, se pusieran las coordenadas de las rocas que salen durante este primer intervalo en las labels reservadas para las coordenadas de las rocas 2 y 3, ya que así salen numeradas en la simulación con las funciones que se han desarrollado.

La figura 14 muestra la funcionalidad de calcular la posición de las rocas en el tiempo con los resultados que genera, después de las correcciones que se hicieron.

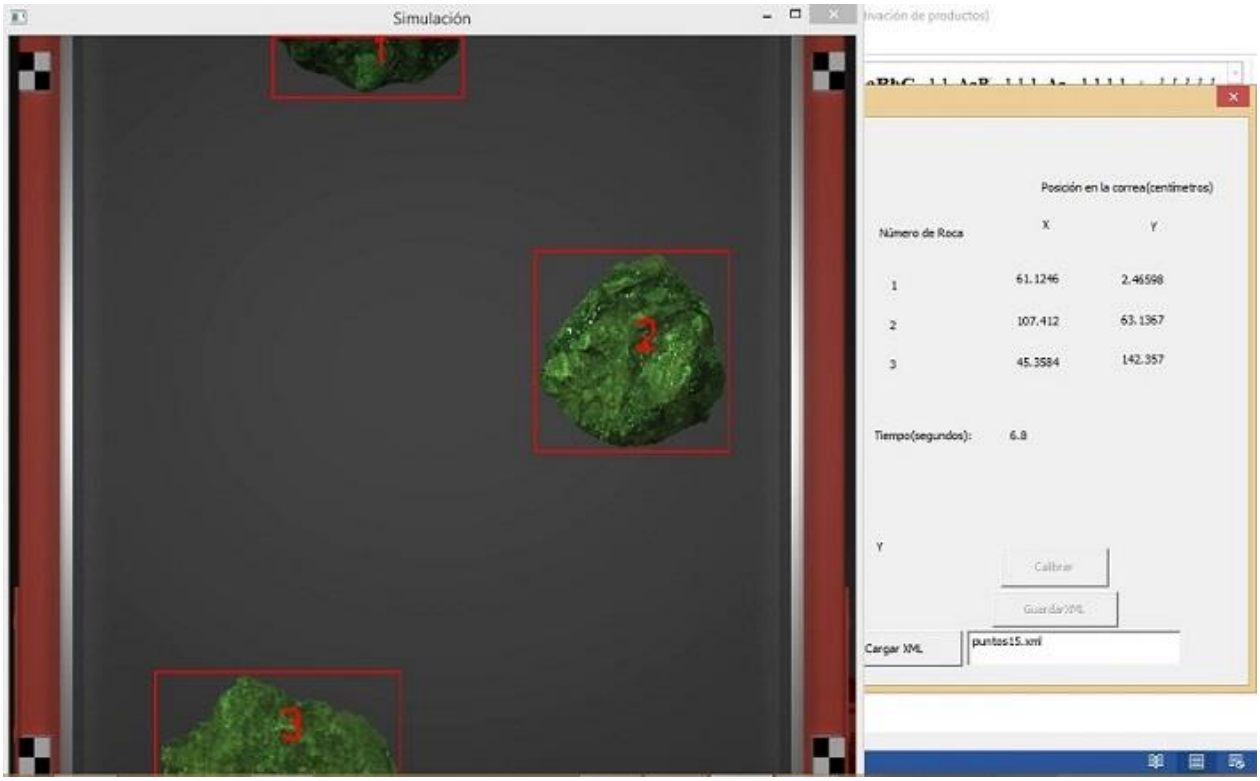

Figura 14: Funcionalidad de calcular la posición de las rocas en el tiempo con muestra de sus resultados a través de la interfaz de calibración.

3.5.2.5 Integración final del software

Debido al bug con el archivo de recursos, los encargados de procesamiento de datos terminaron desarrollando sus funcionalidades sin una interfaz de usuario. Esto significó que se debería integrar la interfaz sobre 3 proyectos que tenían una modalidad diferente, pues estos eran Console Application, diferentes a las Windows Application que se habían utilizado en el pasado.

El primer paso fue cambiar el primer proyecto de los encargados del procesamiento de datos, que ejecutaba la funcionalidad de "clustering", desde Console Application a Windows Application usando las herramientas de visual studio, lo cual también implicó cambiar la función principal desde _tmain a wWinMain. Luego se agregó un nuevo dialog a los recursos y se copió el código de la funcionalidad clustering dentro de uno de los botones que por defecto trae el dialog al ser creado con el asistente, los cuales son OK y CANCEL. Después se investigó sobre cómo abrir un dialog desde la función winmain y se logró usando un tutorial de visual studio 2008, donde se define dentro del mismo archivo cpp la función DialogProc que define las funciones del dialog que luego se llama desde la función winmain con la función CreateDialogParam(hInst, MAKEINTRESOURCE(IDD_DIALOG1), 0, DialogProc, 0);. Ya con esto se logró abrir el dialog creado recientemente al iniciar la ahora Windows Application.

A continuación se buscó la forma de ejecutar la funcionalidad de clustering desde el dialog. Se probó copiando el código de la antigua función _tmain directamente dentro del botón OK, que luego se comprobó puede cambiarse por cualquier botón al crearlo en la interfaz gráfica del dialog. También había que cambiar algunas inicializaciones de variables que no se podían hacer dentro del case donde están las funcionalidades de las ventanas del dialog, así que hubo que hacerlas al principio de la función DialogProc. Luego de esto se hizo otro dialog que se asemeja a la ventana de inicio del software Sorting que se había desarrollado antes de la integración, se logró el copiar el aspecto y los botones.

Después se logró abrir un dialog a partir de otro dialog y que lea las funcionalidades desde otro archivo cpp. Primero se cambió la inicialización de la Windows Application al cambiar el código en la función wWinMain para que dependiera de la función más general de inicialización InitInstance, y dentro de esta se definió que abriera el dialog que se asemeja a la ventana de inicio del software Sorting que se había desarrollado anteriormente, mediante la función DoModal(), que esta vez sí funcionó correctamente. Para lograr esto se debió crear la clase Sorting_inicio.cpp, donde también hubo que agregar el archivo resource.h para que reconociera el dialog al que estaría vinculado, y donde se definió el código de los botones "Calibración" y "Procesamiento". Como la interfaz de calibración no había sido migrada aún, el botón Calibración se dejó con un mensaje placeholder mediante una MessageBox. En el botón Procesamiento en cambio, se definió que abriera el dialog que se había estado modificando anteriormente, de nuevo mediante la ahora funcional DoModal(), y se descomentó dentro del botón “Clustering” el código de la funcionalidad. Con todo esto al compilar la aplicación se abrió en la pantalla de inicio, al presionar el botón "Procesamiento" abrió el dialog que se ha ido modificando durante este nuevo enfoque, y al presionar el botón "Clustering" ejecutó la funcionalidad homónima detallando su progreso por consola. La figura 15 muestra esta funcionalidad dentro del software integrado.

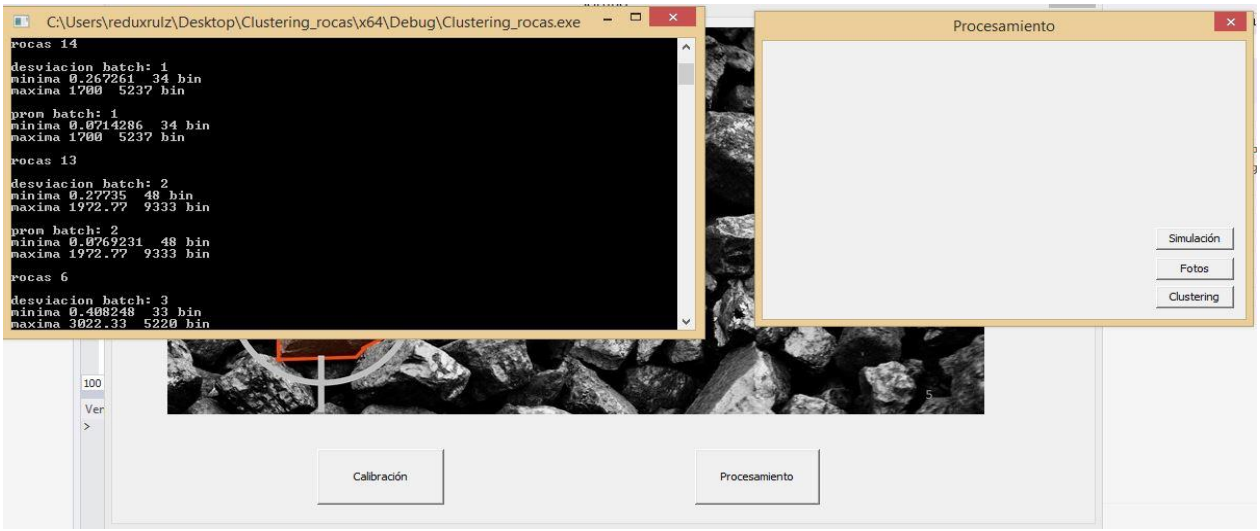

Figura 15: Funcionalidad de Clustering dentro del software integrado.

Posteriormente se logró integrar la funcionalidad de Identificar Fotos en el proyecto integrado. Para esto se creó un nuevo botón "Fotos" dentro del dialog que se ha estado modificando, luego se copió el código de la función _tmain del segundo proyecto de los encargados del procesamiento de datos sobre este botón, y el resto de las funciones se agregaron como funciones estáticas afuera del botón, al igual que se hizo con el código de la funcionalidad Clustering. También se debieron agregar los archivos Piedra.cpp y Piedra.h al proyecto, ya que la funcionalidad de identificar fotos los requería para su correcto funcionamiento. Finalmente se debió cambiar el nombre de una de las variables, ya que la funcionalidad de Clustering también tenía una variable con el mismo nombre y ya que ahora están en el mismo archivo de código, esto causó problemas de colisión. Así la variable del código de la funcionalidad de Identificar Fotos std::map <long, Steine> RockClass; pasó a ser std::map <long, Steine> RockClasses; para que no se confundiera con la variable de la funcionalidad Clustering std::map <int, std::vector <Roca>> RockClass;, y de igual forma se cambió el nombre en todos sus usos, los cuales principalmente estaban dentro del código del botón “Fotos”. Ya con esto se pudo compilar el proyecto, con lo que se abrió en la pantalla de inicio, al presionar el botón "Procesamiento" abrió el dialog que se ha ido modificando durante este nuevo enfoque, y al presionar el botón "Fotos" ejecutó la funcionalidad de identificar fotos detallando su progreso por consola. La figura 16 muestra esta funcionalidad dentro del software integrado.

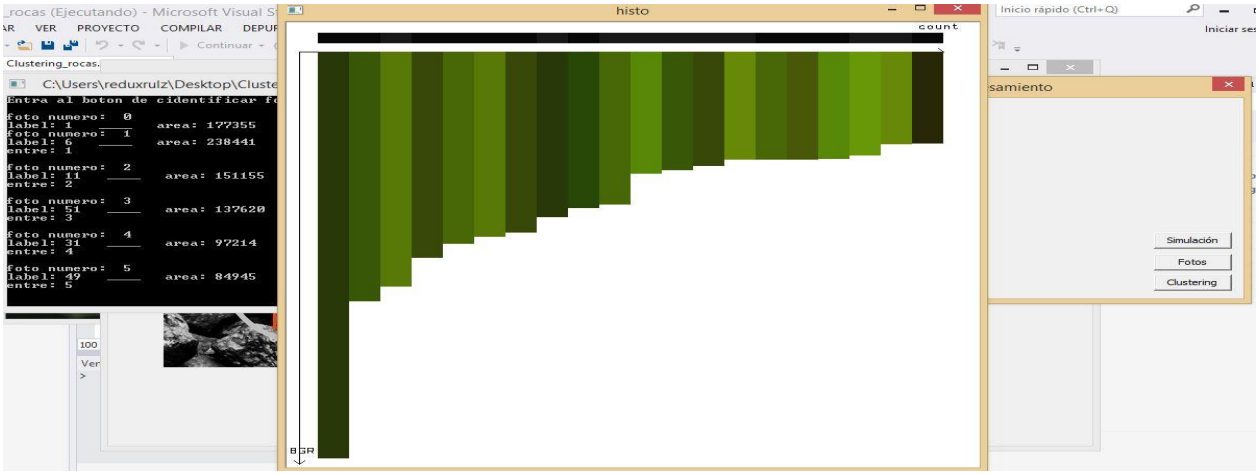

Figura 16: Funcionalidad Identificar_Fotos dentro del software integrado.

Tras los avances anteriores, se comenzó con la migración de la interfaz de calibración, por lo que se creó un nuevo dialog, se definieron 6 botones, y luego se comenzó a copiar el código botón por botón. Luego se abrió el archivo de recursos como archivo de código y se copió el aspecto de la interfaz de calibración que se tenía anteriormente. Ya con esto quedo la interfaz de calibración como se tenía en el proyecto anterior, sin embargo no todas sus funcionalidades funcionaban correctamente. Primero la función que pasa las imágenes de OpenCV a MFC fallaba cuando debía utilizar la función cv::resize(cvImg,cvImgTmp,newSize,0,0,INTERPOLATION_NONE); debido a que estos argumentos ya no funcionaban en el nuevo proyecto, así que se cambiaron por cv::resize(cvImg,cvImgTmp,newSize,0,0); y la función operó correctamente.

Luego en la función de calcular la posición de las rocas en el tiempo, se determinó que la razón por la que no abría la simulación de rocas realistas era un error que ya se había experimentado anteriormente en que se debía copiar el archivo opencv_ffmpeg300_64.dll en la carpeta donde está el archivo del proyecto Clustering_rocas.vcxproj para que el programa lo leyera como entrada y pudiera hacer captura de video de la simulación. Después de esto la funcionalidad aún no operaba correctamente, arrojando una excepción no manejada cuando se presionaba el botón, eventualmente se descubrió que era debido a que la funcionalidad debía tener cargada o generada una homografía antes de poder hacer sus cálculos, así que se agregó una messagebox que advierte si no hay cargada una homografía antes de usar la funcionalidad. Aprovechando esto también se cambió todas las instancias en que se usaba la función AfxMessageBox, que no era capaz de modificar al título de la ventana con el mensaje, por la función MessageBox, que si era capaz de hacerlo, y con lo que se cambió el título de todas las ventanas de mensaje desde "Clustering_rocas" a "Sorting". Luego, mediante ensayo y error, se determinaron nuevos parámetros para las funciones cv::resizeWindow y cv::moveWindow que se usaban para mostrar el proceso de filtrado de las imágenes de la simulación realista para extraer el centroide de las rocas en la correa, para que las ventanas que estas funciones abría fueran más amigables y menos intrusivas para el usuario.

El siguiente paso fue hacer funcionar el tercer proyecto de los encargados del procesamiento de datos. Existía un error desconocido que impedía completamente la compilación, pero finalmente, y gracias al trabajo hecho para migrar la interfaz de calibración, se descubrió que se debía copiar el archivo opencv_ffmpeg300_64.dll en la carpeta donde está el archivo del proyecto ConsoleApplication1.vcxproj para que el programa lo leyera como entrada y pudiera hacer captura de video de la simulación. El resultado fue una simulación que pasa las rocas lentamente y cuando estas llegan al borde inferior de la correa, despliega el histograma de la roca que pasa por allí, el cual cambia cuando pasa la siguiente roca.

Ya con esto se pudo agregar al proyecto integrado, usando el mismo método que se usó para la funcionalidad identificar_fotos, es decir copiar las funciones necesarias dentro del archivo cpp del dialog de procesamiento, poner el código del _tmain en el botón asignado para esta funcionalidad("Simulación"), copiar los archivos cpp y.h que se requirieran y finalmente cambiarle el nombre a las variables que fueran necesarias para evitar errores de colisión, que en este caso fueron muchas más que la vez anterior debido a la tendencia del programador del procesamiento de datos de reusar el nombre de sus variables. En resumen fueron: RockClass a Rockclase, Rockid a Rockiden, Piedra a Piedras,Steine a Steines, id a iden, ASUP a ASUPO, AINF a AINFO, y también renombrar 3 funciones que se usaban poco pero como tenían el mismo nombre generaban colisiones: Identificar_Foto a Identificar_Fotos, paintRectangles a paintRectangulos, y getBlobs a getBlobsim. Con todo esto se logró al presionar el botón "Simulación" ejecutar la funcionalidad de identificar rocas en la simulación al mostrar una simulación que pasa las rocas lentamente y cuando estas llegan al borde inferior de la correa, despliega el histograma de la roca que pasa por allí, el cual cambia cuando pasa la siguiente roca. La figura 17 muestra esta funcionalidad dentro del software integrado.

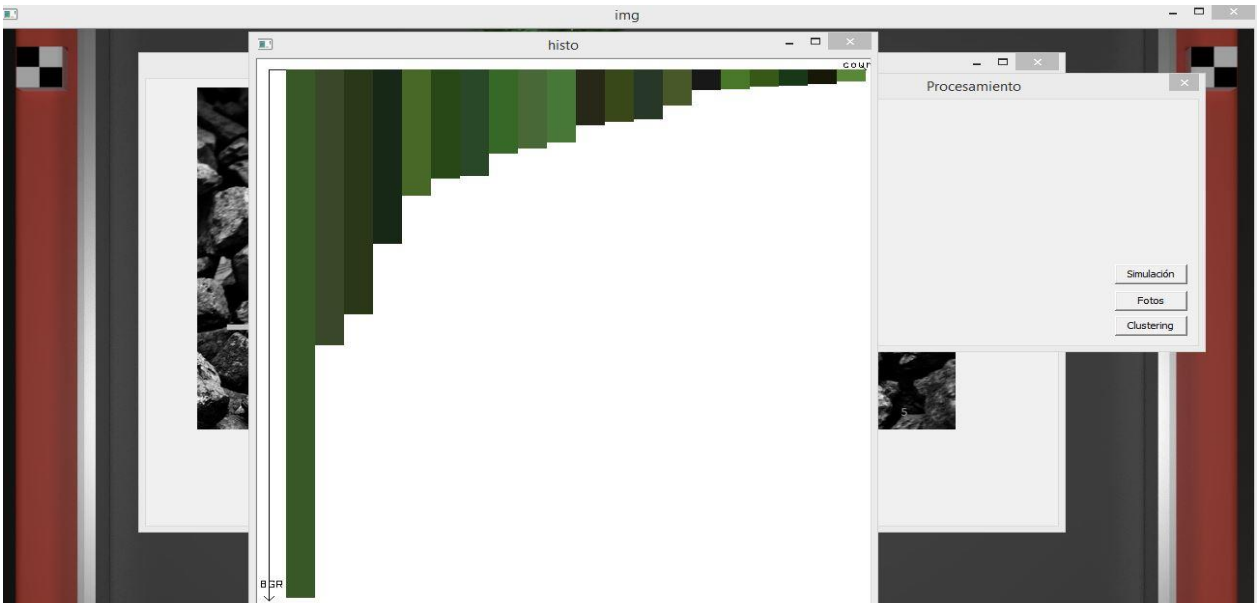

Figura 17: Funcionalidad Identificar_Simulacion dentro del software integrado.

El penúltimo paso fue copiar el código de las funciones que componen la funcionalidad de capturar fotos con la cámara en el dialog de la calibración, las cuáles son: Adquisition, BayerToBGR, StreamCBFunc, SetFramegrabberValue2, SetFramegrabberPixelFormat2, OpenFactoryAndCamera, CloseFactoryAndCamera y ShowErrorMsg. Esto también implicó definir 2 nuevos recursos IDR_MAINFRAME e IDC_PICFLOW2, agregar la biblioteca Jai_Factory.h al archivo Sorting_calibracion.h, definir dentro de este archivo las nuevas funciones y agregar nuevas inicializaciones de variables, y finalmente agregar un nuevo picture control, ligado al recurso IDC_PICFLOW2, al dialog de la calibración donde se mostrará el live feed capturado por la cámara. También se verificó que sí funciona correctamente la funcionalidad para capturar fotos con la cámara, ya que se conectó el software a la cámara que estaba conectada a la máquina Sorting, y después de ajustar firmemente los cables que conectan la cámara con el computador se capturaron imágenes de lo que veía la cámara, RGB o NIR dependiendo del puerto de la cámara que se usara, dentro de la interfaz de calibración.

Finalmente se arregló un detalle en que la lista generada por la combobox no era visible, ya que sólo mostraba un elemento a la vez. Simplemente se abrió el dialog con la interfaz gráfica y se agrandó el área para que se mostrara la lista de puntos, al presionar la flecha que muestra la lista en el extremo derecho de la combobox y usar las flechas para agrandar el cuadro.

3.6 Validación y Testeo

3.6.1 Obtención del umbral de detección

Dado que para la correcta separación es necesario definir un umbral de histogramas obtenidos por la cámara multi-espectral, es necesario pasar primero por una serie de etapas que permitan encontrar la correlación entre los histogramas obtenidos por la cámara multi-espectral y la ley promedio de las rocas. Dichas etapas se presentan en la figura 18.

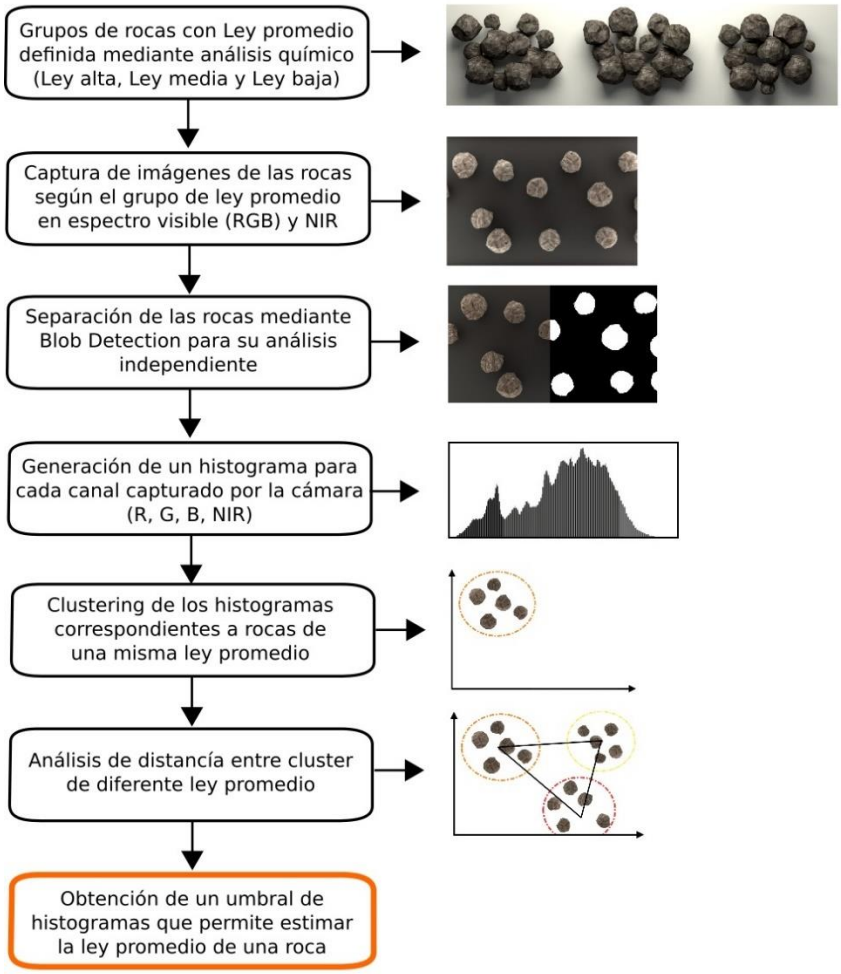

Figura 18: Diagrama de etapas para la obtención de umbral de selección.

3.6.2 Plan de Testeo

El plan de testeo constituye una parte fundamental del prototipado, ya que de esta forma se puede validar el correcto funcionamiento de las diferentes partes aumentando el éxito a la hora de integrar todos los módulos. Es por esto que en la tabla de la Figura 19 se presenta el plan de testeo para cada hito.

Hito por realizar	**Condición de Éxito**
Detección de rocas	Rocas son detectadas como objetos separados
Histograma de imágenes	Muestra Histograma de pixeles de los colores de una imagen
Selección de roca mediante umbral	Programa detecta rocas correctamente
Interfaz de LiveStream y parámetros	Parámetros se pueden ingresar por interfaz
Módulo separador construido	Armado Chute Separador
Módulo alimentador construido	Alimentador construido
Estimación de la posición de la roca en tiempo real	Una señal es generada por el software ante el paso de las rocas
Movimiento de motores mediante software	Motores son activados por la señal generada por el software ante el paso de las rocas
Separación de las rocas en dos flujos	Las rocas son separadas del flujo
Test de separación	Módulos funcionan correctamente separados y juntos.
Resultados estadísticos	El programa genera gráficos de cantidad y calidad del mineral.
Informe Falsos Positivos	Falsos positivos son menores al X% (a ser determinado)

Figura 19: Plan de testeo por cada hito definido en el diseño y construcción del prototipo del Proyecto Sorting.

3.6.3 Análisis Crítico y Evaluación de Riesgos

El proyecto posee algunos riesgos dentro de su planificación y desarrollo, que podrían afectar su desempeño. El primer factor es que el sistema de visión por computador sólo puede ver las rocas de un sólo lado y no por ambos lados, esto significa que una roca podría ser mal clasificada debido a que el software de identificación no tiene acceso a los datos necesarios para su correcta clasificación. Como se explicó anteriormente, se decidió usar este enfoque para poder tener un producto mínimo viable más factible de desarrollar. El segundo factor son las condiciones altamente hostiles del ambiente industrial en donde funcionará la aplicación, las cuales hacen que los requerimientos técnicos y los costos del hardware sean mucho mayores a los del prototipo que se está construyendo actualmente, cosa que habrá que considerar cuando la aplicación salga al mercado. El tercer factor de riesgo está con el segmento de clientes objetivo, los cuales tienen una gran aversión al riesgo y poseen requerimientos de funcionamiento continuo de sus maquinarias, por lo que la ventana de oportunidad para poder instalar la aplicación en la línea de procesamiento es muy acotada. Todos estos factores afectan la viabilidad del producto a futuro, pero con este primer prototipo, se cumple el objetivo de poder demostrar la factibilidad de una aplicación de este tipo antes de seguir avanzando en un producto altamente comercializable.

4 Conclusiones

4.1 Resultados

Este proyecto fue desarrollado por un equipo de memoristas dentro del contexto del programa de las memorias multidisciplinarias. El memorista de Ingeniería en Diseño de Productos, Eduardo Piñones, estaba encargado de la construcción del prototipo físico de la maquinaria. La memorista de Ingeniería Civil Electrónica, Gabriela Gondeck, estaba encargada de desarrollar las funcionalidades del software encargadas del procesamiento de datos. Finalmente, quién escribe esta memoria, Eduardo Vera, memorista de Ingeniería Ejecución Informática, estaba encargado de integrar las funcionalidades del procesamiento de datos con una interfaz para la aplicación que hiciera al software accesible para los usuarios.

Se logró desarrollar una aplicación que funciona a nivel de laboratorio, con un software integrado de funcionalidades para el reconocimiento de leyes de las rocas y con una interfaz amigable para sus usuarios objetivo. También este software es capaz de funcionar en conjunto con el prototipo físico de la maquinaria, que es una emulación relativamente simple de las condiciones en que la aplicación deberá funcionar en la realidad, pero que le da mayor legitimidad al proyecto al ser una muestra concreta con lo cual se puede apreciar todo el trabajo que ha significado el desarrollo de este proyecto.

El mayor logro fue que el software desarrollado por la memorista encargada del procesamiento de datos entregó resultados que se ajustan a los valores entregados por un análisis espectométrico de las rocas, que se hizo anteriormente para tener una métrica con la cual comparar los resultados entregados por el software. Es decir, el software es capaz de reconocer las leyes de las rocas al analizar imágenes capturadas con una cámara.

En el caso de la interfaz, el mayor logro fue que se logró integrarla exitosamente con las funcionalidades de procesamiento de datos. Esto le entrega valor agregado a la aplicación, ya que al ser más amigable para sus usuarios objetivo, aumenta su competitividad, y la posibilidad de que logre crear un mercado para satisfacer. Como valor agregado de la interfaz también se le agregaron varias funcionalidades que serán de utilidad en la siguiente iteración del proyecto al momento de desarrollar el siguiente requerimiento funcional de separar las rocas de baja ley del flujo de minerales.

Finalmente un logro extra de este proyecto y que fue un producto derivado del desarrollo del mismo, fue un paper que fue presentado en el congreso Automining 2016(Akhloufi et al., 2016) por los profesores supervisores del proyecto. Este paper, en el que todo el equipo de desarrollo del proyecto Sorting está listado como coautor, ha sido agregado a la sección de anexos de este documento.

4.2 Trabajo Futuro

Debido a la falta de recursos y a otras dificultades de fuerza mayor, es que sólo se logró desarrollar el primer requerimiento funcional, que era identificar la ley de las rocas que pasan por la correa. El segundo requerimiento funcional que era separar las rocas de baja ley del flujo de minerales no se logró completar. Principalmente debido a que los memoristas encargados del software se demoraron mucho tiempo en completar el desarrollo del primer requerimiento funcional, lo cual causó que el memorista encargado de construir físicamente el módulo de separación no siguiera trabajando en el proyecto después de completar su memoria y se dedicara a otros proyectos.

Inicialmente se había planificado para llegar a desarrollar el segundo requerimiento funcional, lo cual incluía la construcción física del sistema de separación, la integración de hardware y software, y una fase de pruebas de la aplicación para calibrar el umbral en el cual las rocas eran definidas como de baja ley. Aunque no se realizaron, todos estos pasos serán necesarios para el desarrollo del segundo requerimiento funcional en el futuro.

También durante la definición del proyecto se discutió la posibilidad de poder generar resultados estadísticos con el software de Sorting, de manera que registrara las leyes de las rocas que pasan por la visión de la cámara, y con estos datos ayudar a la toma de decisiones de las empresas mineras, para que tengan información útil a la hora de definir que rocas se deben procesar para obtener un mayor retorno de la inversión. Esta parte sólo se quedó en planificación, pero es evidente que le añadiría un valor agregado significativo a la aplicación. Se espera que en las siguientes iteraciones de este proyecto, esta funcionalidad sea considerada como fundamental para darle mayor competitividad a la aplicación, después de que se logre desarrollar exitosamente el segundo requerimiento funcional.

5 Referencias

Akhloufi, Moulay. University of Moncton, Canada; Gondeck, Gabriela. Nikulin, Christopher. Piñones, Eduardo. Vera, Eduardo. Zúñiga, Marcos. Universidad Técnico Federico de Santa María, Chile. A Framework of Sorting Technologies and its Applicability to Copper Mining. En: Automining 2016, 5th International Congress on Automation in Mining. Nov. 30 – Dec. 2, 2016, Hotel Enjoy, Antofagasta, Chile, pp. 6-7.

Antariksha, Kar. (2014). Program to print coordinates of a particular pixel on an image. [en línea]<http://dynamiccopencv.blogspot.cl/2014/09/program-to-print-coordinates-of.html> [Consulta: Agosto 15, 2016]

Batchelor A.R., Ferrari-John R.S., Katrib J., Udoudo O., Jones D.A., Dodds C., Kingman S.W. Pilot scale microwave sorting of porphyry copper ores: Part 1 – Laboratory investigations. Faculty of Engineering, The University of Nottingham, University Park, Nottingham NG7 2RD, United Kingdom. Noviembre 2016. [en línea]<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687516301984>, [Consulta: Junio 6, 2017]

Comisión Chilena del Cobre. Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales. 2012.

Consejo Minero. Minería en Cifras. Febrero, 2016.

Decreto Supremo Nº 133. Aprueba reglamento sobre autorizaciones para instalaciones radiactivas o equipos generadores de radiaciones ionizantes, personal que se desempeña en ellas, u opere tales equipos y otras actividades afines. Santiago, 23 de agosto de 1984. [en línea] <http://www.cchen.cl/transparencia/transparencia_2006_a_2008/MarcoNormativo.htm> [Consulta: Marzo 30, 2016]

Decreto Supremo Nº 87. Aprueba reglamento de protección física de las instalaciones y de los materiales nucleares. Santiago, 25 de abril de 1985. [en línea] <http://www.cchen.cl/transparencia/transparencia_2006_a_2008/MarcoNormativo.htm> [Consulta: Marzo 30, 2016]

Decreto Supremo Nº 87. Aprueba reglamento de protección radiológica de instalaciones radioactivas. Santiago, 09 de marzo de 1985. [en línea] <http://www.cchen.cl/transparencia/transparencia_2006_a_2008/MarcoNormativo.htm> [Consulta: Marzo 30, 2016]

Functionx.com. Microsoft Visual C++/MFC. [en línea] <http://www.functionx.com/visualc/index.htm> [Consulta: Septiembre 19, 2016],

Gitlab.com. (2011). GitLab. [en línea] <https://about.gitlab.com> [Consulta: Octubre 13, 2016]

Hersey, C. New sorting system breathes life into talc mine. CIM Magazine. Noviembre, 2007

Hong, K. (2016). C++ Tutorial- UI Application using Visual Studio 2013. [en línea] <http://www.bogotobogo.com/cplusplus/application_visual_studio_2013.php> [Consulta: Mayo 30, 2016]

Kapoulkine, Arseny (2006). Pugixml. Light-weight, simple and fast XML parser for C++ with XPath support [en línea] <http://pugixml.org> [Consulta: Octubre 24, 2016]

Knapp, H., Neubert, K., Schropp, C., & Wotruba, H. Viable Applications of Sensor-Based Sorting for the Processing of Mineral Resources. ChemBioEng Reviews. 2014.

Mallick, S (2016). Homography Examples using OpenCV (Python / C ++) [en línea] <http://www.learnopencv.com/homography-examples-using-opencv-python-c> [Consulta: Octubre 17, 2016]

Mesina, M. B., De Jong, T. P. R., & Dalmijn, W. L. Improvements in separation of non-ferrous scrap metals using an electromagnetic sensor. Physical Separation in Science and Engineering, 12(2): 87–101. 2003.

Math.stackexchange.com. (2016). How to compute homography matrix H from corresponding points (2d-2d planar Homography) [en línea] https://math.stackexchange.com/questions/494238/how-to-compute-homography-matrix-h-from-corresponding-points-2d-2d-planar-homog [Consulta: Junio 6, 2017]

Microsoft.com. (2013). MFC project .rc file getting corrupted when using VS 2013 RC. [en línea] <https://connect.microsoft.com/VisualStudio/feedback/details/805004/mfc-project-rc-file-getting-corrupted-when-using-vs-2013-rc> [Consulta: Diciembre 12, 2016]

Murphy, B., van Zyl, J., & Domingo, G. Underground Preconcentration by Ore Sorting and Coarse Gravity Separation. Narrow Vein Mining Conference. 2012.

Pórfido cuprífero.Wikipedia. [en línea] <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=P%C3%B3rfido_cupr%C3%ADfero&oldid=90452363> [Consulta: Abril 14, 2016]

Robben, C., Wotruba, H., Robben, M., von Ketelhodt, L., & Kowalzcyk, M. Potential of sensor-based sorting for the gold mining industry. CIM Journal. Julio 2, 2013.

Seerane, K., & Rech, G. Investigation of Sorting Technology to remove hard pebbles and recover copper bearing rocks from an autogenous milling circuit. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy 6th Southern African Base Metals Conference 2011, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2011, p. 14.

Sensor-based sorters enable miners to process ore faster. Canadian Mining Journal, (2). Diciembre, 2015.

Sensor-based sorting. Wikipedia.[en línea] <https://en.wikipedia.org/wiki/Sensor-based_sorting> [Consulta: Diciembre 23, 2016]

Shekwonyadu, I., Glass, H. J., Rollison, G. K., & Kowalczuk, P. B. Application of near infrared sensors to preconcentration of hydrothermally-formed copper ore. Minerals Engineering, (20). Noviembre 17, 2015.

Shermal Ruwantha, Fernando. (2013). OpenCV Lessons. [en línea]<http://opencv-srf.blogspot.cl/p/opencv-c-tutorials.html> [Consulta: Junio 13, 2016]

von Ketelhodt, L. Sensor Base Sorting New Developments. Junio, 2009.

von Ketelhodt, L. Beneficiation of witwatersrand type gold ores by means of optical sorting. University of the Witwatersrand, Johannesburg. Junio, 2012.

www.qt.io. (1996). Qt for application development. [en línea] <https://www.qt.io/qt-for application-development> [Consulta: Mayo 9, 2016]

X-ray crystallography. Wikipedia. [en línea] <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=X-ray_crystallography&oldid=719345535> [Consulta: Mayo 9, 2016]

6 Anexos

6.1 Diagrama de Flujo de la Interfaz de Calibración

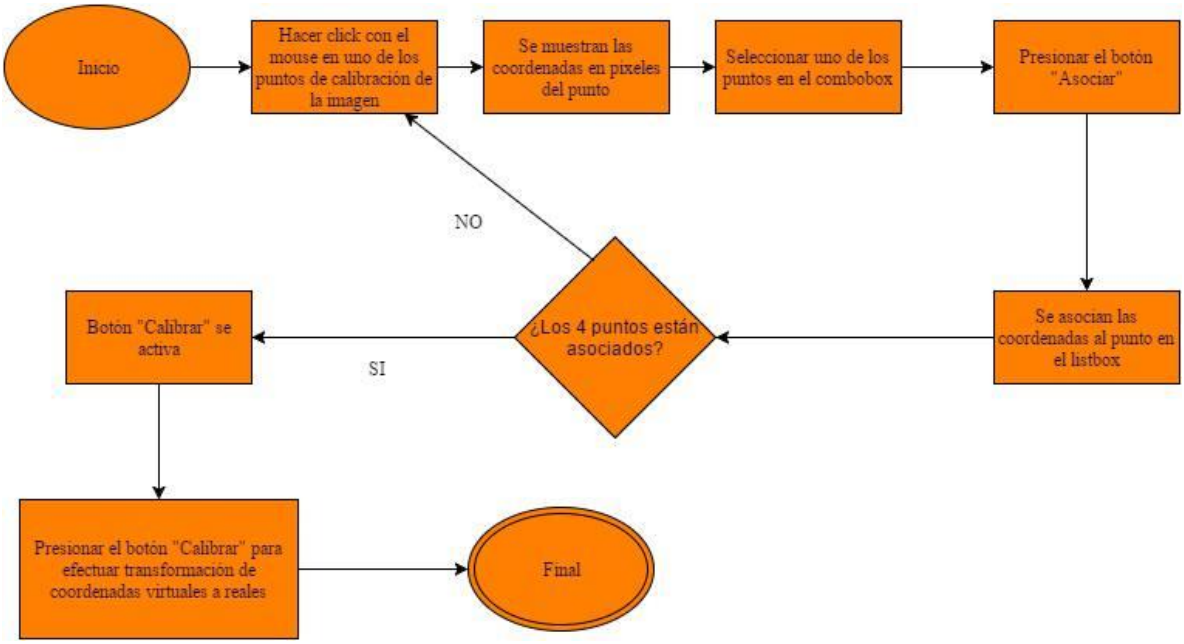

Figura 20: Diagrama de Flujo de la Interfaz de Calibración

6.2 Estudio Legal y Ambiental

Es importante, para entender las decisiones de diseño del proyecto, tener en cuenta las normativas vigentes, en especial al trabajar con rayos X, ya que la exposición a niveles excesivos de radiación por periodos prolongados es perjudicial para la salud del personal. En este contexto existen normas por parte de la Comisión Chilena de Energía Nuclear las cuales establecen ciertas reglas para el manejo de sistemas radioactivos y radiográficos. Se regula también la protección y tiempo de exposición para las personas que trabajan con estos sistemas. Todo esto se encuentra establecido en el Decreto Supremo N° 133 del año 1984 y los Decretos Supremos N° 87 y N°3 del año 1985. (http://www.cchen.cl/transparencia/transparencia_2006_a_2008/MarcoNormativo.htm.2008)

A continuación, se especificarán algunos artículos del Decreto Supremo N° 3 y N° 87:

DECRETO SUPREMO N°3

- Artículo 2.- Para los fines de este reglamento se considerará persona ocupacionalmente expuesta, a aquella que se desempeñe en las instalaciones radiactivas u opere equipos generadores de radiaciones ionizantes, la que deberá, además, contar con la autorización sanitaria a que se refiere el Decreto Supremo No.133, de 22 de mayo de 1984, del Ministerio de Salud.
- Artículo 3.- Corresponderá a los Servicios de Salud y al Servicio de Salud del Ambiente en la Región Metropolitana fiscalizar y controlar el cumplimiento de las disposiciones del presente reglamento y las del Código Sanitario en la misma materia, todo ello de acuerdo con las normas e instrucciones generales que imparta el Ministerio de Salud.
- Artículo 8.- Los organismos interesados en desarrollar tales actividades en las instalaciones radiactivas, solicitarán su habilitación al Ministerio de Salud, para lo cual deberán:
    - Acreditar que disponen de personal idóneo para desempeñar estas funciones;
    - Especificar el tipo de dosimetría a efectuar;
    - Acreditar, mediante certificado, que su sistema dosimétrico está referido al laboratorio patrón nacional reconocido por el Ministerio de Salud;
    - Especificar los rangos de detección de su sistema dosimétrico;
    - Contar con un informe favorable del Instituto de Salud Pública, en el cual se deje constancia de que el organismo solicitante posee la infraestructura técnica suficiente. Dicho informe deberá detallar cada uno de los elementos disponibles y los métodos y procedimientos aprobados por el Instituto para efectuar la dosimetría.
- Artículo 12.- Los límites de dosis (LD) para trabajadores expuestos a radiaciones ionizantes serán las siguientes:

Órgano Expuesto	Límite de Dosis REM Anual
Cuerpo entero, gónadas, médula ósea, cristalino.	30
Cualquier otro órgano en forma individual	50

Figura 21: Límites de Dosis para trabajadores expuestos a radiaciones ionizantes

DECRETO SUPREMO N°87

- Artículo 5ª.- La autorización del sistema de protección física de la instalación, será en base a la evaluación que la Comisión efectúe del proyecto de protección física que el presente explotador de dicha instalación y que debe comprender:
    - Diseño físico de la instalación, desde el punto de vista de la protección física de los materiales radiactivos.
    - Disposición de equipos e instrumentos de seguridad.
    - Plan de protección física de los materiales nucleares. La Comisión podrá autorizar totalmente, modificar o rechazar el proyecto propuesto.
- Artículo 7º.- El plan de protección física de la instalación debe comprender, como mínimo, los siguientes procedimientos:
    1. Procedimiento de autorización de ingreso de personas, vehículos y bultos a la instalación, incluyendo el otorgamiento de distintivos.
    2. Procedimiento de control de acceso de personas, vehículos y bultos, a la instalación, incluyendo:
        - Verificación de la identidad de las personas. - Revisión de distintivos y autorizaciones de ingreso.
        - Detección de intromisión.
        - Detección de contrabando.
        - Registro de personas, vehículos y bultos.

- Detección de transporte no autorizado de material nuclear
- Detección de explosivos.

Es importante tomar en cuenta las normativas de gestión energética como la ISO 50001. Este estándar apunta a permitir a las organizaciones reducir continuamente su uso de energía, y por consiguiente, sus costos relacionados con el uso de energía y la emisión de gases de efecto invernadero.

6.3 A Framework of Sorting Technologies and its Applicability to Copper Mining

Moulay Akhloufi[1], Christopher Nikulin[2], Marcos Zuniga[3], Gabriela Gondeck[3], Eduardo Piñones[2], Eduardo Vera[4].

1. Computer Science Department, University of Moncton, Moncton, NB, Canada

2. Carrera en Ingeniería de Diseño de Productos, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaiso-Chile.

3. Electronics Department, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaiso-Chile.

4. Informatics Department, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaiso-Chile.

ABSTRACT

Technology and related limitations analysis is required when companies or industries need to implement new solutions to improve their efficiency and competitiveness. With this in mind, ore sorting technologies are frequently used by companies to select the appropriate material in order to improve their mining operations. Nevertheless, the appropriate selection and utilization of technologies, among a large number of alternatives, depends on different variables, which must be studied in order to develop specific solutions. In this paper, we present a framework for ore sorting solutions, for implementation in the mining industry. Also, we propose specific sorting solutions in order to tackle the technical challenge in the copper mining industry.

INTRODUCTION

From a technology point of view, mining is widely considered as an old industry with mature and stable technologies (Tildon et al., 1999), characterized by long life cycles (Bartos, 2007). In the mining industry the lead time to develop and commercialize new equipment is typically in the order of 7–10 years (Hilson, 2000), while investing in new technologies often implies high capital R&D costs, because of the large scale and complexity of earthmoving equipment and the need to coordinate technology acquisition with mine development plans (Peterson et al., 2001; Warhust, 1996). As consequence, maintenance plays an essential role for the mining companies at all their operational levels. Moreover, while there is a general demand for prioritizing the improvement of equipment productivity and reliability (Peterson et al, 2001), more tailored products are needed in order to optimize each phase of operation, especially from the resource consumption point of view, being the mining industry one of the most energy-intensive industries in the world (Rábago et al, 2001). This overview suggests that more research efforts are necessary in order to support the mining industry through: the proper support to new technological solutions and scenarios; the adequate settlement of development priorities; and the improvement of management procedures for higher efficiency of the mining process. In Chile, the mining companies are one of the largest exporters of copper worldwide (i.e. Chilean mines produce 32% of world copper) (Garay et al., 2012). Several studies report the advancements promoted by the Chilean government to increase the value proposition of this complex industrial field (Tulcanaza and Ferguson,2001). Nowadays in Chile, mining is the industry that has the largest investments made in the country. Specifically, its copper mining industry can be considered as a technology's receptor from different industries and countries: as a result, Chile is one of the most important buyers of mining technology in the world. However, being the mining industry (in Chile and worldwide) an intensive-production and conservative sector, the implementation of new technological advances takes considerable amount of time and has to tackle several challenges. First, being an energy-intensive industry, the Chilean mining sector is also pressed by energy and resource shortage. Second, the accession of Chile to the OECD has also put pressure for stronger regulations in terms of sustainability indicators and accessibility to environmental information (Sustainable Development Strategies Group, 2010). Third, innovative

technical solutions are needed to increase workers' safety as well as the overall mine productivity. With the aim of addressing these challenges, the Chilean government has launched a variety of programs through its Economic Development Agency (CORFO). Among these, the CORFO's Mining Cluster Program is in the context of the case studies described in this paper. The aims of this program are several: increasing the investment of the auxiliary industry of goods, inputs and services that supply the local and regional mining industry; promoting the national mining cluster; encouraging technological updates of the business platform; and increasing the local manufacturing capacity (CORFO, 2010). Hence, considering these needs and the strong intention of the Chilean mining industry to find new structured strategies to be more competitive on the world market, the resulting context has been seen as very attractive and appropriate for understanding the suitability of sorting solutions in the mining industry. The paper describes sensor based sorting and the sensing technologies used for mineral sorting. It also compares potential drivers and barriers for ore sorting use in copper mining industries.

A GENERAL FRAMEWORK OF A MINING PROCESS

In this section, a general framework of a mining process is described in order to identify the potential areas for sorting integration. In Figure 22, a scheme of the mining process is provided (for a more detailed description see also (Peterson et al., 2001)). The process is typically divided in the following steps: i) Drilling, blasting, cutting, and excavating; ii) Ground control; iii) Loading and hauling; iv) Material processing. Once the rock is drilled, blasted, and excavated, the material is loaded onto haul trucks by means of large shovels. The latter ones, together with haul trucks and excavators, are typically referred as the most critical technologies for surface-mining operations and are the units around which most mining operations are designed and planned. The most significant innovations are mainly incremental and related to load capacity and reliability in order to reduce the cost per ton of material moved (Peterson et al., 2001).

In addition, further challenges arise when companies demand for an increase in the size of the equipment in order to explore larger areas: this increase determines greater production and transportation costs, greater numbers of pieces that must be shipped to the site and longer field assembly times (Peterson et al., 2001). In the mining process, the ore is transferred to gyratory crushers that reduce its size. This crushed ore is conveyed to the mill grinding circuit. Mining mills usually make use of grinding balls to aid the grinding process (the friction and impacts occurring between the balls and ore generate the grinding action). After the grinding phase, the ore enters flotation steel cells that enable the collection of the minerals by means of chemical actions generated by specific “collector” reagents. Besides, the maintenance activity requires manpower, resources and several days of detention: under normal operating conditions in a plant that processes 100 kton/day, the outage cost is approximately US$ 270,000 per day (for further details see also (S.A.P.M., 2006)). As it appears from this overview of the process, the shovel and haul trucks can be considered as two critical equipment of the process: they respectively influence their upstream and downstream activities, and the overall productive capacity of the plant (in copper mining).

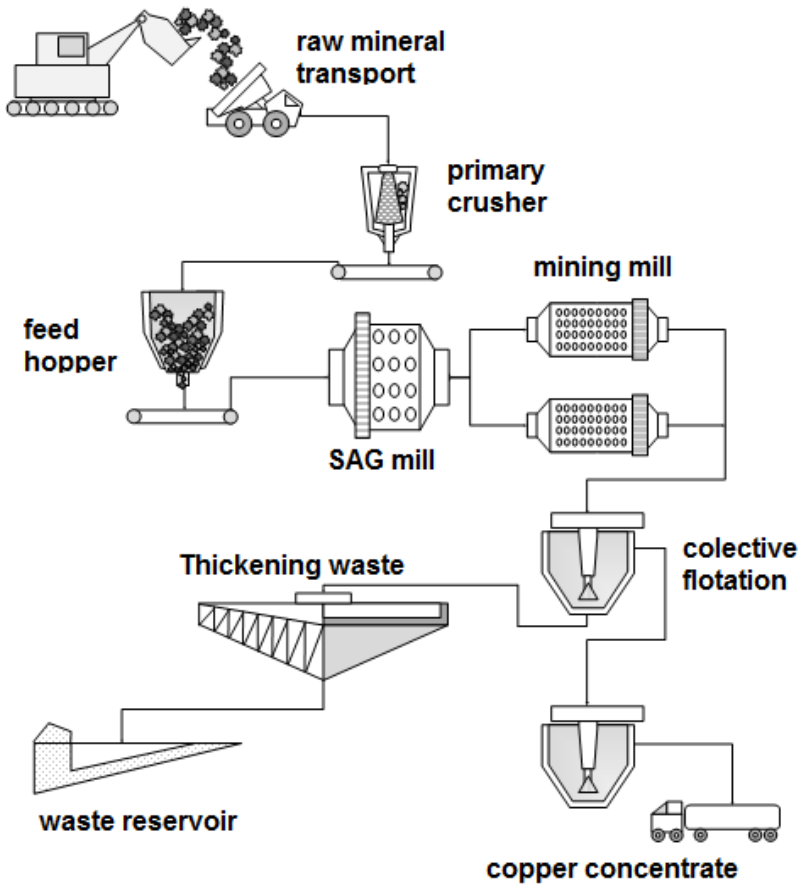

Figure 22: A general mining process for cooper industry.

This initial framework should be helpful in analyzing the suitability of sorting technologies for copper mining industry. This analysis should be considered as first effort to increase the efficiency of mining process in terms of raw material selection and classification.

SORTING PROCESS AND RELATED MECHANISM

Ore sorting has been done by hand for centuries by identifying mineralization on the surface of individual stones. However, modern technology makes it possible to look deeper than the surface, and in different spectral ranges (Lessard et al., 2014). Salter and Wyatt (1991) pointed out that the sorting process can be divided into four sub-processes: i) Particle presentation; ii) Particle examination; iii) Data analysis; iv) Particle separation (Figure 23).

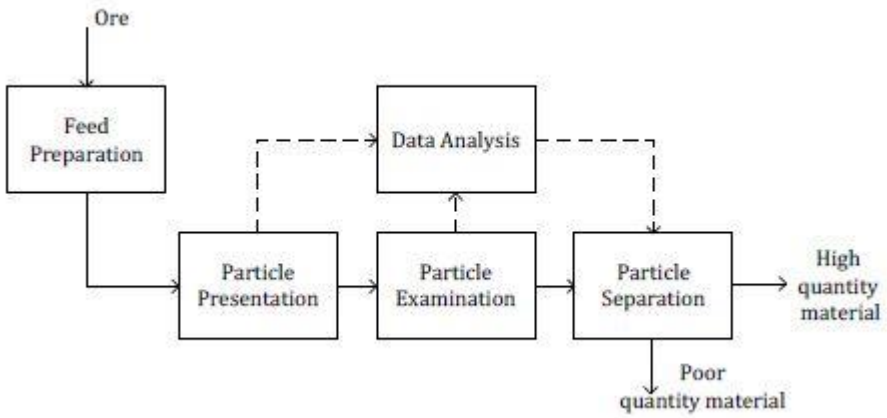

Figure 23: General configuration of a sorting machine and its sub-processes.

In general terms, ore is fed into the sorter by a feeder to ensure a monolayer of stable particles and presented to the sensing system (particle presentation). The sensing system sends data charactering each rock to the processor (particle examination), then the data is analyzed by the processor module and discriminates the ore from the waste (data analysis). Finally, the information is passed onto the ejectors and separated by them into a waste and ore stream (particle separation). The particle size, to be effectively sorted, is influenced by the spatial resolution of the sensor. The size range is between 1-300 mm, whereby the ratio of minimum and maximum particle size should not exceed 1:3. Throughput is conditioned by the particle size and the sorter technology used, therefore the sensor based sorter should be used as early as possible (Knapp et al., 2014). It is normally applied in after the secondary grinding.

Sorter machines can be found in two different forms: conveyor belt sorter or chute sorter. In the belt-type machine, the sensor is above the belt, where the rock is moving forward the separation module. This type of sorter has more stable feed presentation, making it applicable for more difficult and heterogeneous applications. While the chute-type sense the particle while is falling from the belt. This way, the particle can be sensed on two sides (Harbeck, 2008).

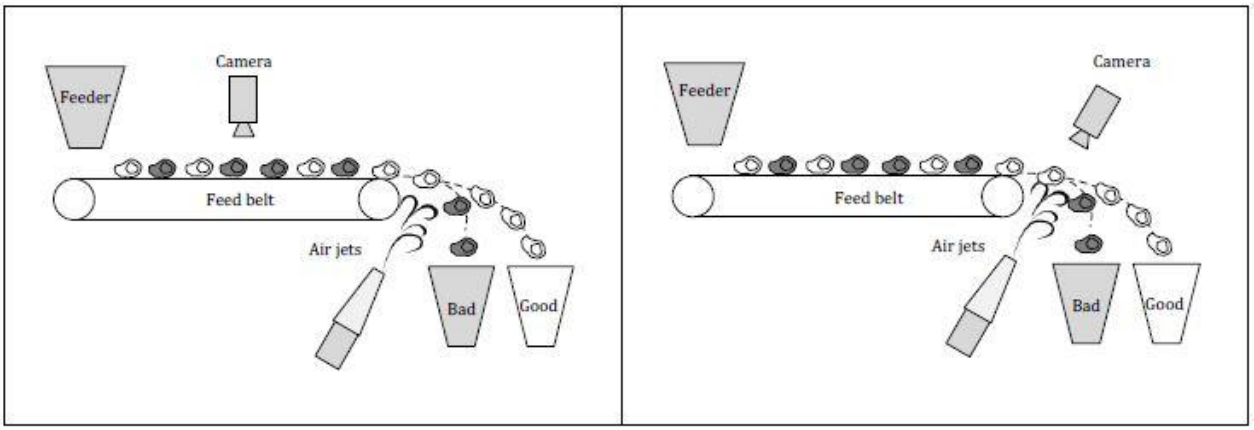

Figure 24: Types of sorter machine (left image: Conveyor belt system with pneumatic separation; right-image: Chute system with pneumatic separation)

SORTING TECHNOLOGIES FOR PARTICLE EXAMINATION

In this section, a general description of sorting technologies is presented, in order to understand how these technologies work in industrial applications (Figure 25).

	General Description
Radiometric sensor **wavelength:** $10^{-12} - 10^{-11}$m	Radiometric sensing is based on measuring the mineral natural radiation, thus is mainly used in mines with uranium ores. Different material types have different natural radioactivity, so it can be used as an indicator to separate one from other. The principle of radiometric sensing is based on emission of photons as the material is irradiated by high radiation, like γ-radiation. Emitted photons are directed onto a light-sensitive cathode, which causes the release of electrons and then converted into a signal (Knapp et al., 2014).
X-ray transmission **wavelength:** $10^{-10} - 10^{-8}$m	X-Ray transmission (XRT) function is based on the x-ray absorption of the particles. This absorption depends on variations of the atomic number of the contained elements. This kind of x-ray technology can be compared to the x-ray security baggage scanner at the airport. XRT sorting needs to penetrate each particle in the conveyor belt. The attenuated x-rays are detected by a line scan scintillator at the lower side of the belt (Knapp et al., 2014).
X-ray fluorescence **wavelength:** $10^{-10} - 10^{-8}$m	X-ray fluorescence (XRF), works with the photoelectric principle. X-ray radiation impacts on the material and electrons are emitted due the high energy of the incident radiation. Then, the vacancy created by the electron is refilled by an electron transition from an outer orbital. Energy is obtained during this process and emitted as secondary fluorescence radiation. This secondary x-ray radiation is specific for each element. Thus, with a special detector, it is possible to determine the elemental composition of the targeted material (Knapp et al., 2014).
Visible/Color sensor (Optical Laser) **wavelength:** $10^{-7} - 10^{-5}$m	Optical sorting is based on the detection of differences in color, transparency, brightness, and shape of particle surface in the visible light region. After data acquisition, the pictures are analyzed and compared to previously specified color, brightness, transparency, and/or shape classes. Therefore, it is possible to perform identification and characterization of different types of materials.
Near Infrared **wavelength:** 10^{-4}m	Near-infrared (NIR) is based on the reflectance when a surface is illuminated with NIR light. Vibrational properties of functional chemical groups create absorption features while particle accessibility to radiation determines the level of reflectance (Hunt, 1979; Pasikatan et al., 2001). As a result of the reflected radiation at wavelengths between 780-2500 nm, the mineralogical composition can be determined.
Thermal Infrared **wavelength:** $10^{-3} - 10^{-1}$m	Few sulphide ore are easily recognized by their host rock, which rules out the optical sorting. Because of that, it is necessary to analyze the entire rock. That leaves X-ray transmission and infrared technologies. Thermal infrared Technology is possible because the rock heats up or cools down, depending on its composition and optical surface properties. Therefore, the energy required for heating can be small, since the current infrared sensors can detect very small temperature differences (Van Weert & Kondos, 2007).
Electromagnetic/Inductive sensors **wavelength:** $10^{3} - 10^{4}$m	Electromagnetic sensors use the interaction between metals and magnetic fields as a criterion. The electromagnetic sensors consist of two main elements: a transmitter coil, and a receiver coil. The transmitter coil creates an alternating electromagnetic field that interacts with the metal particle placed close to the coil. This interaction is measured using the receiver coil, from which a signal is obtained (Mesina, De Jong, & Dalmijn, 2003).

Figure 25: General description of sorting technologies used in different mining industries.

AN ANALYSIS OF SORTING TECHNOLOGIES IN THE COPPER MINING PROCESS

In Figure 22, a general copper mining process was presented, in order to establish where the potential sorting technology can be implemented. Moreover, a general description according to the sorting-process (Salter and Wyatt ,1991) should help to understand the main limitations for technology suitability. In Figure 26, a novel comparison among sorting technologies for the mining and sorting processes is presented, in order to understand the main barriers in copper mining industry by considering a more holistic perspective.

	Initial stage	Inside of mining operation		Outside operation
	Mining pit	Crusher (Primary or Secondary)	Sag/mining Mill	Waste Dump/ Reservoir
Radiometric sensor. (Questionable feasibility for copper)	PE: One by time PS: Area identification DA: Logistic of mining plant	FP: Global measurement of particle PP: Conveyor PE: Specific mineral radiation PS: Batch or air jet DA: Large time	PP/PE: Size particle limitations PS: batch (mechanical)	PP: It is necessary to have the appropriate size for analysis. PS: batch (mechanical)
X-ray transmission	PE: One by one(points) PS: Area identification DA: Logistic of mining plant and ore penetration.	FP: Global measurement of particle PP: Conveyor PE: Atomic number of contained elements identification PS: Batch or air jet DA: maximum flow registered (100 t/h)	PP/PE: Size particle limitations PS: batch (mechanical)	PP: It is necessary to have the appropriate size for analysis. PS: batch (mechanical)
X-ray fluorescence	PE: One by one(points) PS: Area identification DA: Logistic of mining plant and ore surface	FP: Surface measurement PP: Appropriate light (Chute or conveyor) PE: Appropriate wavelength released by primary element PS: Batch or air jet DA: maximum flow registered 30 t/h	PP/PE: Size particle limitations PS: batch (mechanical)	PP: It is necessary to have the appropriate size for analysis. PS: batch (mechanical)
Visible/Color sensor (limitation for copper	PE: One by one(points) PS: Area identification	FP: Surface measurement PP: Appropriate light (Chute or conveyor) PE: Appropriate wavelength	PP/PE: Size particle limitations PS: batch	PP: It is necessary to have the appropriate size for analysis.

identification)	DA: Logistic of mining plant and ore surface	released by primary element PS: Batch or air jet DA: maximum flow registered 300 t/h	(mechanical)	PS: batch (mechanical)
Near Infrared (Large spectrum for material detection)	PE: One by one(points) PS: Area identification DA: Logistic of mining plant and ore surface	FP: Surface measurement PP: Appropriate light (Chute or conveyor) PE: Appropriate wavelength released by primary element PS: Batch or air jet DA: maximum flow registered ~300 t/h	PP/PE: Size particle limitations PS: batch (mechanical)	PP: It is necessary to have the appropriate size for analysis. PS: batch (mechanical)
Thermal Infrared	-	FP: Global measurement PP: conveyor PE: Appropriate thermal behavior (1°C degree sensibility.) PS: Batch or air jet DA: maximum flow registered ~300 t/h	PP/PE: Size particle limitations PS: batch (mechanical)	PP: It is necessary to have the appropriate size for analysis. PS: batch (mechanical)
Electromagnetic/Inductive sensors	PE: By areas for measurement PS: Area identification DA: Logistic of mining plant and ore penetration.	FP: Global measurement PP: Electromagnetic field. (Conveyor) PE: Induced electromagnetic field analysis PS: Conveyor Batch or air jet DA: maximum flow registered ~300 t/h	PP/PE: Size particle limitations PS: batch (mechanical)	PP: It is necessary to have the appropriate size for analysis. PS: batch (mechanical)

Figure 26: Sorting technologies and crossover with the mining and related sorting processes. (FP:Feed Preparation; PP:Particle Preparation = conveyor or chute; PE: Particle Examination; PS: Particle Separation = batch(mechanical) or air jet; DA: Data Analysis)

RESULTS AND DISCUSSION

The aim of the proposed analysis in this paper is to support companies in the analysis of suitability of sorting technologies, by considering a set of different technologies (i.e. working principles and mechanisms) applied among different mining industries. Among the different sub-processes presented in the sorting process, the particle presentation and particle separation seems to be the more difficult for copper mining industries. The main causes of these limitations emerge from the large quantity of material processed by copper mining industries. Consequently, the installation and modification of the mining-plan seems to be a huge barrier to accomplish this type of improvement in the near future. As a result of this analysis, the authors propose NIR technologies as an initial candidate and a first step into the automation of ore sorting and calcification in the copper mining process. Nevertheless, this choice emerged from a particle examination-approach, which seems to be more feasible in terms of data gathering and data analysis, rather than other technologies. Moreover, NIR technologies do not present limitations in terms of human safety and security, and the related regulations, compared to other technologies (e.g. X-rays).

CONCLUSION

The necessity to increase the effectiveness and competitiveness of the mining industry (particularly in Chile) by the integration of new technologies is now becoming essential. Starting from this asseveration, the work described in this paper aims to analyze ore sorting technologies, based on a structured and systematic approach. The aim of this work is to provide an initial step for technology analysis required to tackle future mining problems.

This analysis allows to understand that sorting technologies are important in initial stages. Nevertheless, the introduction of these technologies can suffer from a large number of problems related to the current production process in mining industries. Consequently, ore sorting technologies need to be adapted in order to analyze a large quantity of data.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to acknowledge the support of the Centro Científico Tecnológico de Valparaíso (CCTVal FB-0821)

REFERENCES

Bartos, P. J., (2007). Is mining a high-tech industry? Investigations into innovation and productivity advance, Resources Policy,32, 149–158.

CORFO (2010), Mining Cluster in Chile, available on-line at www.unido.org, last accessed July 2013.

Dalm, M., Buxton, M. W., van Ruitenbeek, F. J., & Voncken, J. H. (2014). Application of near-infrared spectroscopy to sensor based sorting of a porphyry copper ore. Minerals Engineering, 58, 7-16.

Garay, V., Schwarz, S., and Donoso, F. (2012) Informe Tendencias Mercado del Cobre-Balance 2011 y Perspectivas 2012-2013. COLCHICO-Dirección de estudios y politicas públicas.

Harbeck, H. and Kroog, H. New Developments in Sensor Based Sorting, Montan University Loeben, Austria, January 18, 2008.

Hilson, G. (2000) Barriers to implementing cleaner technologies and cleaner production (CP) practices in the mining industry: a case study of the Americas, Minerals Engineering, 13(7), 699-717.

Hunt, G. R. (1979). Near-infrared (1.3-2.4) μm spectra of alteration minerals-Potential for use in remote sensing. Geophysics, 44(12), 1974-1986.

Knapp, H., Neubert, K., Schropp, C., & Wotruba, H. (2014). Viable Applications of Sensor-Based Sorting for the Processing of Mineral Resources.ChemBioEng Reviews, 1(3), 86-95.

Lessard, J., de Bakker, J., & McHugh, L. (2014). Development of ore sorting and its impact on mineral processing economics. Minerals Engineering, 65, 88-97.

Mesina, M. B., De Jong, T. P. R., & Dalmijn, W. L. (2003). Improvements In Separation Of Non-Ferrous Scrap Metals Using An Electromagnetic Sensor.Physical Separation in Science and Engineering, 12(2), 87-101.

Pasikatan, M. C., Steele, J. L., Spillman, C. K., & Haque, E. (2001). Near infrared reflectance spectroscopy for online particle size analysis of powders and ground materials. J. Near Infrared Spectrosc, 9(3), 153-164.

Peterson, D. J., LaTourrette, T. and Bartis, J. T. (2001) New Forces at Work in Mining Industry: Views of Critical Technologies, Monograph/Reports, available on-line at www.rand.org.

Rábago, K. R., Lovins, A. B., and Feiler, T. E. (2001). Energy and sustainable development in the mining and minerals industries. IIED report, available on line at www.iied.org, last accessed January 2015.

S.A. P. M. (2006). Manual General de Minería y Metalurgia. Antofagasta: Portal Minero Ediciones

Salter, J. D., & Wyatt, N. P. G. (1991). Sorting in the minerals industry: past, present and future. Minerals Engineering, 4(7-11), 779-796.

Sustainable Development Strategies Group, (2010) Report: current issues in the Chilean mining sector, available on-line at www.sdsg.org.

Tilton, John E. and Landsberg, Hans H. (1999). Innovation, productivity growth, and the survival of the U.S. copper industry. In: Simpson, R.D. (Ed.), Productivity in Natural Resource Industries, 109–39. Resources for the Future, Washington, D.C.

Tulcanaza, E., and Ferguson, G. (2001). The value of information: a guide to the strategic development of projects founded on mineral resource categorization, Transactions of the institution of mining and metallurgy section b-applied earth science, 110, b126-b135.

Van Weert, G., & Kondos, P. (2007). Infrared recognition of high sulphide and carbonaceous rocks after microwave heating. Presentado en Mineral Processors 39th Annual Operators Conference, Ottawa, Canada.

Warhurst, A. and Bridge, G. (1996), Improving environmental performance through innovation: recent trends in the mining industry, Minerals Engineering, 9 (9), 907-921.