



**Universidad
Andrés Bello®**

UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Facultad de Ingeniería

Escuela de Industrias

**SISTEMA ROBÓTICO DE HOMOGENIZACIÓN Y TOMA DE MUESTRA DE
CONCENTRADOS MINERALES**

Tesis de pregrado para optar al título de Ingeniero en Automatización y Robótica

Autor:

David Andrés Ramírez López

Profesor Guía: Felipe Castro Nieny

Santiago de Chile, 2018



**Universidad
Andrés Bello®**

UNIVERSIDAD ANDRES BELLO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INDUSTRIAS

INGENIERÍA EN AUTOMATIZACIÓN Y ROBÓTICA

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD Y PROPIEDAD

Yo, **David Andrés Ramírez López**, declaro que este documento no incorpora material de otros autores sin identificar debidamente la fuente.

Santiago, diciembre de 2018

Firma del alumno

A mi madre que siempre ha dado todo.

A Katherine que ha sido un gran apoyo.

A mi hija, para que se inspire a lograr mas

*A las grandes mentes que han provisto el
conocimiento que ahora tengo y el que queda
por ganar*

1 Contenido

Resumen	10
Abstract	10
2 Antecedentes.....	11
2.1 Introducción.....	11
2.2 Objetivo general.	14
2.3 Objetivos específicos.	14
3 Marco teórico	15
3.1 Estado del arte	15
3.1.1 Homogenización y muestreo.	16
3.1.2 Robots en minería	24
3.2 Descripción de la problemática	26
3.2.1 Impacto del Proyecto	26
4 Hardware utilizado	28
4.1 Sistema robótico.....	28
4.1.1 Manipulador robótico KUKA KR30-3	28
4.1.2 Unidad de control KUKA KRC4:	29
4.1.3 Unidad de programación KUKA SmartPAD	30
4.2 Herramienta de homogenización y muestreo	30
4.3 Bandeja de trabajo	33
4.4 Maquina envasadora Envatek EJP 530	34
4.5 Unidad de control	35
4.5.1 PLC Allen-Bradley Compact Logix 1769-L30ER.....	36
4.6 Sistema neumático.....	38

4.7	Instrumentación de seguridad	39
4.7.1	Relé de seguridad Allen Bradley GuardMaster 440C	40
4.7.2	Chapa de seguridad TLS-GD2	41
4.7.3	Interruptor de parada de emergencia	42
4.8	Software Utilizado	42
4.8.1	KUKA.WorkVisual 4.0.....	42
4.8.2	KUKA.Sim PRO 3.0	43
4.8.3	Studio 5000 Logix Designer.....	45
4.8.4	FactoryTalk View ME	45
5	Desarrollo del proyecto.....	46
5.1	Conceptos básicos de programación de robots.....	46
5.1.1	Tipos de movimiento.....	48
5.1.2	Singularidades.....	49
5.2	Descripción del proceso de Homogenización.....	52
5.2.1	Definiciones prácticas.....	52
5.3	Objetivos del proceso.....	53
5.4	Etapas del proceso.....	53
5.4.1	Filosofía de Operación.....	54
5.4.2	Diagrama de flujo del proceso de Homogenización.....	56
5.4.3	Recepción y primer esparcimiento de material	57
5.4.4	Homogenización	60
5.4.5	Emparejado de material.....	62
5.4.6	Muestreo de material	62
5.4.7	Limpieza de herramienta	65
5.4.8	Limpieza de Bandeja	66

6	Implementación del proyecto	67
6.1	Montaje estructural.....	68
6.2	Montaje eléctrico	69
6.3	Creación de software	71
6.3.1	Programa de manipulador robótico.....	71
6.4	Arquitectura de control	72
6.4.1	Estructura de programa	72
6.4.2	Conectividad Robot-PLC	89
6.4.3	Programa de PLC	92
6.4.4	Programa HMI	96
7	Validación del sistema y resultados	103
7.1	Resultados de pruebas	104
8	Conclusiones	108
9	Referencias.....	109

Ilustración 1 Reportaje del Canal “24 Horas” donde se expone el caso de robo de concentrado de cobre.....	12
Ilustración 2 Esquema del contexto del sistema robótico de homogenización.	15
Ilustración 3 Mezclador V marca Gumma.....	21
Ilustración 4 Seccionador rotatorio marca ELS	22
Ilustración 5 Cortador de rifle marca Labmen Instruments	23
Ilustración 6 Manipulador Robótico KUKA KR30-3	28
Ilustración 7 Unidad KRC4 estándar	29
Ilustración 8 Unidad SmartPad.....	30
Ilustración 9 Herramienta de homogenización. Vista del flange de montaje a la brida del robot.	31
Ilustración 10 Herramienta de homogenización. Vista del mecanismo de la pala JIS-15	32
Ilustración 11 tabla de dimensiones pala estándar. Imagen extraída de la norma ISO-12473, anexo H.....	33
Ilustración 12 Estructura de la bandeja de trabajo. Se aprecia la apertura y cierre de la bandeja.....	34
Ilustración 13 Envatek EJP 530.....	35
Ilustración 14 Modulo 1769-IQ16	37
Ilustración 15 Modulo 1769-OW16	37
Ilustración 16 Plano neumático de la celda robótica.	38
Ilustración 17 Tablero de distribución neumático principal (izquierda) y de sistema de homogenización (derecha).	38
Ilustración 18 Diagrama del circuito de seguridad.....	40
Ilustración 19 GuardMaster 440C.....	40
Ilustración 20 Chapa de seguridad TLS-GD2.....	41
Ilustración 21 Interruptor tipo seta Allen Bradley	42
Ilustración 22 Interfaz del software KUKA.WorkVisual 4.0	43
Ilustración 23 Interfaz de usuario de KUKA.Sim PRO 3.0	44
Ilustración 24 Interfaz de usuario del Software StudioLogix 5000. Se aprecia un proyecto abierto.....	45

Ilustración 25 Sistema de coordenadas utilizado por los robots marca KUKA. Se basa en los Ángulos de Euler	47
Ilustración 26 Movimiento PTP	48
Ilustración 27 Movimiento LIN	49
Ilustración 28 Singularidad α_1	50
Ilustración 29 Singularidad α_2	51
Ilustración 30 Singularidad α_5	51
Ilustración 31 Se muestra la ubicación de los TCP definidos.	54
Ilustración 32 Diagrama de flujo del proceso de homogenización.....	56
Ilustración 33 Esparcimiento de material. Primera fase.	58
Ilustración 34 Esparcimiento de material. Segunda fase.....	59
Ilustración 35 Homogenización. Secuencia de movimientos.....	60
Ilustración 36 Alcance de las secciones en la secuencia de homogenización.	61
Ilustración 37 Malla de muestreo generada aleatoriamente al comienzo del proyecto. La malla propuesta se mantiene hasta que se decida una redistribución de los incrementos.....	63
Ilustración 38 División de la superficie de la bandeja en una matriz de 6x10 espacios.	63
Ilustración 39 Robot en posición de inicio de toma de muestra.....	64
Ilustración 40 Sistema montado para pruebas iniciales de funcionamiento	67
Ilustración 41 Extracto del plano de distribución general de la planta de muestreo de concentrado.....	68
Ilustración 42 Plano unilineal del tablero de fuerza.	69
Ilustración 43 Cuadro de cargas TDF.....	70
Ilustración 44 Tablero de fuerza del sistema robótico.	70
Ilustración 45 Diagrama de arquitectura de control	72
Ilustración 46 Estructura de carpetas del programa de homogenización	73
Ilustración 47 Diagrama de flujo del programa principal.....	75
Ilustración 48 Diagrama de flujo del programa de homogenización	79
Ilustración 49 Ventana de configuración de comunicación <i>EthernetIP</i> del robot... 90	90
Ilustración 50 Ventana de configuración de comunicación <i>EthernetIP</i> del PLC 90	90

Ilustración 51 Pantalla de operación de sistema de homogenización	96
Ilustración 52 Indicador general de estado.....	96
Ilustración 53 Zona Bandeja de Homogenización	98
Ilustración 54 Zona ensacadora	100
Ilustración 55 Zona Operación Manipulado Homogenización	100
Ilustración 56 Operación herramienta de homogenización.....	102
Ilustración 57 Operación de etiquetadora.....	102

Resumen

El presente documento presenta el trabajo de desarrollo de una solución robótica para la homogenización de concentrados de distintos minerales, destinado a plantas mineras que requiera de un proceso de muestreo de productos mineros. El proyecto consiste en un manipulador robótico equipado con una herramienta de doble función que permite la homogenización de material por traspaleo y la toma de muestra de material. El objetivo de esta celda robótica es la de mejorar el proceso de muestreo de minerales al eliminar el factor humano como sesgo en el proceso, reducir la exposición del material a las condiciones ambientales que pueden alterar la muestra, reducir la variabilidad del proceso al realizar la tarea de forma consistente y aumentar la seguridad dentro de las plantas al alejar a los operarios de los concentrados de minerales que presentan altos niveles de toxicidad.

Abstract

This document presents the development work of a robotic solution for the homogenization of different mineral concentrates, destined for mining facilities that require sampling procedures for mining products. The project consists of a robotic manipulator equipped with a multipurpose end-of-arm-tool (EOAT) that allow the homogenization of material through shoveling and sampling of said material. This robotic cell's objective is to improve the sampling procedures via elimination of human factor as process bias, reduction of material exposure to environmental factors that could potentially alter the sample, reduce process variability by creating a consistent work and increase plant safety by keeping humans away of the concentrates which re of high toxicity.

2 Antecedentes

2.1 Introducción

En la actualidad, gran parte del producto minero que se extrae de las minas se comercializa como concentrados de minerales. Este concentrado contiene muchos constituyentes además del mineral mismo, incluso conteniendo grandes cantidades de agua, dependiendo del proceso de chancado y post-procesamiento. Sin embargo, los compradores de concentrados solo les interesa pagar solo por el valor del mineral deseado. Es por esta razón que para la industria minera es de fundamental importancia la tarea de toma de muestra. Esto permite saber la composición de los sustratos que contienen los concentrados y con ello las mineras pueden valorizar sus productos.

Otra de las razones por la que la toma de muestra es tan importante es para el control y prevención de robo de material en la etapa de transporte.

Un caso conocido de robo de concentrados se dio en la fundición Potrerillos, perteneciente a Codelco, donde, durante el transporte, se reemplazó el contenido de los camiones con concentrados de cobre provenientes de Minera Escondida (BHP) con relaves de hierro y cemento. Con más de 4000 toneladas de concentrado de cobre perdidos, Codelco avaluó el robo en las de U\$10,4 millones. Esto podría haberse evitado si se hubiesen realizado los procesos de muestreo a la entrada y salida de los cargamentos. Así, teniendo una muestra de salida del material transportado y una contra muestra extraída en el lugar de destino, es posible saber si han existido manipulaciones de terceros en el contenido de los cargamentos.



Fiscalía desbarata banda que robaba concentrado de cobre

Al menos 15 personas han sido formalizadas por el delito de robo con bienes nacionales de uso público y asociación ilícita. No se descarta que se realicen nuevas detenciones.



Karla Gallardo
© 24.02.2014

La **Fiscalía de Atacama**, junto a la **Brigada de Investigación Criminal de la PDI de Chañaral**, logró desbaratar una **banda** y que desde el **2011** se dedicaba a **robar concentrado de cobre** perteneciente a una empresa minera.

Hasta el momento, son **15 los detenidos** formalizados por el delito de **robo con bienes nacionales de uso público y asociación ilícita**. Sin embargo, no se descarta que se realicen **nuevas detenciones**, ya que al menos son **25 las personas** que participaron, en distintos grados, en los hechos.

La sustracción de material se realizaba desde los camiones mineros pertenecientes a una empresa de la **región de Antofagasta**, el cual estaba

Ilustración 1 Reportaje del Canal “24 Horas” donde se expone el caso de robo de concentrado de cobre.

La estandarización de los procesos de toma de muestra se realizó hace relativamente poco tiempo, siendo la primera versión de la norma ISO referente al tema en el año 2006. Por este motivo, en muchas partes del mundo aún se aplican métodos poco rigurosos para realizar el trabajo mientras que en otras partes la

implementación de procedimientos de muestreo correctos se encuentra aún en curso. Es para este grupo objetivo que la empresa chilena MI Robotics Solutions (MIRS) ha decidido desarrollar soluciones robóticas de muestreo enfocadas a la minería, siendo pioneros en el tema.

La primera incursión de MIRS en el área del muestreo nació con el muestreador de maxisacos en la planta MOLYMET, seguido del muestreador de maxisacos en la planta MOLYB. Luego, se desarrolló el muestreador robótico de camiones para la fundición potrerillos, el cual fue replicado en la planta de acopio de Impala Terminals en El Callao, Perú.

Como parte del desarrollo continuo de soluciones robóticas, MIRS decidió desarrollar como complemento a los muestreadores de maxisacos y de camiones una solución robótica para la homogenización de las muestras de concentrado, desarrollo que es presentado como tema de este documento.

Con el desarrollo del manipulador robótico de homogenización, el sistema de muestreo de MIRS se acerca un paso más a ser una solución integral de los procesos de muestreo.

En el presente documento se presenta el desarrollo de una celda robótica de homogenización de concentrado de cobre, que corresponde a una de las etapas más importantes en la tarea de realizar toma de muestras representativas.

2.2 Objetivo general.

- Desarrollar una solución robotizada para la homogenización y toma de muestra de concentrados de cobre y otros minerales.

2.3 Objetivos específicos.

- Replicar los procesos de homogenización y muestreo manual actualmente utilizados en plantas concentradoras y de acopio de concentrados minerales.
- Validar el diseño de una herramienta para un manipulador robótico que se utilice en la homogenización de concentrado de cobre y la toma de muestra.
- Describir la instrumentación operacional y de seguridad que requiere la celda robótica de homogenización
- Revisar el proceso de homogenización de acuerdo con las normativas internacionales de muestreo de minerales
- Validar la efectividad de un sistema robótico para la replicación del proceso.

3 Marco teórico

3.1 Estado del arte

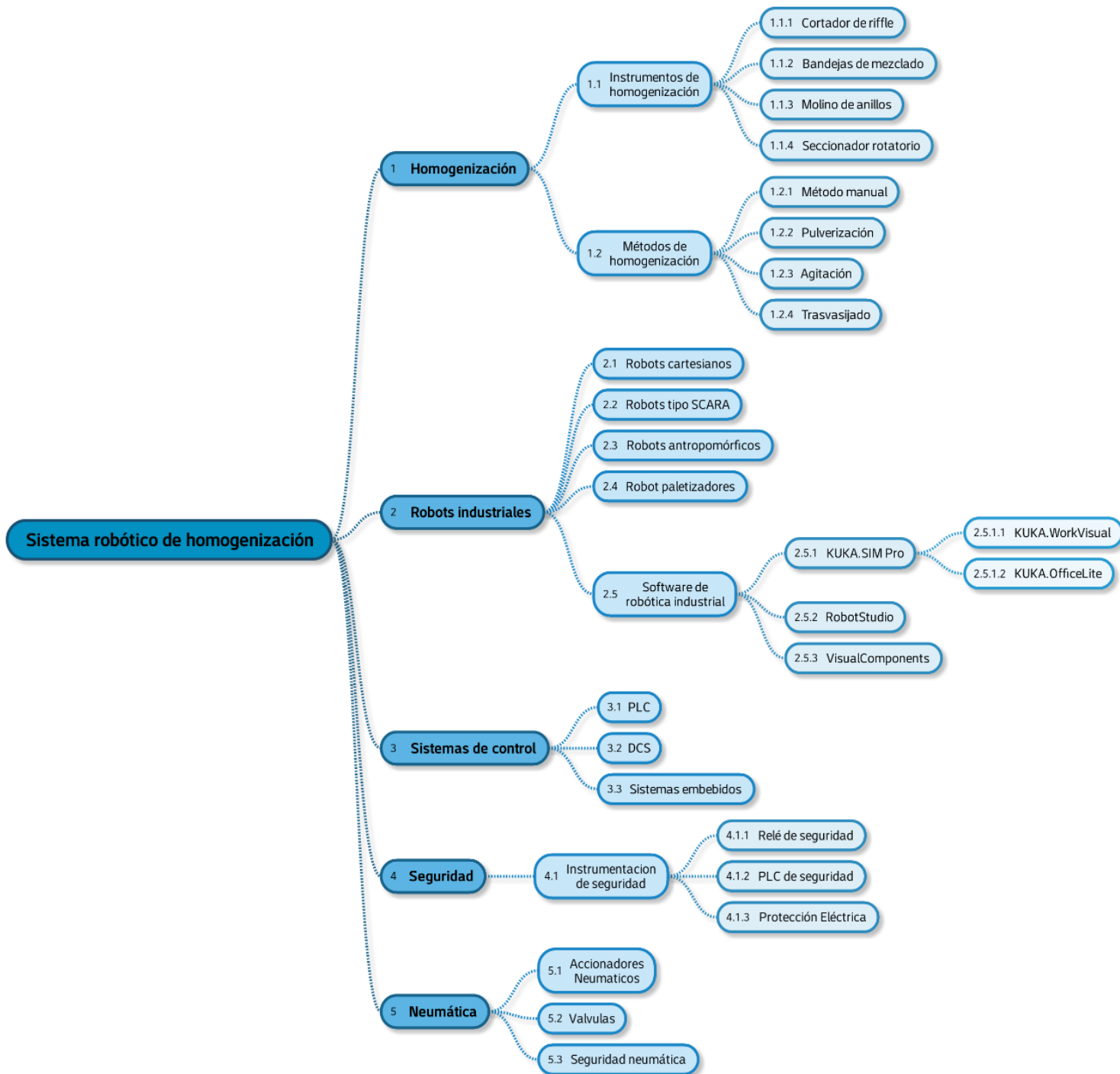


Ilustración 2 Esquema del contexto del sistema robótico de homogenización.

3.1.1 Homogenización y muestreo.

La homogenización de materiales corresponde al proceso por el cual una sustancia alcanza la homogeneidad de sus componentes. Se considera homogénea una sustancia cuando la distribución de sus constituyentes es igual en todo su volumen.

En el análisis de materiales discretos, como los concentrados minerales, la homogeneidad es alcanzada cuando la probabilidad de extraer una partícula constituyente dada es la misma para todo el resto de las partículas. Lo contrario es la heterogeneidad.

El muestreo es la actividad por la cual se extrae una cantidad reducida de material desde un origen de gran volumen y masa. Esto con el propósito de lograr un volumen manejable para realizar variados ensayos de laboratorio y así poder caracterizar el material según su composición, granulometría, nivel de humedad, entre otros.

El muestreo es una actividad fundamental para los procesos mineros puesto que permite conocer las características de los productos logrados tras las distintas etapas extractivas y de transformación de minerales.

El estado actual de las teorías sobre muestreo se basa casi exclusivamente en los trabajos de Pierre Maurice Gy. Él fue ingeniero químico y doctor en física y matemáticas, que dedicó su carrera al estudio y desarrollo de las metodologías, técnicas y estadísticas de toma de muestras y el análisis de estas. En sus distintos trabajos, Gy formaliza los conceptos de lote, conjunto, unidad, muestra e incremento, homogeneidad y heterogeneidad de muestra, entre otros, que son los bloques fundamentales para el análisis de materiales discretos.

3.1.1.1 Definiciones formales

Gy define formalmente los siguientes conceptos:

- **Constituyentes:** la unidad operativa más pequeña que posee propiedades autónomas e inalterables por las condiciones físicas, químicas y mecánicas

del muestreo. Gy ejemplifica como fragmentos en sólidos y moléculas en líquidos y gases.

- **Lote:** un conjunto de unidades.
- **Conjunto:** una población de unidades no ordenadas o una serie de unidades ordenadas.
- **Unidad:** un único constituyente o un grupo colindante de constituyentes
- **Incremento:** un grupo de constituyentes colindantes extraídos de un lote al mismo tiempo, en una sola operación.
- **Muestra:** subconjunto de un lote, de elementos seleccionados correctamente
- **Submuestra:** subconjunto seleccionado de una muestra anterior.
- **Espécimen:** subconjunto de un lote, de elemento seleccionados de forma no correcta.
- **Muestreo:** reducción sistemática de masa de un lote a través de la selección de un subconjunto de unidades.
- **Selección probabilística:** cuando todos los constituyentes tienen probabilidad de ser seleccionados.
- **Selección no probabilística:** cuando algunos constituyentes tienen cero probabilidades de ser seleccionados
- **Muestreo correcto:** cuando se cumple simultáneamente que, todos los constituyentes tienen la misma probabilidad de ser seleccionados y que los constituyentes seleccionados mantengan su integridad.
- **Muestreo incorrecto:** si no se cumple alguna de las condiciones de muestreo correcto
- **Muestreo no correcto:** cuando el muestreo es o no probabilístico o no probabilístico incorrecto.

La teoría de muestreo parte de la base de que los materiales a muestrear sean perfectamente homogéneos. Esto significa que, para cualquier sección del material, todos los elementos constituyentes tengan la misma probabilidad de ser seleccionados en un incremento cualquiera. En definitiva, para poder realizar un

muestreo correcto, no deben existir zonas del material que tengan concentraciones distintas de los elementos constituyentes.

Sin embargo, la realidad es que los materiales son esencialmente heterogéneos en su composición debido a distintos procesos, tanto físicos como químicos. La estratificación por gravedad, aglomeración por humedad, variabilidad granulométrica, viscosidad, entre otras, son las razones por las que los materiales no son homogéneos.

El objetivo del proceso de homogenización es el de poder reducir al mínimo estas heterogeneidades, a fin de cumplir con la premisa de la teoría de muestreo.

Desde un punto de vista matemático, la heterogeneidad de un sustrato se cuantifica por la varianza entre los incrementos extraídos. Se entiende por esto como las diferencias en la composición y proporción de cada incremento. Si para cualesquiera dos incrementos tomados aleatoriamente de la sustancia analizada la varianza en los resultados de composición tiene a cero, se dice que la sustancia es homogénea.

3.1.1.1.1 Sesgos de procesos

Al realizar el proceso de muestreo y homogenización uno de los más grandes problemas que se presentan es la introducción de sesgos en la muestra. Por sesgo se entiende como alteraciones en la distribución que generan segregaciones y/o cambios en la composición de los sustratos constituyentes introducidos por la herramienta o el proceso utilizado.

Ejemplo de esto puede ser una compresión de material producido por la herramienta, un proceso repetitivo que genere depósitos en un sector particular, contaminación cruzada, pérdida de humedad producto de una exposición excesiva al aire, entre otros. En base a esto, se entiende que no es posible realizar una toma de muestra perfectamente libre de sesgos. Sin embargo, se deben hacer todos los esfuerzos posibles por minimizar la introducción de estas alteraciones, lo que conforma la base para el diseño de procedimientos estandarizados de muestreo.

Dentro de las opciones que se aceptan como factores de reducción de sesgo se tiene:

- Utilizar herramientas certificadas para los procesos de muestra fabricadas bajo las normas internacionales por empresas validadas
- Procurar la limpieza exhaustiva de las herramientas
- No utilizar herramientas en mal estado
- Procurar que los procesos sea lo más aleatorios posibles o en su defecto hacer cambios en los procesos constantemente
- Asegurar que las herramientas por diseño sean capaces de extraer todo el material donde son insertadas y evitar cualquier pérdida de material en los traslados
- Mantener siempre limpios los contenedores
- Verificar periódicamente que los procesos no estén agregando sesgos a largo plazo producto del desgaste de las herramientas e instrumentos.

3.1.1.2 Caracterización de muestra

Para verificar que las distintas muestras finales tomadas desde un lote sean válidas se debe realizar un seguimiento de la varianza total entre las muestras.

Una muestra se considera valida si la varianza total es menor a cierto porcentaje de conformidad, definido por quien hace la evaluación. El valor de este rango de aceptación generalmente es un parámetro de calidad de cada empresa, por lo tanto, las empresas suelen mantener este valor en secreto.

La varianza se calcula entre las muestras realizadas, utilizando la siguiente formula:

$$s_{b_i}^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2}{n_i} - s_{p_A}^2 \quad (1)$$

Donde $s_{b_i}^2$ es la varianza de la muestra, x_j es el resultado del análisis de la muestra j , n_j es el número de incrementos de la muestra j y $s_{p_A}^2$ es la varianza de los procesos subsiguientes. Como el sistema robótico de homogenización corresponde a la etapa final de muestreo, el termino $s_{p_A}^2$ tiene un valor de 0 para este caso.

3.1.1.3 Instrumentos de muestreo y homogenización

Debido a la gran variedad de materiales existentes en la industria que requieren muestreo, se han desarrollado con los años múltiples instrumentos para la toma de muestra y homogenización. De ellos, solo para algunos se ha podido demostrar que no introducen sesgos en la toma de muestra por lo que las normas de muestreo solo permiten el uso de dichos instrumentos. Para casos especiales en lo que se requieren herramientas específicas, se debe demostrar a través de ensayos de laboratorio, que no se introducen sesgos en la toma de incrementos. Métodos de homogenización. Los procedimientos para la evaluación del sesgo de una herramienta o proceso se detallan en la norma ISO-13292.

La homogenización es una de las operaciones que se pueden realizar para reducir la varianza de un sustrato consistente en una mezcla de sustancias discretas constituyentes. Esto se logra al redistribuir los constituyentes del sustrato de forma tal que estos queden uniformemente agrupados.

Existen varias formas de realizar la homogenización dependiendo de las condiciones operativas del lugar donde se realizará. Puede ser con un instrumento mecánico, por procesos consecutivos de división y recombinación, por procedimientos de remoción.

Las maneras más efectivas para realizarlo implican el uso de mezcladores mecánicos que realizan la tarea sin intervención humana. Dentro de los instrumentos mecánicos que se utilizan para realizar la homogenización se encuentran los mezcladores en V, el seccionador rotatorio y los cortadores de rifle.

El mezclador en V consiste en un contenedor construido con dos cilindros interceptados en un extremo, tomando forma de V. Este contenedor se encuentra montado sobre un eje giratorio perpendicular al eje de simetría del contenedor de forma que la rotación permita un movimiento por gravedad del sustrato introducido entre el punto de intersección de los cilindros y los extremos libres. En el interior, se ubican paletas revolventoras que incrementan la movilidad de las partículas de sustrato.

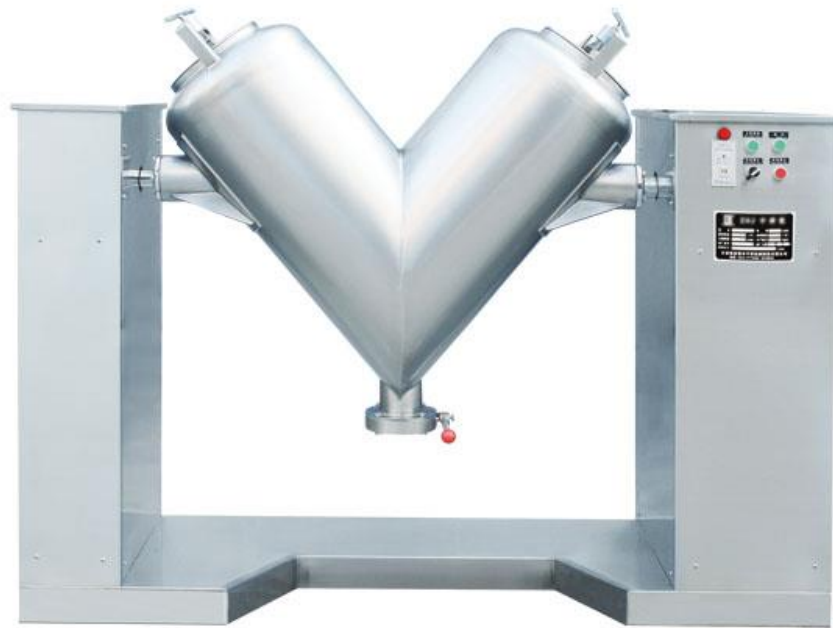


Ilustración 3 Mezclador V marca Gumma

El seccionador rotatorio se compone de una tolva de entrada de material y un tambor cilíndrico rotatorio con contenedores distribuidos radialmente, de forma que la circunferencia del tambor quede seccionada de forma regular. A medida que el material cae de la tolva, el tambor rotatorio va cortando el flujo de material a una velocidad constantes de forma que cada contenedor reciba la misma cantidad de material. Adicionalmente, el equipo puede incluir sistemas de vibración que permitan facilitar la caída de material. Los contenedores del tambor son retirables y cada uno de ellos representa una submuestra. La velocidad tangencial del tambor en el punto donde intercepta el flujo de material con los contenedores no debe superar los 0.6 m/s de acuerdo con la norma ISO-12473.



Ilustración 4 Seccionador rotatorio marca ELS

El cortador de rifle consiste en un contenedor rectangular con chutes de salida intercalados a ambos lados, un recipiente o bandeja de entrada y dos bandejas de salida de material. Los chutes a cada lado poseen una tapa que se abre simultáneamente, permitiendo el flujo de material de forma equitativa hacia ambas bandejas de recepción. El cortador de rifle es un aparato no solo de mezclado sino también de división de material, siendo válido para una operación de reducción y muestreo de material. En modelos para división continua de un flujo de material, la tapa de los chutes puede no estar presente.

La alimentación del cortador puede ser realizada por un operador que carga la bandeja de entrada o puede ser ubicado bajo un flujo de material en caída libre, permitiendo una alimentación automática. Dependiendo del modelo, la apertura de

la tapa de los chutes puede ser manual o por un accionamiento eléctrico o neumático. En cualquiera de los casos, la intervención humana no se encuentra en el proceso mismo de división.



Ilustración 5 Cortador de rifle marca Labmen Instruments

En casos en los que el material a homogenizar se constituye de varios sustratos de granulometrías muy distintas, es válido realizar la homogenización por medio de molinos pulverizadores que muelen todos los sustratos hasta dejarlos con la misma granulometría y simultáneamente realizan la homogenización del material. Esto solo es posible si el cambio en la granulometría no altera las propiedades físicas y/o químicas del sustrato o cuando no se requiere una muestra de humedad.

A pesar de la existencia de los instrumentos mencionados y la insistencia en la norma ISO de preferir estos métodos, en la mayoría de las plantas se siguen aplicando los métodos tradicionales de muestreo, que consisten principalmente del método de cuarteo y el muestreo con lanza.

De forma adicional a los métodos mencionados, la norma ISO 12743 referente a los procesos de muestreo para concentrados de cobre, zinc, níquel y otros materiales agregados, habla de que es posible realizar procedimientos de homogenización distintos a los mencionados en ella, siempre y cuando se demuestre a través de

ensayos de laboratorio que estos no inducen sesgos en las mediciones. Estos ensayos se detallan en la norma ISO 13292.

3.1.2 Robots en minería

En la industria minera existe un creciente interés en el desarrollo de sistemas robóticos para mejorar los procesos mineros y reducir los riesgos a los cuales operadores y mantenedores se encuentran expuestos. Esto debido a que los costos asociados a estos dos temas son considerablemente altos.

Por el lado de la seguridad, las plantas mineras presentan una enorme cantidad de elementos de riesgo, desde materiales dañinos para la salud, hasta maquinarias extremadamente peligrosas, todos estos elementos que ponen en riesgo la salud y la vida de los operarios y además presentan un riesgo a la operación de la planta puesto que incidentes y accidentes implican una detención total o parcial de las operaciones.

Por otro lado, la productividad de las plantas mineras siempre está sujeta a mejoras en los procesos como aumentos en los volúmenes de producción, la eficiencia de los procesos o una reducción de los tiempos de detención producidos por mantenciones.

Es debido principalmente a estos dos motivos que la robótica ha estado cobrando cada vez más relevancia dentro del campo de la minería. Las soluciones robóticas permiten mejorar los procesos al aumentar la calidad de las tareas realizadas al darle consistencia a los procesos y aumentando la productividad reduciendo los tiempos muertos en la operación. También aumentan la seguridad en planta realizando labores que son peligrosas para los operadores, como el manejo de herramientas pesadas, la manipulación de materiales peligrosos o al eliminar la necesidad de que existan personas dentro de zonas de alto riesgo.

En la actualidad los desarrollos robóticos en la minería se han enfocado principalmente en el manejo de cargas y la exploración minera de forma autónoma. Un ejemplo de esto es Rio Tinto, que en la mina australiana West Angelas tiene instalada y operando una flota de 73 camiones autónomos Komatsu 980E

autónomos trabajando 24/7 desde 2008 y actualmente se encuentra trabajando en la instalación de sistemas ferroviarios autónomos para el transporte de la carga en largas distancias.

A pesar de estos avances la robótica aun no sido ampliamente insertada en procesos mineros, por lo que el espacio para el desarrollo de soluciones se encuentra disponible a quienes estén dispuestos a invertir en ello.

En Chile, la empresa MI Robotic Solutions, conocida como MIRS, parte del holding HighService Corp, es pionera en el desarrollo de tecnologías robóticas para la minería, con proyectos emblemáticos como la despegadora de láminas iniciales en la División Ventanas de Codelco, el intercambiador de palmetas de Trómel en Minera Escondida, el muestreador de Maxi sacos de molibdeno en la planta Molyb y el muestreador de camiones de concentrado de cobre en la fundición Potrerillos de Codelco.

Este último proyecto ha tenido un creciente interés para distintas mineras tanto chilenas como extranjeras. La razón es que el proceso de muestreo es uno de los eslabones más débiles en la cadena productiva a lo largo y ancho de la industria, debido principalmente a la falta de procedimientos rigurosos de muestreo. La aparición de la máquina muestreadora de camiones presenta una solución efectiva y eficiente para la ardua y fundamental tarea de caracterizar la producción minera. Presentado como una evolución natural del muestreador de Maxi sacos de molibdeno, el poder muestrear directamente del camión permite obtener resultados más exactos en la medición de concentraciones al realizar la muestra antes de que el material se vea afectado por factores externos como contaminación cruzada, exposición excesiva al ambiente, segregación gravitacional de partículas de diferente granulometría, entre otros. Otra de las razones por la que la máquina es tan ventajosa respecto de procesos de muestreo tradicionales es que permite extraer un testigo completo de la carga del camión, cosa que no es posible realizar con las herramientas de muestreo tradicionales debido a su alcance y a que un operador humano no posee las capacidades físicas necesarias para poder insertar la lanza de muestreo completa.

3.2 Descripción de la problemática

Las transacciones de concentrados se realizan únicamente por el mineral en compra. Como los concentrados contienen una baja ley del material que se transa, es importante poder determinar la concentración de mineral que posee el concentrado. Esto también implica el determinar el nivel de humedad que posee el contenido, con tal de precisar los costos de las operaciones.

Por otra parte, el robo de concentrado de minerales es una problemática seria para la minería mundial y para Chile en particular con el concentrado de cobre, donde ha habido casos de pérdidas de varios millones de dólares. El robo se realiza generalmente desviando los camiones de transporte del material a algún sector retirado, donde se procede a cambiar el concentrado por otros materiales sin valor.

Para lograr esto, las mineras productoras y fundiciones compradoras de concentrado han tenido que implementar operaciones de muestreo para los materiales que se transportan a fin de realizar pruebas de laboratorio que permitan determinar la concentración de material transado. El proceso se realiza tradicionalmente de forma manual, utilizando mucho tiempo y labor humana, además de crear situaciones en las que la toma de muestras no es correctamente ejecutada, introduciendo errores en los valores finales de las pruebas de laboratorio.

3.2.1 Impacto del Proyecto

La empresa chilena MI Robotics Solutions S.A. requiere del desarrollo de una celda robótica de homogenización para complementar su solución de muestreo robótico de camiones. La celda robótica debe ser capaz homogenizar una cantidad variable de concentrado de molibdeno de entre 30 y 50 [kg] y luego realizar una serie de submuestras que serán envasadas y posteriormente enviadas a laboratorio para distintas pruebas.

El objetivo de este equipo es el de reducir el tiempo de las operaciones de muestreo, que deben realizarse camión a camión, a la salida de la minera y en cada destino intermedio que pueda tener el material a la vez que se mejora la calidad de la

muestra final al darle consistencia al proceso eliminando sesgos introducidos por el procedimiento tradicional y la interacción humana.

Se espera que, con este desarrollo, las capacidades del equipo de muestreo de la empresa MIRS mejoren enormemente, creando un producto más completo, eficaz y atractivo para los múltiples actores en la minería que están interesados en la tecnología robótica como medio de innovación y mejora de procesos.

4 Hardware utilizado

4.1 Sistema robótico

El sistema robótico se compone de tres partes principales las cuales son el manipulador robótico, el controlador y la unidad de interfaz de usuario.

4.1.1 Manipulador robótico KUKA KR30-3



Ilustración 6 Manipulador Robótico KUKA KR30-3

El manipulador robótico KUKA KR30-3 es un sistema robótico antropomórfico de seis ejes, perteneciente a la serie Medium Load, línea robots enfocada en la velocidad de operación, alta repetibilidad y tamaño reducido. Junto a las muchas variantes de montaje y operación, es una línea enfocada en el manejo de cargas medias de entre 15 a 60 [Kg], siendo capaz de realizar una gran parte de los trabajos ejecutados por operadores humanos. El modelo KR30-3 tiene un alcance de 2033 [mm] y una carga útil de 30 [Kg]

4.1.2 Unidad de control KUKA KRC4:

La unidad KRC4 es la edición estándar del controlador para la última generación de robots industriales KUKA que funcionan sobre la plataforma KSS 8.X.X. Proporciona todo el equipamiento necesario para alimentar, comunicar y controlar los manipuladores KUKA.

La versión estándar del controlador KRC4 está pensada para integrar de forma fácil y económica los robots KUKA de las líneas *Small Robots* y *Medium Robots*, un grupo de soluciones especialidad en la velocidad de operación y precisión de movimiento.



Ilustración 7 Unidad KRC4 estándar

El controlador se compone de una unidad de procesamiento basado en un PC de arquitectura X86-64 con una versión especializada de Windows 7 Embebed, la instrumentación de electrónica de potencia para alimentación del manipulador y las variadas interfaces de comunicación, seguridad y de entradas y salidas disponibles para el KRC4.

El software de control que provee la interfaz gráfica de usuario y permite la operación del manipulador se ejecuta sobre el sistema Windows de forma paralela. La denominación de este software es *KUKA System Software* o KSS, el cual es un sistema operativo en tiempo real (RTOS) basado en *VxWorks*. La versión utilizada del software es **KSS 8.3.3**.

4.1.3 Unidad de programación KUKA SmartPAD



Ilustración 8 Unidad SmartPad

La unidad SmartPAD es la versión para KR C4 del KCP o **“KUKA Control Panel”**. Es un dispositivo HMI diseñado para controlar y programar los sistemas robóticos KUKA. Consiste en un dispositivo portátil con pantalla táctil de 8.3 [in], botones físicos para control de ejes y movimientos cartesianos, mouse 6D para control háptico del manipulador, parada de emergencia y pulsadores de hombre muerto como sistema de seguridad.

Al conectar la unidad SmartPAD con el KR C4 se inicia la interfaz del software KSS, presentando al usuario las opciones de control para todas las funciones del robot.

El sistema incluye, entre otros elementos, un editor de texto para crear, analizar, modificar y administrar los programas del robot; acceso a las configuraciones de red, de máquina y de seguridad del robot; monitor de variables de programa y de sistema; acceso a utilidades de servicio y mantenimiento.

También es posible acceder a la interfaz de Windows para realizar tareas de mantenimiento y configuración avanzadas.

4.2 Herramienta de homogenización y muestreo

La estructura básica de la herramienta de homogenización consiste en una paleta que incorpora en uno de sus lados una pala de muestreo conectada a un mecanismo que le permite retraerse por medio del accionamiento de un cilindro neumático. El

cuerpo de la herramienta y las partes del mecanismo accionador están hechas en acero inoxidable, los bujes de los ejes son de bronce.

El cilindro neumático tiene una carrera de 35 [mm] y un diámetro de embolo de 25 [mm], operando a una presión de 6 [bar]. Este cuenta con dos sensores para la detección de final de carrera y es comandada por una válvula 3/2 de pilotaje eléctrico y retorno por resorte.

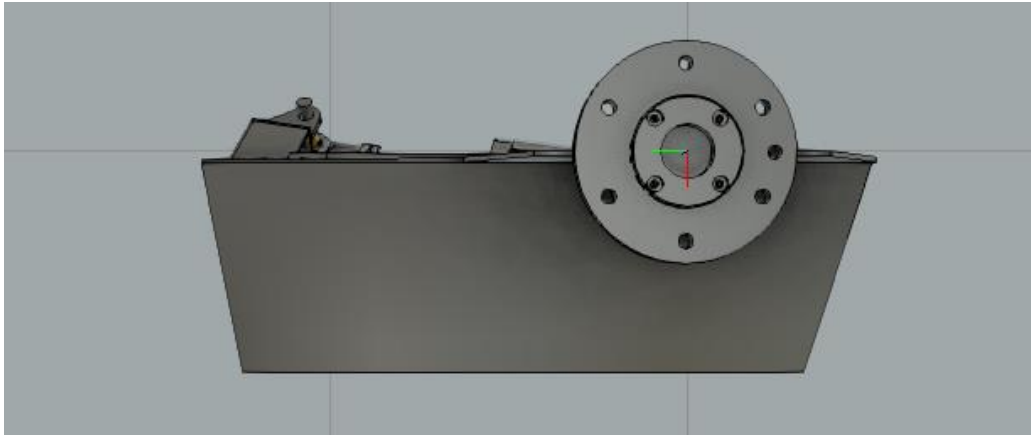


Ilustración 9 Herramienta de homogenización. Vista del flange de montaje a la brida del robot.

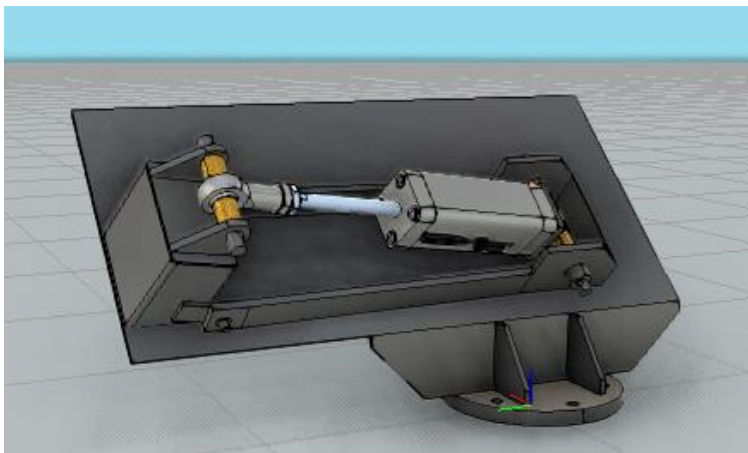
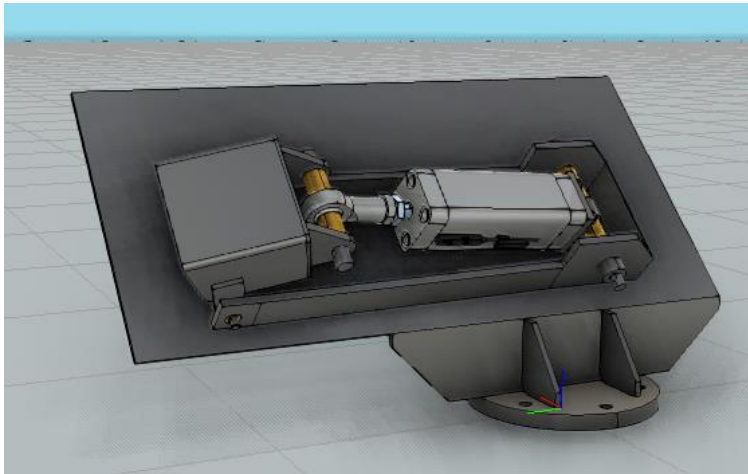


Ilustración 10 Herramienta de homogenización. Vista del mecanismo de la pala JIS-15

La pala de muestreo es un diseño estandarizado por la norma japonesa JIS-8100 y reconocida internacionalmente en la norma ISO 12743.

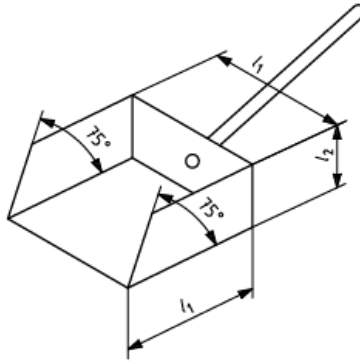


Figure H.1 — Example of an increment scoop

Table H.1 — Minimum dimensions of increment scoops

Dimensions in millimetres

Scoop number	Nominal top size of sample	Thickness of spread sample	Minimum dimensions	
			l_1	l_2
20	u 22,4 mm	35 – 45	80	45
15	u 16,0 mm	30 – 40	70	40
10	u 10,0 mm	25 – 35	60	35
5	u 5,00 mm	20 – 35	50	30
3	u 2,80 mm	15 – 25	40	25
1	u 1,00 mm	10 – 20	30	15
	u 250 µm	5 – 10	20	10

Ilustración 11 tabla de dimensiones pala estándar. Imagen extraída de la norma ISO-12473, anexo H

El concepto de funcionamiento de la pala de muestreo es el de una mandíbula que se cierra con el accionamiento del cilindro. El diseño de la pala es una adaptación del mostrado en la norma, realizado con el cuidado de no alterar la geometría original.

4.3 Bandeja de trabajo

La operación de homogenización se realiza sobre una bandeja de trabajo con un fondo retráctil de forma tal que el material restante sea descartable y que la bandeja quede limpia y operativa de forma automática. Adicionalmente, la bandeja de trabajo se encuentra soportada por celdas de carga, lo que permite medir continuamente el peso del material

El accionamiento de la compuerta de la bandeja se realiza con un cilindro neumático de carrera XX y diámetro de embolo de XX, a una presión de 6 [bar]. El cilindro cuenta con dos sensores para detectar final de carrera y es comandada por una válvula 5/3 con pilotaje eléctrico.

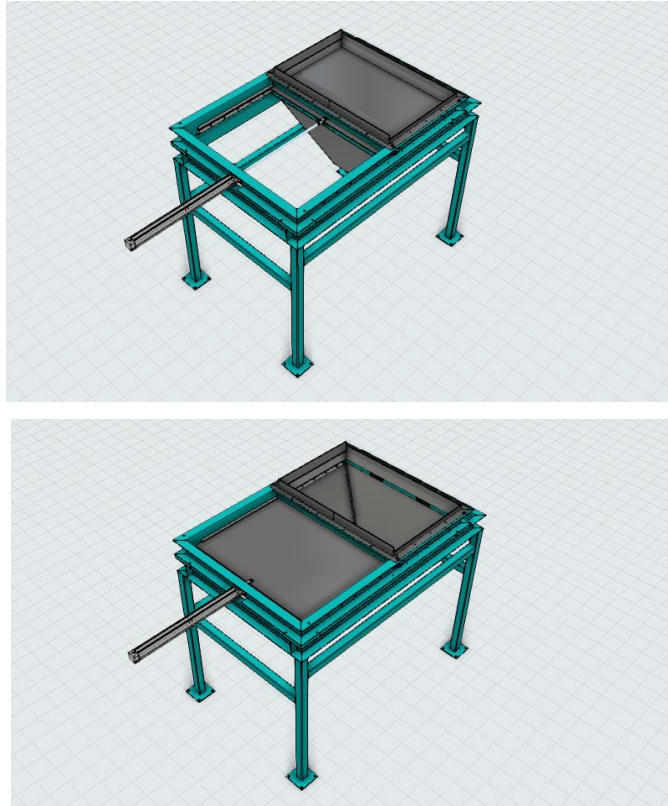


Ilustración 12 Estructura de la bandeja de trabajo. Se aprecia la apertura y cierre de la bandeja.

4.4 Máquina envasadora Envatek EJP 530

La envasadora EJP 530 de Envatek es parte de la línea compacta de envasadoras continuas verticales. Las bolsas se hacen a partir de un rollo de film de polietileno con distintos aditivos para obtener distintas propiedades de elasticidad, resistencia, adherencia y durabilidad. Las dimensiones de las bolsas hechas por la máquina son ajustables. El ancho de la bolsa está determinado por el ancho del film y se mueve en el rango de 70 a 250 [mm]. El largo máximo de la bolsa viene determinado por el largo de la mordaza de sellado integrado en la máquina y se mueve en el rango de 50 a 320 [mm].



Ilustración 13 Envatek EJP 530

El sellado de bolsas se realiza con 3 mordazas térmicas, dos horizontales y una vertical. La temperatura de las mordazas es regulada por un controlador de temperatura dedicado para cada una. La velocidad de envasado varía dependiendo de las configuraciones de tiempo de sellado.

4.5 Unidad de control

El objetivo de la celda robotiza es el de incorporarlo a los sistemas muestreadores de concentrado, por lo que su operación está supeditada a los procesos anteriores. Por esto y por motivos técnicos y de implementación, la celda robótica es gobernada por un PLC que actúa como unidad de control superior, indicando al manipulador robótico que rutinas realizar y manejando los elementos de instrumentación y accionamientos externos al robot, incluyendo los elementos de seguridad que incluye la celda.

4.5.1 PLC Allen-Bradley Compact Logix 1769-L30ER



La serie Compact Logix de Allen-Bradley representa la línea media de controladores que ofrece su catálogo. Se caracteriza por un alto grado de integración de dispositivos, facilitando la configuración de los varios módulos disponibles, simplificando las tareas de montaje y comisionado. Cuenta con un entorno unificado de programación en el software StudioLogix 5000. Además de módulos de entradas y salidas digitales y analógicas, la serie Compact Logix incluye módulos de comunicación para una amplia variedad de protocolos como DeviceNet, CANBus, DeviceLink, Profibus, EthernetIP, entre otros; módulos contadores, temporizadores, interfases de encoder y drives de motores. La serie ofrece todo lo necesario para el control de plantas de pequeña a media escala manteniendo costos bajos.

El controlador seleccionado es el modelo L30-ER perteneciente a la familia de controladores 5370. Posee 1 [Mb] de memoria de programa expandible a 2 [Gb] por medio de una tarjeta SD estándar, permite conectar hasta 8 módulos a través un bus *Virtual Backplane* por lo que no requiere de un rack de montaje físico, puede crear una subred CIP EthernetIP de hasta 16 nodos, viene equipado con un puerto USB 2.0 para conectividad RS-232 y cuenta con dos puertos RJ-45 en modo bridge para comunicación en red.

4.5.1.1 Módulos utilizados

La integración del sistema requiere del uso de dos módulos, uno de entradas digitales y otro de salidas digitales.

Para las entradas digitales se utiliza el módulo 1769-IQ16, que ofrece 16 canales configurables como Sink o Source según se requiera, funcionando en 24 [V_{DC}].



Ilustración 14 Modulo 1769-IQ16

En el caso de las salidas digitales se utiliza el módulo 1769-OW16, con 16 canales de salidas por relé, lo que ofrece aislación del circuito y permite alimentar los actuadores con una alimentación independiente en 24 [V_{DC}].



Ilustración 15 Modulo 1769-OW16

4.6 Sistema neumático

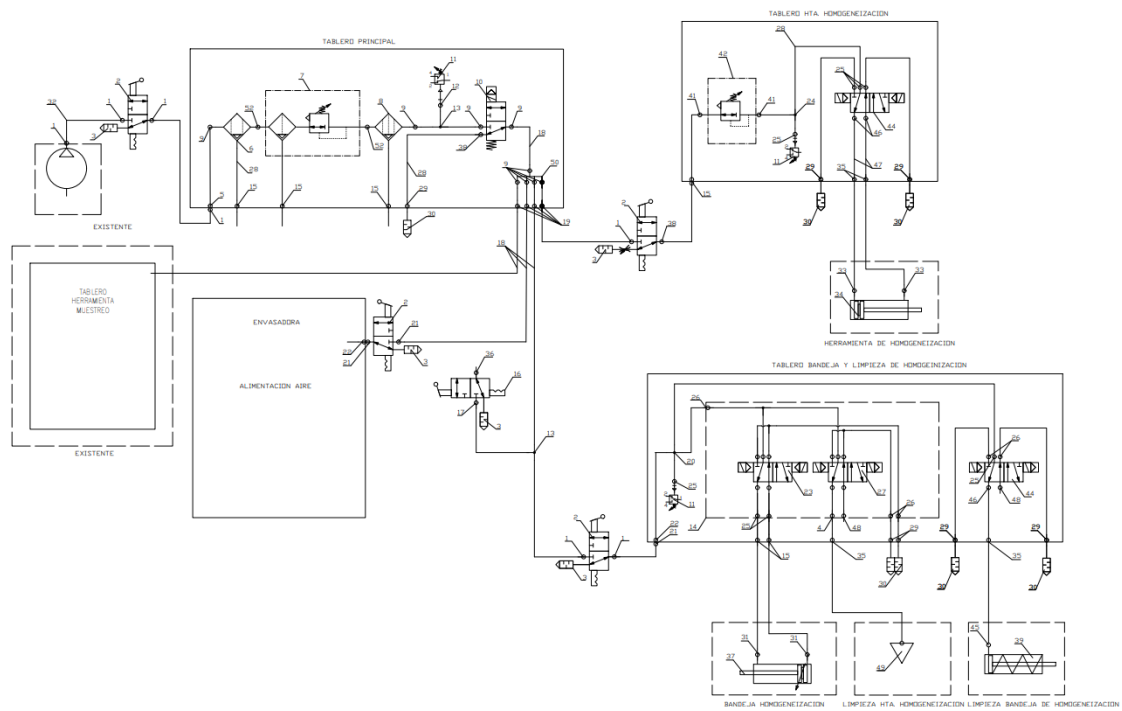


Ilustración 16 Plano neumático de la celda robótica.



Ilustración 17 Tablero de distribución neumático principal (izquierda) y de sistema de homogenización (derecha).

El circuito neumático del sistema consiste en la etapa de distribución principal, que incluye un bloque FRL (filtrado, regulación, lubricación), un presostato que indica la presencia de aire en el sistema y una válvula check de retención de presión, en caso de corte inesperado. La alimentación del sistema es externa, con aire de planta a una presión de al menos 6 [bar] y un máximo de 10 [bar]. El regulador está limitando la presión a 6 [bar]

El tablero de actuadores neumáticos del sistema cuenta con un presostato que indica la existencia de presión, una válvula neumática 5/3 biestable con acción por solenoide y dos válvulas 3/2 monoestables con acción por solenoide y retorno por resorte.

La herramienta de homogenización contiene un cilindro neumático doble efecto de carrera 80 [mm], marca FESTO. La bandeja de homogenización tiene un cilindro doble efecto carrera 800 [mm] marca FESTO.

4.7 Instrumentación de seguridad

La celda robótica representa un alto riesgo para las personas cuando se encuentra en operación, por lo que debe incorporar sistemas de seguridad adecuados.

Las señales de seguridad son supervisadas por un relé de seguridad. Si bien el controlador del robot contiene una interfaz de seguridad, esta no es utilizada de forma externa, solo local para la operación manual del robot. El controlador se conecta al relé de seguridad igualmente y está supeditado a las condiciones de operación seguras de toda la celda, dictadas por el PLC. Los componentes de la red de seguridad son 2 botoneras de parada de emergencia tipo seta, una chapa electromecánica y una barrera laser.

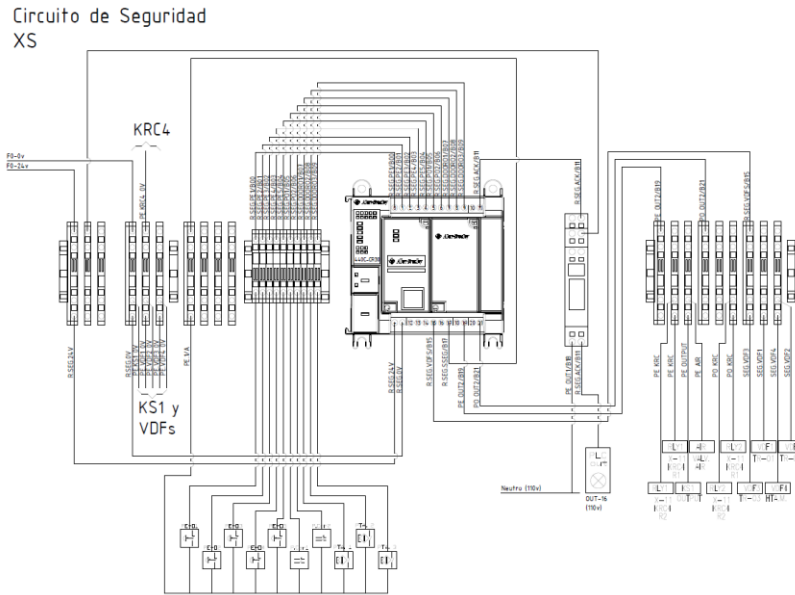


Ilustración 18 Diagrama del circuito de seguridad

4.7.1 Relé de seguridad Allen Bradley GuardMaster 440C



Ilustración 19 GuardMaster 440C

El relé de seguridad GuardMaster es un controlador de circuitos de seguridad programable y completamente configurable que ofrece un amplio abanico de opciones para soluciones de seguridad, dando a integradores una solución más accesible que un PLC de seguridad al mantener un costo bajo. El modelo utilizado, 440C cuenta con 22 puertos configurables como entradas o salidas, maneja hasta dos circuitos de seguridad independientes y posee dos puertos para módulos plug-in que agregan características al equipo.

Uno de los módulos que ofrecen una mejora importante al equipo es el plug-in de comunicación *EthernetIP*. Este módulo permite comunicar el relé de seguridad con el PLC a través de una red Ethernet lo que permite reducir el tiempo de puesta en marcha y comisionado al entregar directamente el estado del circuito de seguridad sin la necesidad de conexiones eléctricas.

El relé de seguridad monitorea el estado de las señales de entrada en cada uno de los circuitos y en base a el estado de los dispositivos, genera señales de salida en respuesta. La ventaja de ser un relé programable es que la lógica de seguridad puede ser programada a voluntad en la integración del sistema para que reaccione de la manera necesaria para el funcionamiento de planta.

4.7.2 Chapa de seguridad TLS-GD2

Las chapas de seguridad TLS forman un elemento de protección perimetral excelente para soluciones robótica puesto que permite controlar el ingreso a la zona de trabajo y monitorear si las puertas han sido abiertas o vulneradas.

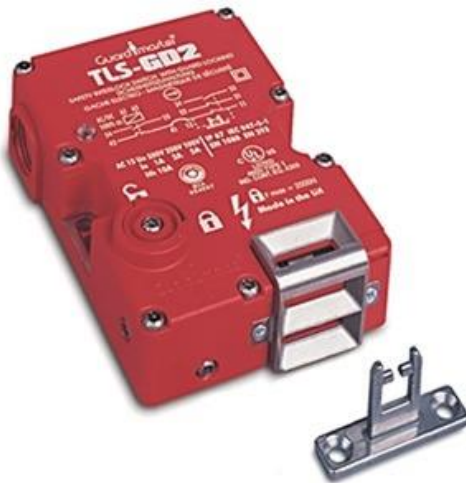


Ilustración 20 Chapa de seguridad TLS-GD2

El modelo utilizado es el GD2, una chapa con hebilla de bloqueo insertable frontal o lateralmente, para puertas comunes y correderas. Posee accionamiento por solenoide y envía dos indicaciones, una de hebilla insertada y otra de chapa cerrada.

4.7.3 Interruptor de parada de emergencia

Se utilizaron interruptores de parada de emergencia tipo seta estándar en la industria.



Ilustración 21 Interruptor tipo seta Allen Bradley

4.8 Software Utilizado

4.8.1 KUKA.WorkVisual 4.0

El programa KUKA.WorkVisual es el entorno de programación offline desarrollado por KUKA para utilizar con sus robots desde el controlador KRC4. Ofrece herramientas de conexión con el controlador y el manipulador, configuración de hardware interno y externo del robot, configuración de interfaces de comunicación entre otros.

Su mayor utilidad es la de poder crear, modificar y administrar los programas que se cargan en el robot de forma off-line. Cuenta con un explorador de archivos que permite navegar en la estructura de archivos del robot, desde los programas de usuario hasta los archivos de configuración de máquina.

Cuenta con un editor de texto para la creación de programas que ofrece herramientas como resaltado de palabras clave, búsqueda de declaración, sugerencia de funciones y variables declaradas o de sistema, anidado de secciones de código y herramientas de depuración de código, entre otras.

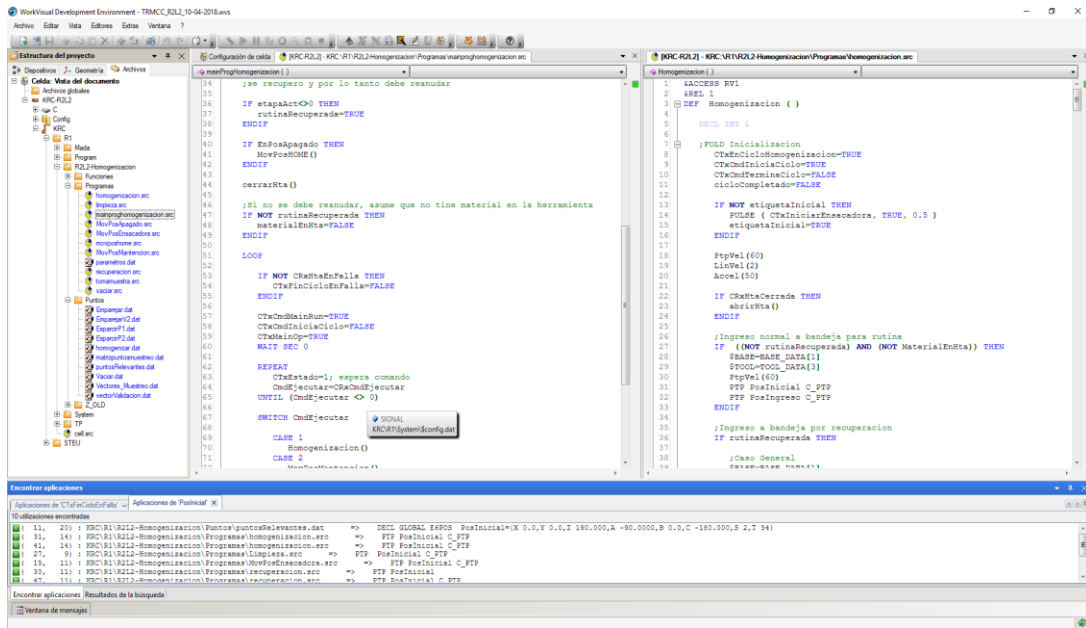


Ilustración 22 Interfaz del software KUKA.WorkVisual 4.0

Dentro de las opciones que entrega el software esta la configuración de celda, que consiste en la correcta incorporación de los elementos de hardware utilizados tanto en el manipulador robótico como las tarjetas de expansión y drives instalados en el controlador KRC. Elementos como la interfaz *EthernetIP*, los módulos Beckhoff *EtherCat* y la tarjeta de expansión *RoboTeam* se agregan a los datos de máquina y se configuran utilizando este software.

4.8.2 KUKA.Sim PRO 3.0

El software KUKA.Sim Pro es el entorno de simulación de robots KUKA. Permite tener un modelo 3D de una celda robótica que simule la operación de los manipuladores. Dentro de las funciones que ofrece el software se tiene la posibilidad de crear puntos, bases y TCP utilizando un modelo CAD 3D de la planta. En conjunto con el software WorkVisual se puede realizar una simulación completa de la lógica de operación del manipulador.

El software incluye una librería completa de los robots KUKA, los cuales están diseñados con precisión con las propiedades cinemáticas de los modelos de manipuladores.

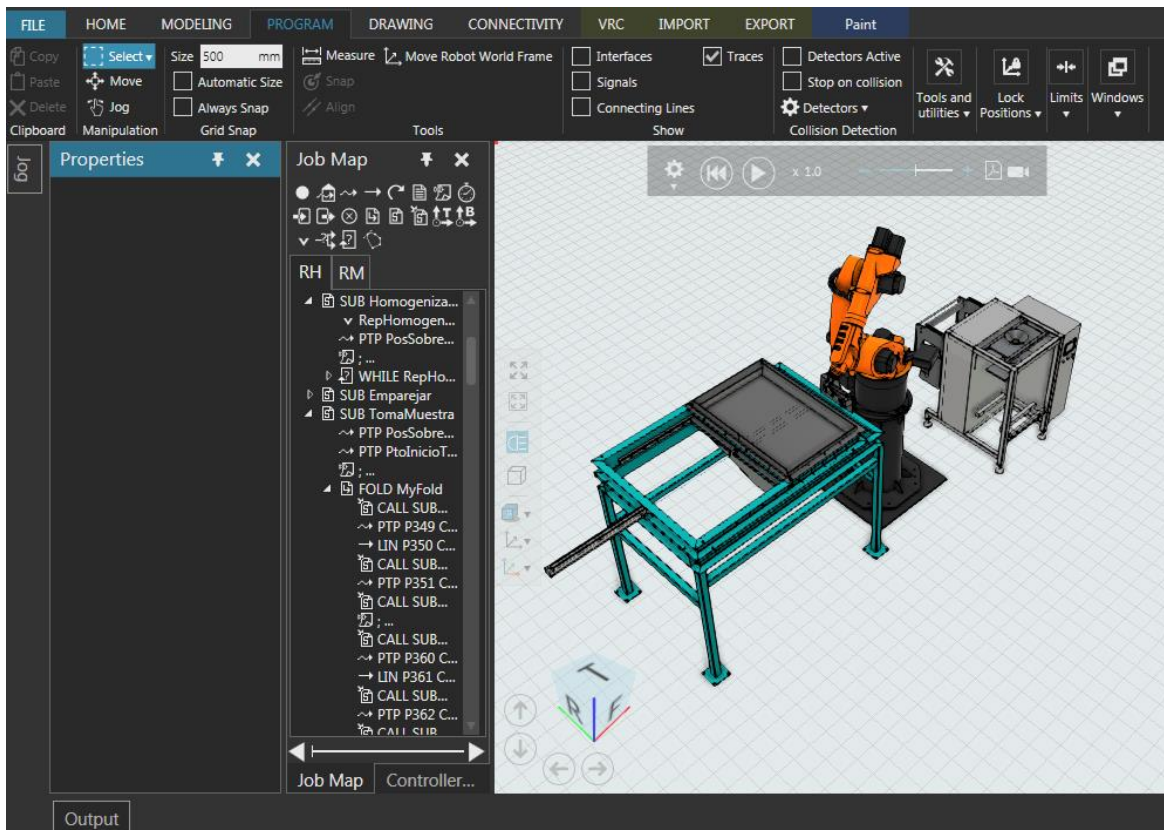


Ilustración 23 Interfaz de usuario de KUKA.Sim PRO 3.0

El software incluye un intérprete de código Python, con el que se pueden crear scripts con el que dotar de lógica los elementos incorporados en la celda virtual. De esta forma se pueden crear modelos interactivos de equipos como líneas transportadoras, sensores, actuadores neumáticos, motores, entre otros. También permite crear módulos lógicos que puedan controlar la funcionalidad y operación de equipos e incluso los robots.

Incluye un cliente para software OPC UA, lo que da la posibilidad de incluir en la lógica señales provenientes de equipos reales como PLC y bases de datos.

El uso de KUKA.Sim Pro permite realizar una validación de la operación completa de la celda robótica y poder verificar todos los aspectos de la lógica de operación del sistema.

4.8.3 Studio 5000 Logix Designer

Los PLC de Allen-Bradley se programan todos con el software Studio 5000 Logix. Este software es la versión renovada del antiguo software RSLogix 5000. El programa ofrece las funciones estándar en la programación de PLC a nivel industrial, más una serie de herramientas de configuración de buses de comunicación para distintos dispositivos, tanto de arca Rockwell – Allen Bradley, como de dispositivos externos.

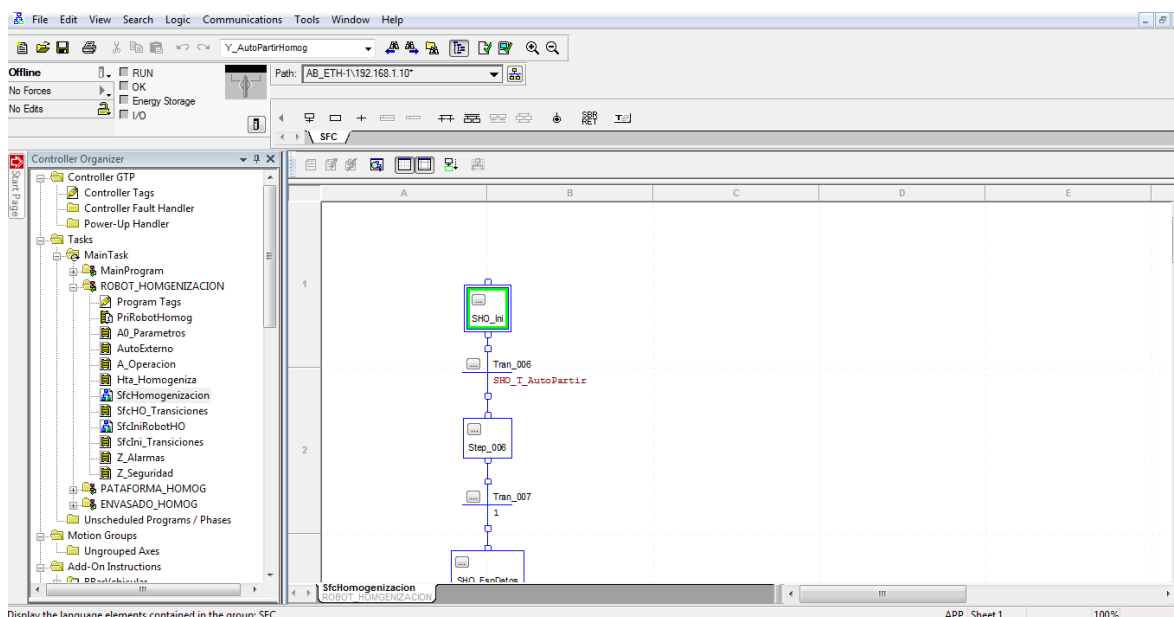


Ilustración 24 Interfaz de usuario del Software StudioLogix 5000. Se aprecia un proyecto abierto.

El software permite la programación de controladores industriales PLC en lenguaje LADDER, diagrama de bloques (FBD, del inglés *Function Block Diagram*), diagramas de flujo secuencial (SFC, del inglés *Sequential Flow Chart*) y texto estructurado, que es un lenguaje de programación sintáctico similar en estructura a los lenguajes BASIC o C.

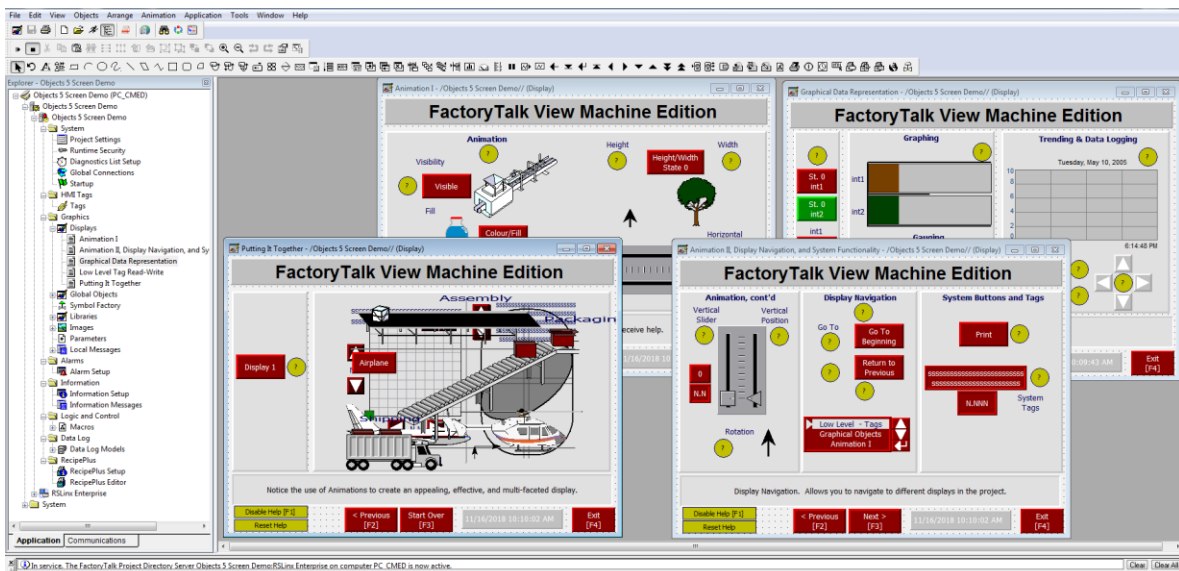
4.8.4 FactoryTalk View ME

Este software es la suite de programación de pantallas HMI desarrollada por Rockwell Automation para los paneles PanelView de Allen Bradley. Permite la creación de consolas HMI con iconos, indicadores, botones y más objetos ActiveX. Permite la conexión directa con los controladores PLC de Allen Bradley para el

intercambio de datos, monitoreo de variables, envío de señales, entre otras funciones.

Dependiendo del tipo de licencia, el software puede crear el firmware para los paneles PanelView, crear versiones Runtime de las pantallas que no requieren paneles físicos y pueden ser ejecutadas en un PC o solo ejecutar estas últimas.

Para el proyecto, se utilizará la edición ME que permite crear las pantallas y ejecutarlas en el PC.



5 Desarrollo del proyecto.

5.1 Conceptos básicos de programación de robots.

La programación de robots industriales varía entre fabricantes en cuanto a software, lenguajes de programación y funcionalidades. Sin embargo, todos comparten una base conceptual que se mantiene a lo largo de todas las plataformas.

Sistemas de referencia: Bases y TCP

Como los manipuladores son maquinas que trabajan espacialmente estos requieren de sistemas de referencia que les permitan saber en qué posición del espacio se

encuentran y donde están trabajando. Para ello existen dos elementos fundamentales de referencia, las bases y los TCP.

Las bases y TCP son puntos en el espacio que generan un sistema coordenado XYZABC donde el robot puede ubicarse en el espacio. Las coordenadas X, Y Z corresponden al posicionamiento de las bases mientras que las coordenadas A, B y C corresponden a las rotaciones sobre cada eje, respectivamente.

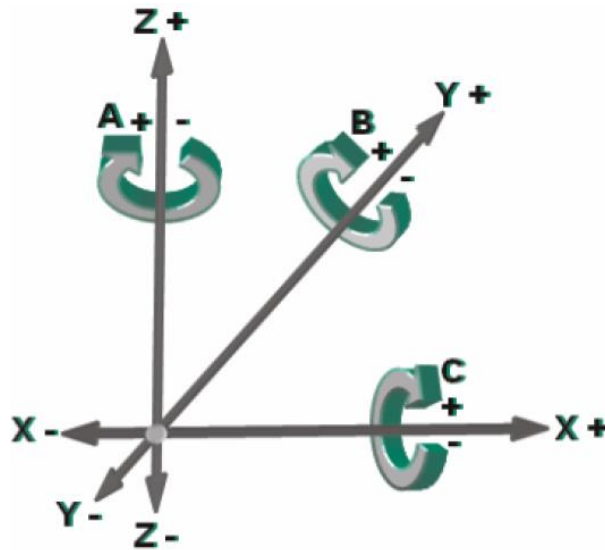


Ilustración 25 Sistema de coordenadas utilizado por los robots marca KUKA. Se basa en los Ángulos de Euler

Una de las bases principales es el ROOT del robot o su cero absoluto. Es un punto en la geometría del robot que representa el origen de su cadena cinemática y es también el cero absoluto desde donde se refieren el resto de las bases. El ROOT del robot suele estar en el punto medio de la base del robot y es fundamental que se encuentre bien definido puesto que la posición del efector final se referencia desde él.

Además del ROOT del robot, es posible crear bases auxiliares que permiten trabajar en distintos sistemas de coordenadas XYZ. Por ejemplo, si se quisiera trabajar sobre una bandeja, se puede crear una base con el cero en una de las esquinas de la bandeja y referenciar todos los puntos a esta base.

Los TCP o “Tool Center Point” son sistemas de coordenadas

5.1.1 Tipos de movimiento

Gracias a la flexibilidad que tienen los manipuladores robóticos, estos pueden describir distintos tipos de movimientos que permiten describir trayectorias de varias formas, para distintos propósitos. Para los robots KUKA los movimientos básicos son PTP y LIN

5.1.1.1 Movimientos Point To Point – PTP

El PTP es un movimiento que optimiza la velocidad ignorando la trayectoria. Se rige por la velocidad de los ejes.

Debido a que los ejes producen movimientos circulares, las trayectorias curvas son más fáciles de ejecutar que las rectas, por lo que los movimientos PTP siempre tienen una trayectoria curva. Dicha curvatura no se puede controlar y no es fácil de predecir.

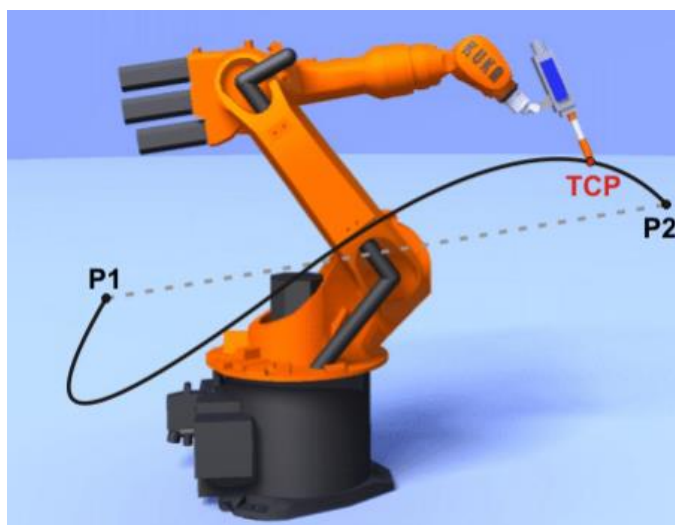


Ilustración 26 Movimiento PTP

Durante un PTP siempre hay un eje que guía el movimiento. Este es el que debe recorrer la mayor distancia angular y se le llama eje portador.

Cuando el controlador realiza los cálculos de movimiento de cada eje para llegar al punto objetivo, esto se hace de forma tal que todos los ejes lleguen a la posición deseada al mismo tiempo. Es por esta razón que el eje portador es el único que suele ir a la velocidad programada, mientras que el resto de los ejes se mueven a

una velocidad menor. En general, es muy difícil poder determinar cuál será el eje portador de algún movimiento a menos que las posiciones se definan en base a los ángulos de ejes.

5.1.1.2 Movimientos Lineales – LIN

El movimiento lineal cumple la función de asegurar una trayectoria en línea recta entre un punto inicial y un punto objetivo manteniendo una velocidad constante. Los movimientos lineales se calculan utilizando la cinemática inversa del manipulador. Por este motivo es que los movimientos lineales presentan una complicación en ciertas posiciones de ejes producida por la indefinición de las ecuaciones cinemáticas del robot. Esto es llamado una singularidad.

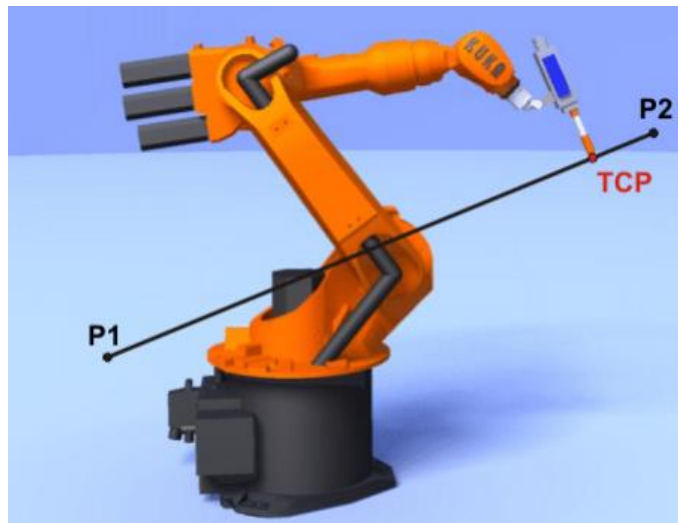


Ilustración 27 Movimiento LIN

5.1.2 Singularidades

Las singularidades son puntos en el espacio que fuerzan al robot a posicionar sus ejes en ciertas configuraciones que al entrar al modelo cinemático del robot generan una indeterminación. En otras palabras, el controlador no tiene forma de resolver las ecuaciones. Esto se traduce en que el robot comienza a hacer movimientos indeseados que llevan a error.

Las singularidades se alcanzan cuando ciertos grupos de ejes se posicionan de tal forma que se alinean coaxialmente. Esto hace que existan infinitas formas de como

continuar el movimiento. Físicamente se aprecia que alguno de los ejes del grupo comienza a acelerarse puesto que matemáticamente debe alcanzar una velocidad infinita. Esto lleva a un error del controlador que detiene la ejecución de programa.

Si bien es cierto que la singularidad existe en solo un punto del espacio, la vecindad de ese punto lleva al controlador a mover los ejes del manipulador fuera de su velocidad máxima, lo que igualmente produce el error.

Para un manipulador robótico de 6 ejes se definen 3 singularidades.

5.1.2.1 Singularidad de hombro – α_1

Se produce cuando el centro de la muñeca del robot, ubicado en la intersección de los ejes 4, 5 y 6 queda alineado coaxialmente con el eje 1. El efecto que se obtiene es que los ejes 1 y 4 tratan de rotar 180° de forma instantánea.

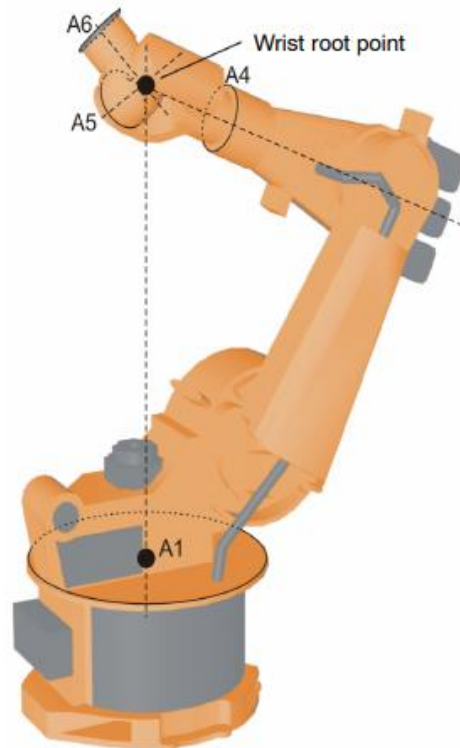


Ilustración 28 Singularidad α_1

5.1.2.2 Singularidad de codo – α_2

Se produce cuando los centros de los ejes 2, 3 y 4 quedan alineados. El efecto que se logra es que el robot queda bloqueado puesto que para el controlador el robot ha llegado demasiado lejos, a pesar de que podría eventualmente llegar a la posición con un movimiento del eje 5.

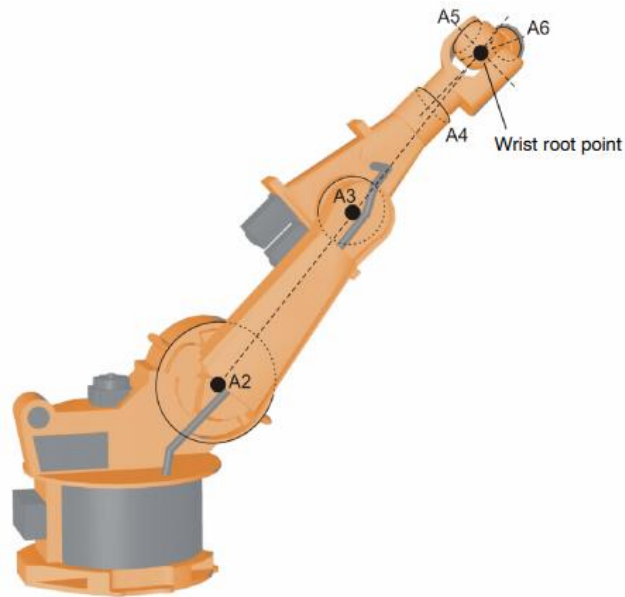


Ilustración 29 Singularidad α_2

5.1.2.3 Singularidad de muñeca - α_5

Esta singularidad se produce cuando el eje 4 y el eje 6 se alinean coaxialmente. El efecto que se logra es que los ejes tratan de girar 180° instantáneamente.

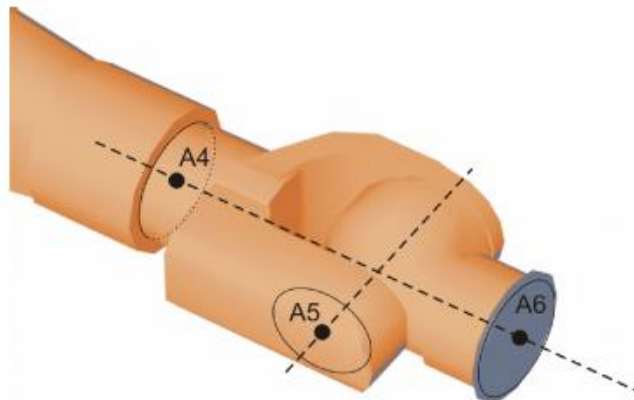


Ilustración 30 Singularidad α_5

5.2 Descripción del proceso de Homogenización.

5.2.1 Definiciones prácticas.

A continuación, se describen las definiciones empleadas para conceptos importantes, que se utilizarán en el resto del texto. Algunas de las definiciones siguientes se repiten con las definidas anteriormente descritas en el capítulo X Estado del Arte, sin embargo, cabe destacar que ellas son una descripción teórica formal, mientras que las que se presentan a continuación son definiciones de carácter práctico, extraídas de la norma ISO – 12743:2006.

Estas definiciones son las primaran para el resto del documento.

- **Homogenización:** El proceso de homogenización consiste en realizar una mezcla de material heterogéneo con el objetivo de eliminar la segregación de este y hacerlo homogéneo. Por homogéneo, se entiende que para cualquier muestra del material existe la misma probabilidad de encontrar los elementos constituyentes del material.
- **Muestra de lote:** Cantidad de material que se extrae del lote para análisis. Se recibe al comienzo del proceso en la bandeja de muestreo.
- **Traspaleo:** Proceso donde el material es desplazado de un lugar a otro por medio de una pala. En este caso se debe entender como el incorporado sobre sí mismo desde los bordes de la bandeja hasta el centro de esta a través de paleadas sucesivas.
- **Submuestra:** Cantidad de material retirada de la muestra de un lote que es representativa de éste. Para que se cumpla la representatividad, el material debe ser homogéneo y libre de segregación.
- **Incremento:** Cantidad menor de material que se retira de sectores distintos de la muestra, los cuales se consolidan en una submuestra
- **Muestra final:** Cantidad de material que, luego de ser retirada de la muestra, es envasada y rotulada para ser enviada a laboratorio para análisis. Se compone de una o más submuestras.

- **Malla de muestreo:** Distribución de puntos de toma, invariante, desde donde se extraen secuencialmente los incrementos. Se definen de forma aleatoria una vez, al comienzo del desarrollo y se mantienen hasta que se decida cambiarlas.

5.3 Objetivos del proceso

El proceso de homogenización es fundamental en cualquier operación de muestreo pues es lo que asegura que la muestra final es representativa del conjunto de estudio. Esto se logra a través de la eliminación de la segregación presente en el material. Bajo esta premisa, se definen los siguientes objetivos:

- Eliminar la segregación existente en el material
- Reducir los tiempos de manipulación del material para evitar la pérdida de humedad de éste.
- Generar submuestras del material
- Envasar y rotular las submuestras para crear muestras finales representativas del lote

5.4 Etapas del proceso

El proceso completo de homogenización se compone de distintas etapas distinguibles entre sí, las cuales deben ejecutarse secuencialmente para asegurar la integridad de la operación. Estas etapas son:

1. Recepción
2. Esparcimiento inicial de material
3. Homogenización
4. Emparejado de material
5. Muestreo de material
 - a. Toma de incremento
 - b. Envasado de submuestra
6. Limpieza de bandeja y herramienta

Este procedimiento es una adaptación del descrito en la normativa *ISO-12743* (sección 15.4.7 “Manual increment division”) para la toma de muestra manual de agregados de mineral.

5.4.1 Filosofía de Operación

Para realizar todas las tareas del proceso, el robot deberá realizar cambios en el punto de trabajo de la herramienta. Se definirán entonces los siguientes TCP (puntos de Trabajo):

- En la espátula de la herramienta se definen 3 TCP, uno en cada esquina y uno en el centro del borde (TCP1 - centro, TCP2 - esquina izquierda, TCP3 - esquina derecha).
- En la pala de la herramienta se define un TCP en el centro de la pala, al nivel de la paleta (TCP4).

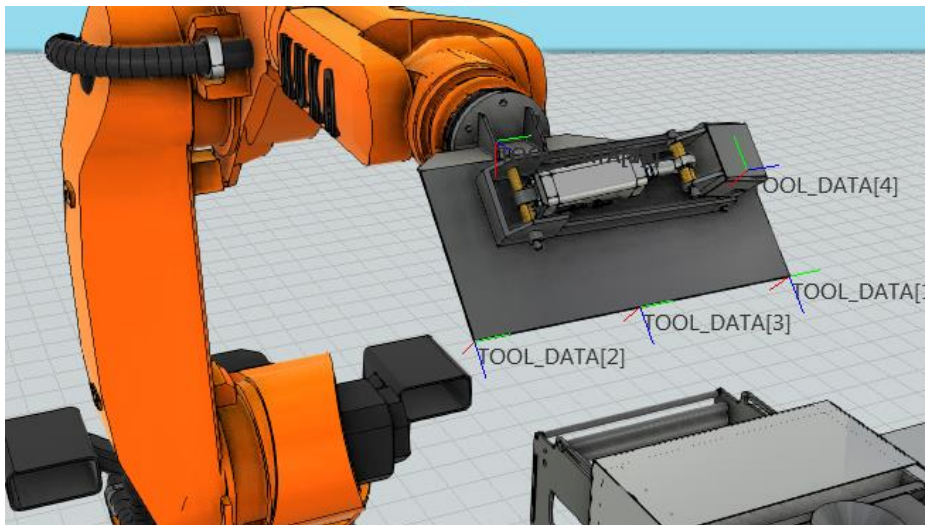


Ilustración 31 Se muestra la ubicación de los TCP definidos.

También, es necesario definir una base de trabajo en la bandeja (Bandeja). Esta tendrá el origen en la esquina más cercana al robot y definirá el eje X+ hacia la derecha, siguiendo el borde de la bandeja. El eje Y+ se definirá avanzando en profundidad por el borde de la bandeja. El eje Z queda definido hacia arriba. Todos los puntos de trabajo se realizan sobre la base Bandeja.

Debido a que la cantidad de material que puede ingresar a la bandeja es variable, se hace necesario realizar un ajuste dinámico de la altura de trabajo de ciertos puntos. Para lograrlo, se crean además dos bases de trabajo con las mismas coordenadas que la base inicial, las cuales tendrán la coordenada Z parametrizada según el peso de la bandeja.

La pala de muestreo de la herramienta se acciona con un mecanismo que le permite abrir y cerrar como una mandíbula. En el estado cerrado, este mecanismo tiene un perfil mayor, lo que causa interferencias entre la herramienta y las estructuras alrededor. Por este motivo, durante la ejecución de la rutina de homogenización la herramienta debe encontrarse siempre abierta. Para ello se realiza una comprobación inicial de esta condición y posteriormente, en caso de que se cerrara producto de una falla en el circuito neumático, esto se detecta como falla operacional por el PLC, lo que detiene la ejecución de la rutina y pone al robot en estado de falla.

5.4.2 Diagrama de flujo del proceso de Homogenización

A continuación, se presenta un diagrama de flujo que describe la rutina de homogenización del robot. La estructura del programa se compone de una secuencia principal que guía la operación, una etapa de homogenización, una etapa de muestreo y una etapa de limpieza.

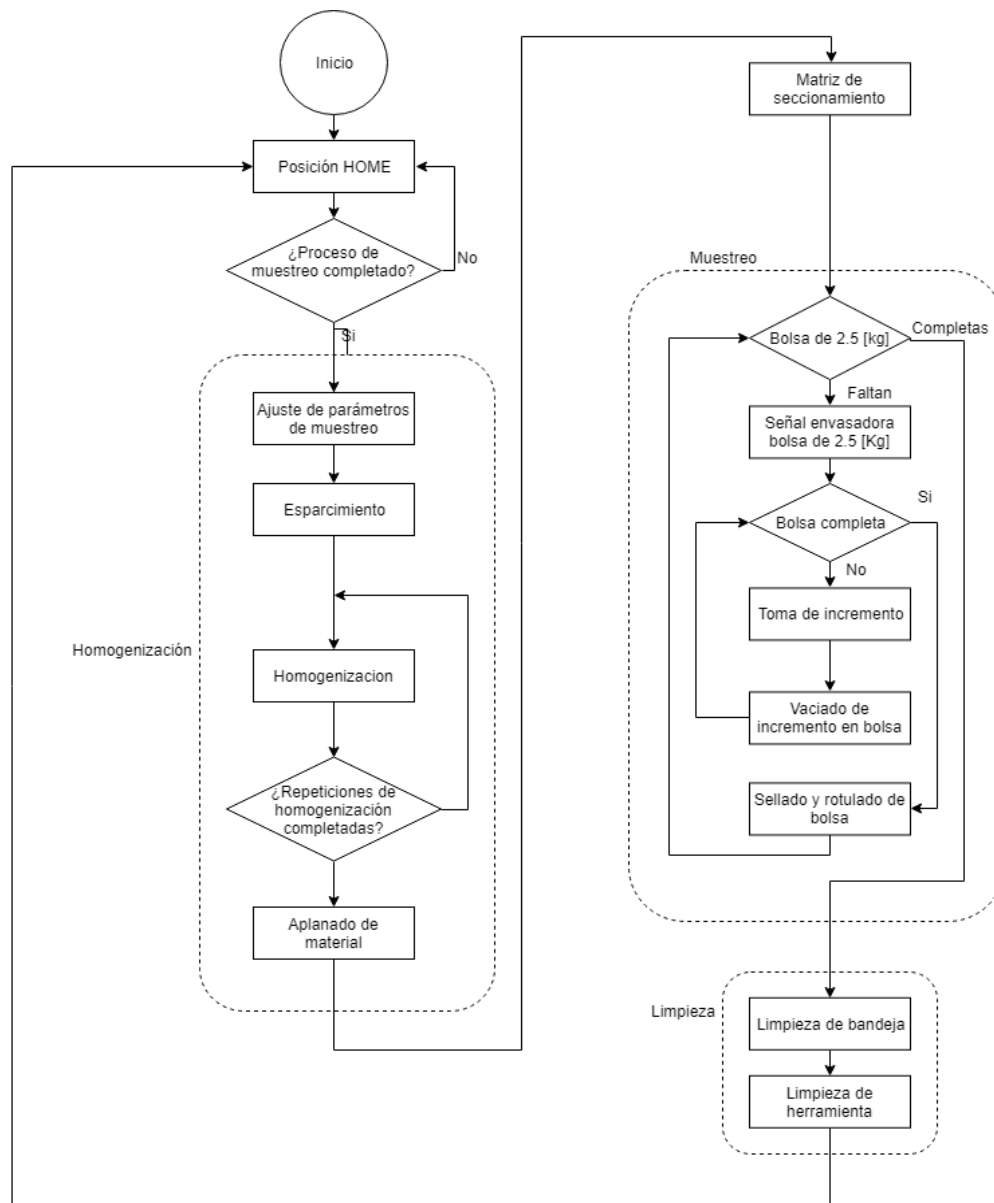
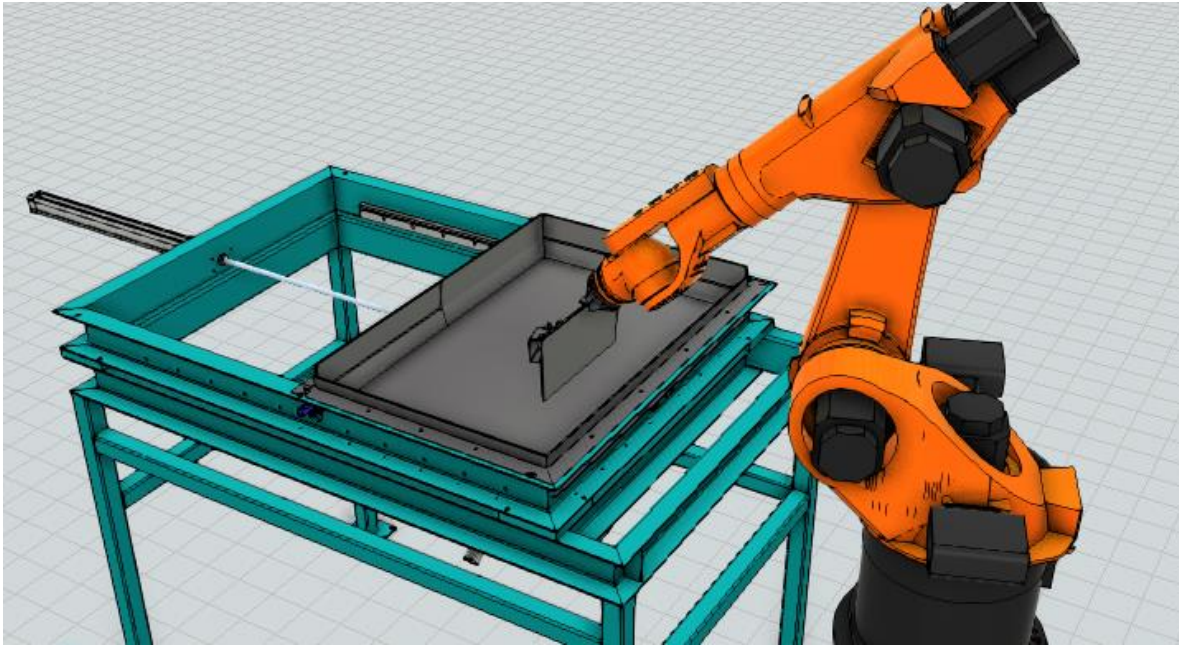


Ilustración 32 Diagrama de flujo del proceso de homogenización.

5.4.3 Recepción y primer esparcimiento de material

Esta primera etapa tiene al robot en su posición HOME en espera de que ingrese material a la bandeja. Al recibir la señal de partida se mueve hacia la posición de inicio de ciclo.



En este estado el material se encuentra concentrado en el centro por lo que el robot debe esparcir el material en la superficie de la bandeja para poder trabajarlo. Para esto, utilizando el TCP1, el robot se ubica sobre el material y realiza movimientos de izquierda a derecha y de vuelta, bajando la altura de la herramienta hasta llegar a una altura determinada por la cantidad de material recibida.

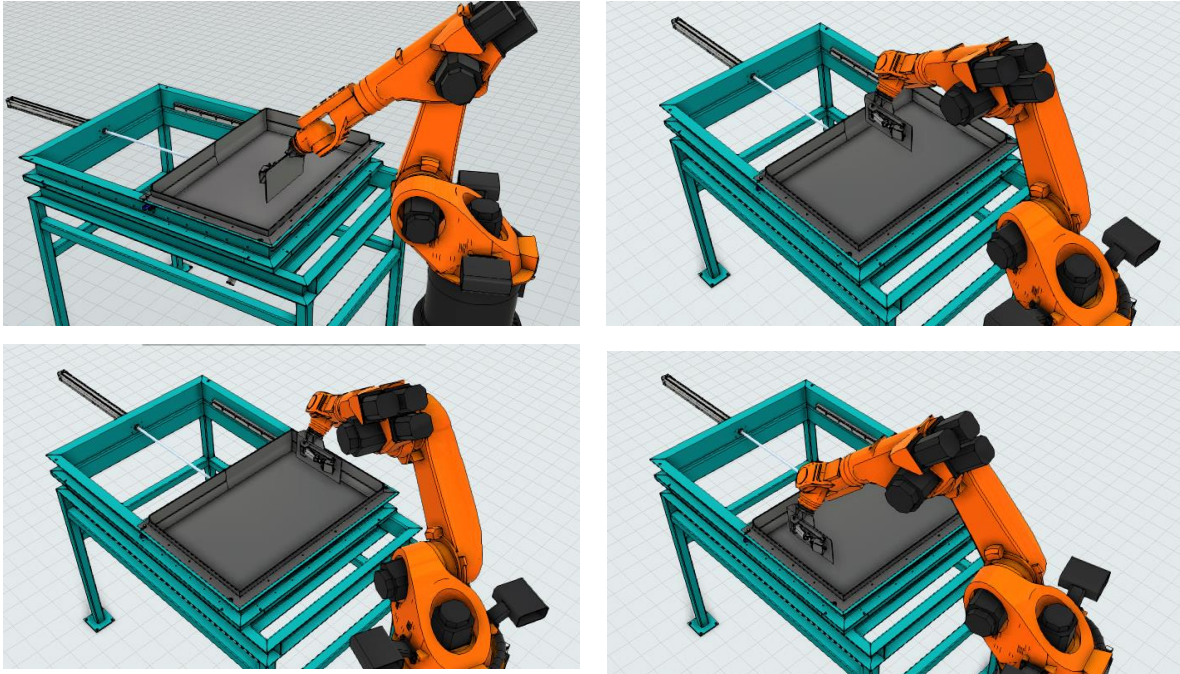


Ilustración 33 Esparcimiento de material. Primera fase.

Una vez el montículo inicial de material se dispersa por la bandeja se procede a un emparejamiento de este de forma que no queden acumulaciones en algunos sectores y otras partes no contengan nada de material. Para ello se realiza un barrido por los bordes de la bandeja, aumentando la altura de los puntos de cada extremo en 2 [cm] para que el exceso vaya quedando atrás.

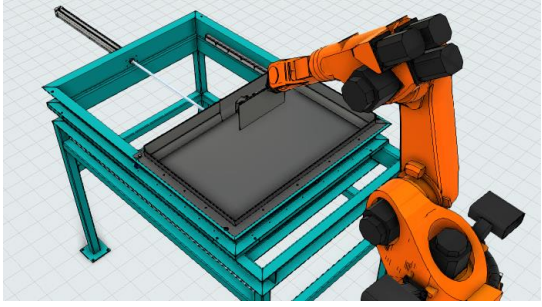
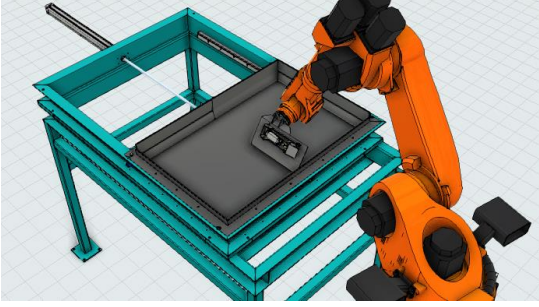
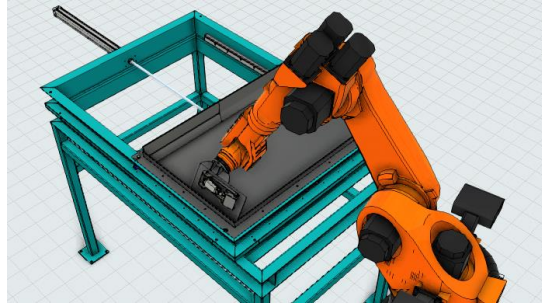
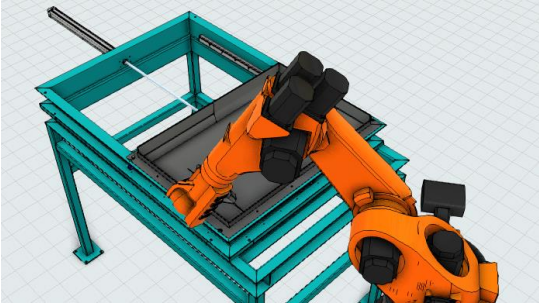
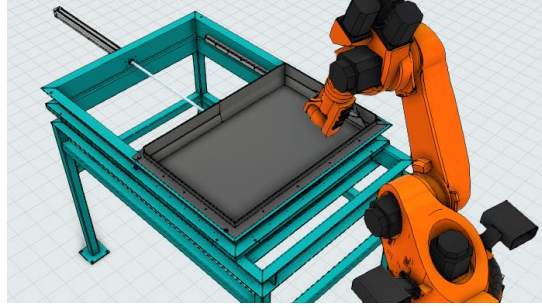
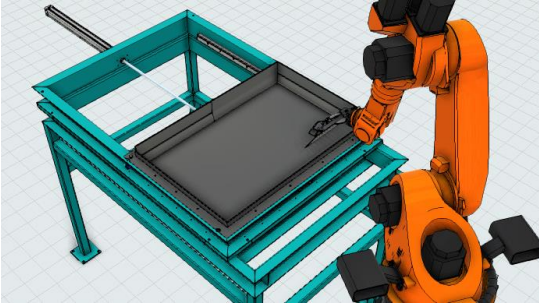
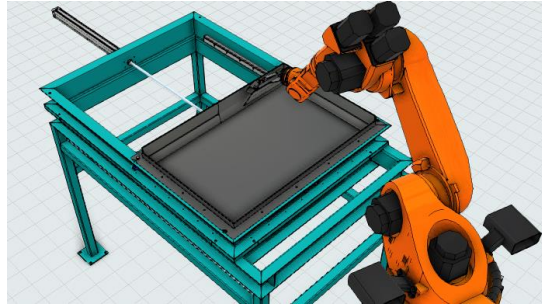
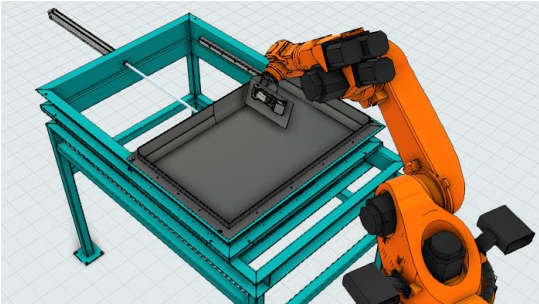
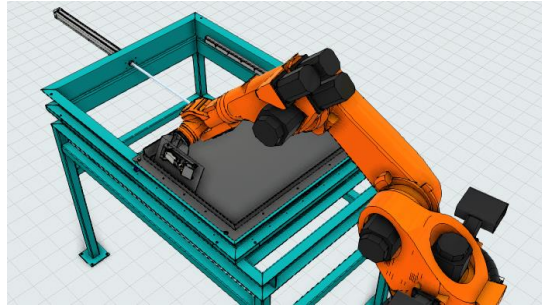
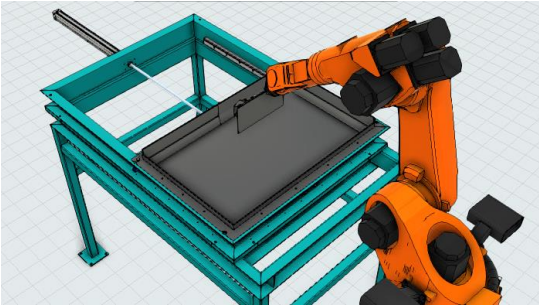


Ilustración 34 Esparcimiento de material. Segunda fase.

5.4.4 Homogenización

En la etapa de homogenización se realiza el trabajo principal del robot, que consiste en realizar desplazamientos del material para mezclarlo de forma consistente y así conseguir la homogeneidad. El proceso se realiza haciendo avanzar el material por secciones desde los bordes laterales hacia el centro de la bandeja. El movimiento descrito tiene una etapa de avance y una de retroceso. Se realiza en un bloque de 6 movimientos que se repite 48 veces avanzando en espacios de 5[cm].

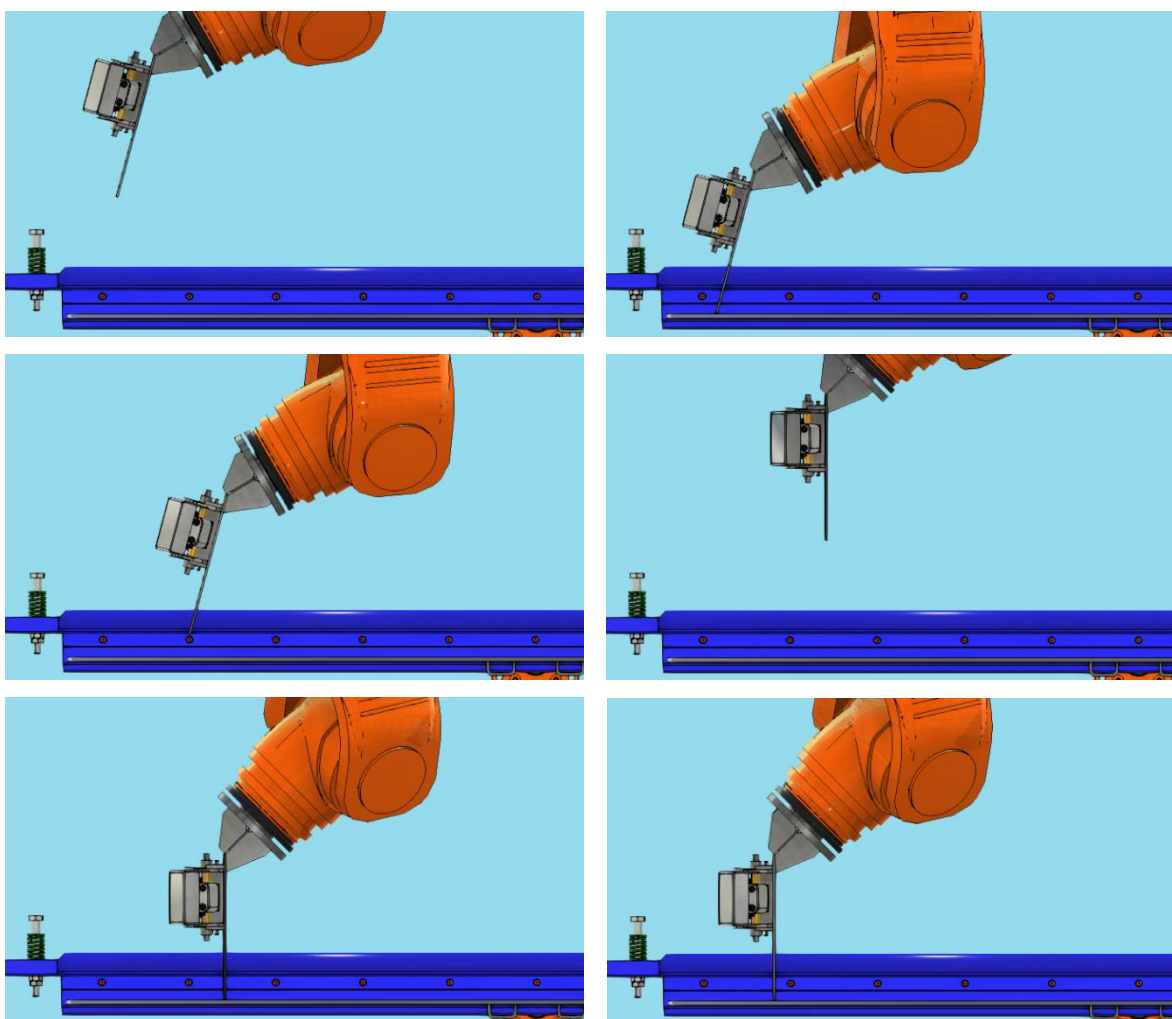


Ilustración 35 Homogenización. Secuencia de movimientos.

Los movimientos comienzan desde la esquina frontal izquierda y avanzan hacia la derecha completando 12 repeticiones. Luego se realiza un cambio en la orientación y se continúa con 12 repeticiones de derecha a izquierda. Las siguientes 12

repeticiones se realizan de derecha a izquierda siguiendo el borde trasero de la bandeja y finalmente las ultimas 12 repeticiones se realizan de izquierda a derecha.

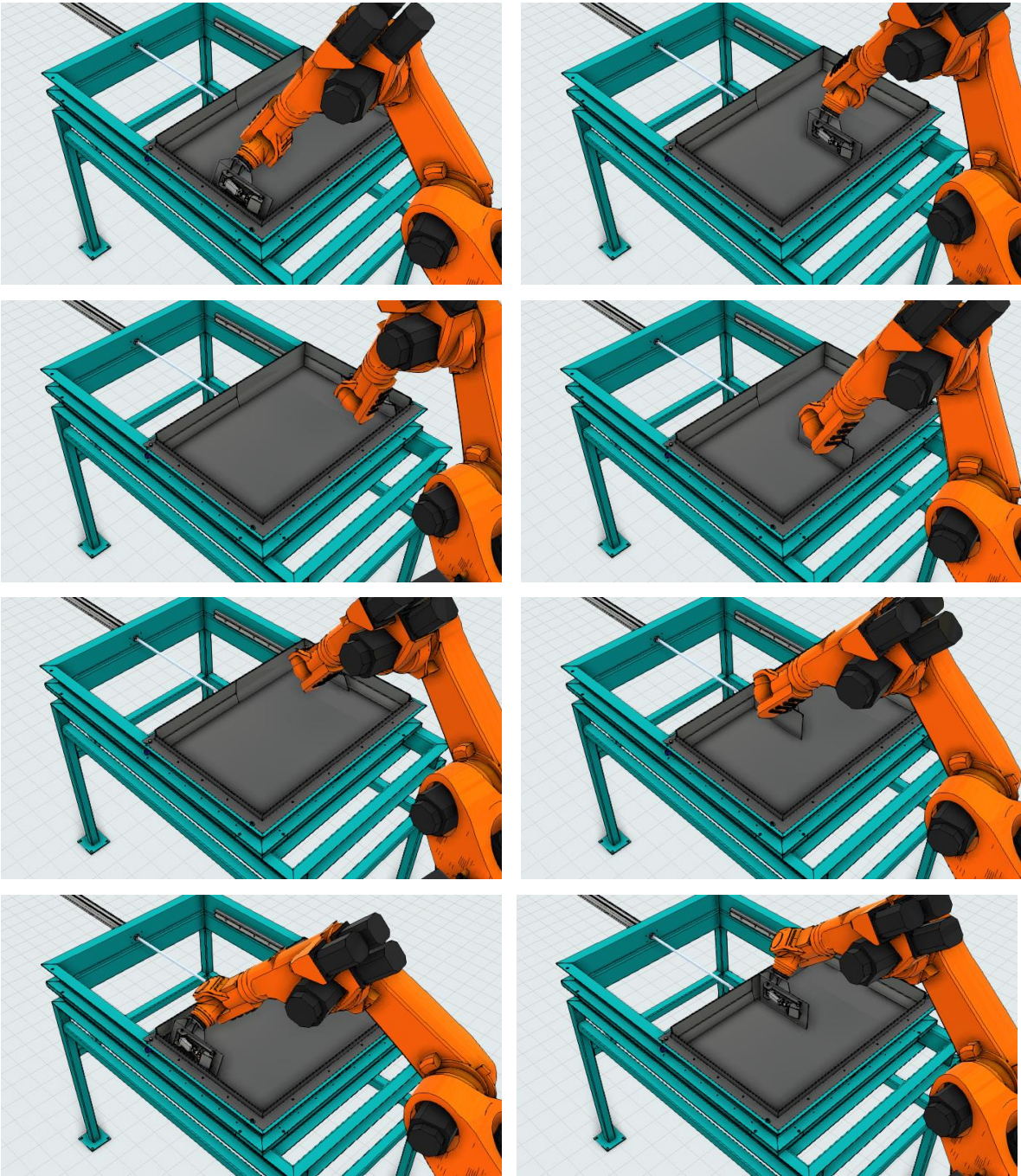


Ilustración 36 Alcance de las secciones en la secuencia de homogenización.

El proceso de homogenización esta parametrizado para poder repetir la operación un número determinado de veces. La norma ISO 12743 indica que debe realizarse un mínimo de 2 veces el traspaleo de material.

En base a los limites disponibles para los tiempos de ciclo y para estar en conformidad con la norma, la operación de homogenización se realiza 3 veces y se deja el número como parámetro editable por el operador.

5.4.5 Emparejado de material

En esta etapa el robot debe distribuir el material por toda la superficie de la bandeja preparándose para realizar la toma de muestra, procurando que todos los espacios sean ocupados y que el bloque de material tenga un espesor uniforme.

El emparejado de material se realiza de forma similar a las operaciones de esparcimiento, con la diferencia de que los puntos de partida y final son de borde a borde de la bandeja. Con el avance de la espátula se va aumentando la altura del barrido de forma que se va dejando el exceso atrás de forma pareja a lo largo de toda la bandeja

Es importante resaltar que en esta etapa se debe lograr que la superficie del material sobre la bandeja sea lo más pareja posible, puesto que irregularidades en la superficie inducen sesgos en el posterior proceso de toma de muestra.

5.4.6 Muestreo de material

Etapa donde se consigue el objetivo final que es obtener muestras representativas del lote para su análisis. Se compone de dos subprocesos:

- Toma de incrementos de la muestra
- Envasado de la muestra.

El proceso inicia con el robot creando una matriz de división virtual de secciones sobre la superficie del material (virtual en el sentido de que físicamente no se demarca la superficie. El robot sabe por medio de las posiciones cartesianas donde

se encuentra cada incremento). De estas secciones es de donde el robot extraerá los incrementos. La matriz de seccionamiento divide la bandeja en 60 partes en una configuración de 6x10. Estas 60 divisiones se agrupan en veinte conjuntos de tres incrementos. De cada grupo se toma solo uno de los incrementos. Esto da como máximo del sistema 3 bolsas de 20 incrementos cada una. El orden en el que se extraen los incrementos conforma la malla de muestreo y se define aleatoriamente.

6										
5	12	3	11	8	16	19	2	9	17	5
4										
3										
2	6	13	1	15	4	18	10	14	20	7
1										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Ilustración 37 Malla de muestreo generada aleatoriamente al comienzo del proyecto. La malla propuesta se mantiene hasta que se decida una redistribución de los incrementos.

Tanto la cantidad de bolsas como la cantidad incrementos que se deben incluir en cada una pueden ser modificadas a conveniencia por medio de parámetros editables por el operador.

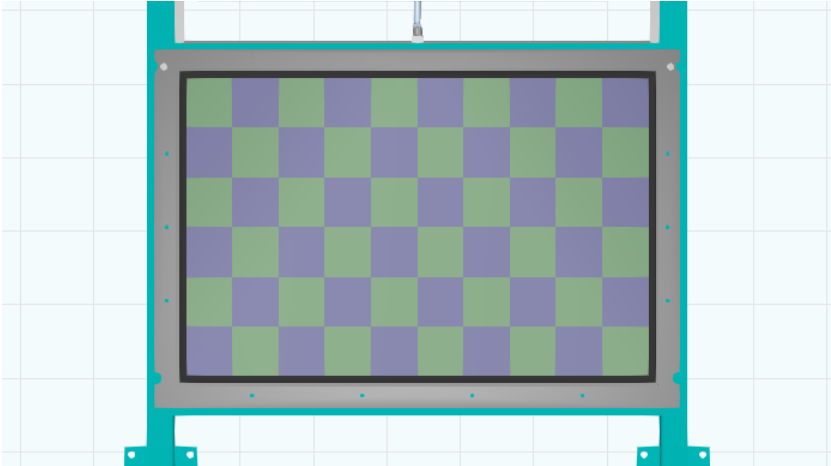


Ilustración 38 División de la superficie de la bandeja en una matriz de 6x10 espacios.

5.4.6.1 Toma de incremento

La toma de incrementos se realiza con la pala de la herramienta perpendicular al plano de la bandeja utilizando el TCP4. El punto para la toma de incremento se determina en base a la matriz de seccionamiento creada sobre la superficie de trabajo.

Al inicio de la secuencia de toma de muestra, el robot se mueve a la posición inicial de muestreo, la cual está ubicada en el centro geométrico de la bandeja a una altura de 300 [mm] y utilizando el TCP4.

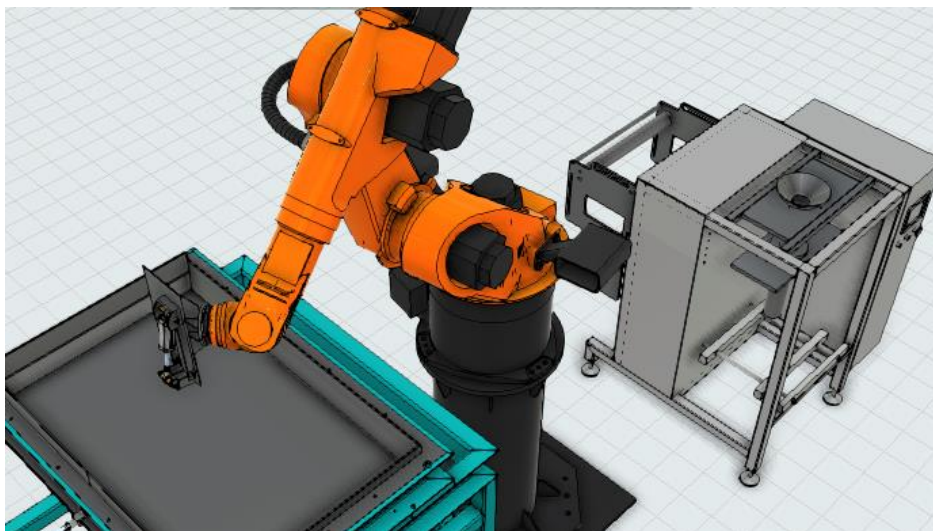


Ilustración 39 Robot en posición de inicio de toma de muestra.

La pala se ubica sobre el punto de muestreo elegido e ingresa en el material con un movimiento en el eje -Z hasta lograr una distancia de 0 [mm] con respecto a la base. Una vez al fondo se cierra la herramienta capturando el material. Lo fundamental de este paso es que debe ser necesariamente tomado desde el fondo de la bandeja para asegurar la integridad de la muestra.

5.4.6.2 Vaciado de material y envasado de submuestra

Cada vez que el robot toma un incremento, este se mueve hacia la tolva de la envasadora y abre la pala, liberando el material. Cuando el robot llega a la cantidad de palas por bolsa se envía una señal a la envasadora para que esta realice su labor, sellando la bolsa de muestra y rotulándola de acuerdo con los requerimientos. Los parámetros del rotulo serán provistos por el PLC (codificación, peso de muestra, tipo de material, fecha y hora) y son ingresados por el operador.

Luego de vaciar el contenedor, y mientras la envasadora actúa, el robot se dirige a la bandeja de trabajo para proseguir con los incrementos faltantes.

En caso de que el robot llegue a la tolva de la ensacadora para vaciar y no se encuentre disponible, el robot queda en espera de una señal de habilitación desde el PLC. Solo con esta condición se puede abrir la herramienta y proseguir con la rutina. En caso de que dicha señal no llegue y en su lugar llegue la señal de ensacadora en falla, el robot detiene la ejecución y queda en espera que se corrija el error.

5.4.7 Limpieza de herramienta

Finalizado el proceso de homogenización y muestreo la herramienta presenta residuos de material, por lo que es necesario un proceso de limpieza. Para ello, el robot se dirige hacia el punto de limpieza que consiste en una boquilla de aire comprimido. El robot acciona por medio de un comando a PLC la válvula que abre la boquilla y luego enfrenta la herramienta con el aire a presión, haciendo un recorrido que limpia el interior de la pala y la superficie de la espátula de la herramienta. Con la herramienta ya limpia, el robot retorna a su posición HOME o de origen en espera de la señal que indica el inicio de la siguiente operación de homogenización

5.4.8 Limpieza de Bandeja

Cuando el proceso de muestreo finaliza y todas las muestras finales se han extraído, la bandeja de trabajo se encuentra ocupada por el material sobrante de la muestra de lote. Este material debe ser eliminado para proseguir con la siguiente operación. Para esto, se retrae la bandeja y deja caer el material sobrante en la tolva de descarte. Simultáneamente, en la medida que se retrae, la bandeja pasa por el dispositivo de limpieza existente en la estructura, lo que elimina los restos de material adheridos a la superficie. Finalmente se acciona el sistema de martillos neumáticos que hacen vibrar la estructura con la fuerza suficiente para soltar cualquier material que se haya adherido y que ayude al flujo del material descartado, evitando atoramientos.

6 Implementación del proyecto



Ilustración 40 Sistema montado para pruebas iniciales de funcionamiento

La implementación del proyecto consiste en una serie de etapas para el armado de la máquina y las pruebas de la máquina.

- Montaje estructural
- Montaje eléctrico
- Montaje neumático
- Comisionado electroneumático
- Creación de software
- Carga de software
- Pruebas de funcionamiento
- Ajuste de parámetros

6.1 Montaje estructural

El proyecto inicia con el montaje de la máquina. Este realiza de acuerdo con el plano de distribución general actualizado de la planta en la cual el sistema se instalará.

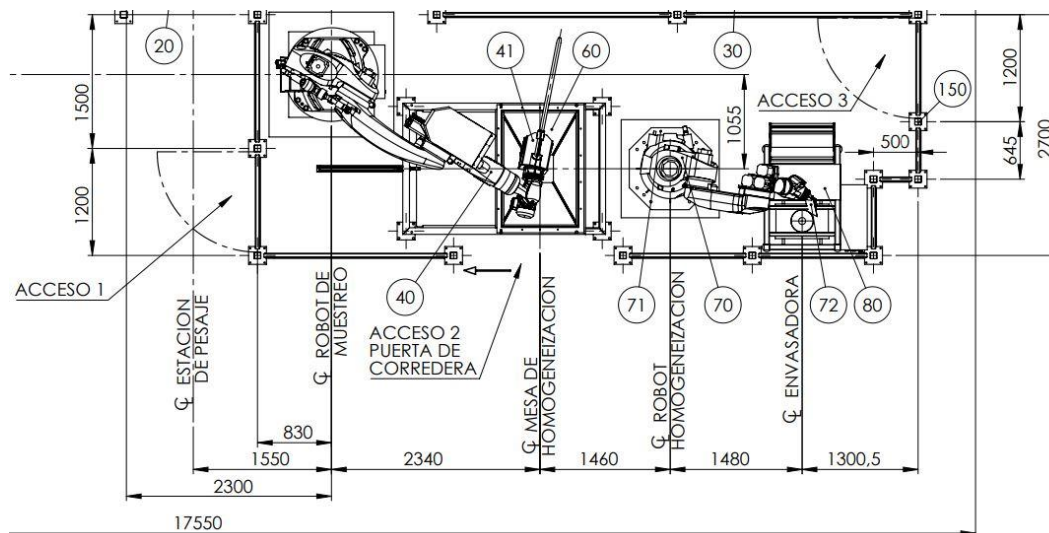


Ilustración 41 Extracto del plano de distribución general de la planta de muestreo de concentrado.

Las estructuras se montan a piso utilizando pernos marca Hilti con su kit de adhesivo químico.

6.2 Montaje eléctrico

El montaje eléctrico se realiza en base a la norma eléctrica chilena para instalaciones de baja tensión. El tablero de fuerza esta armado con componentes marca Schneider.

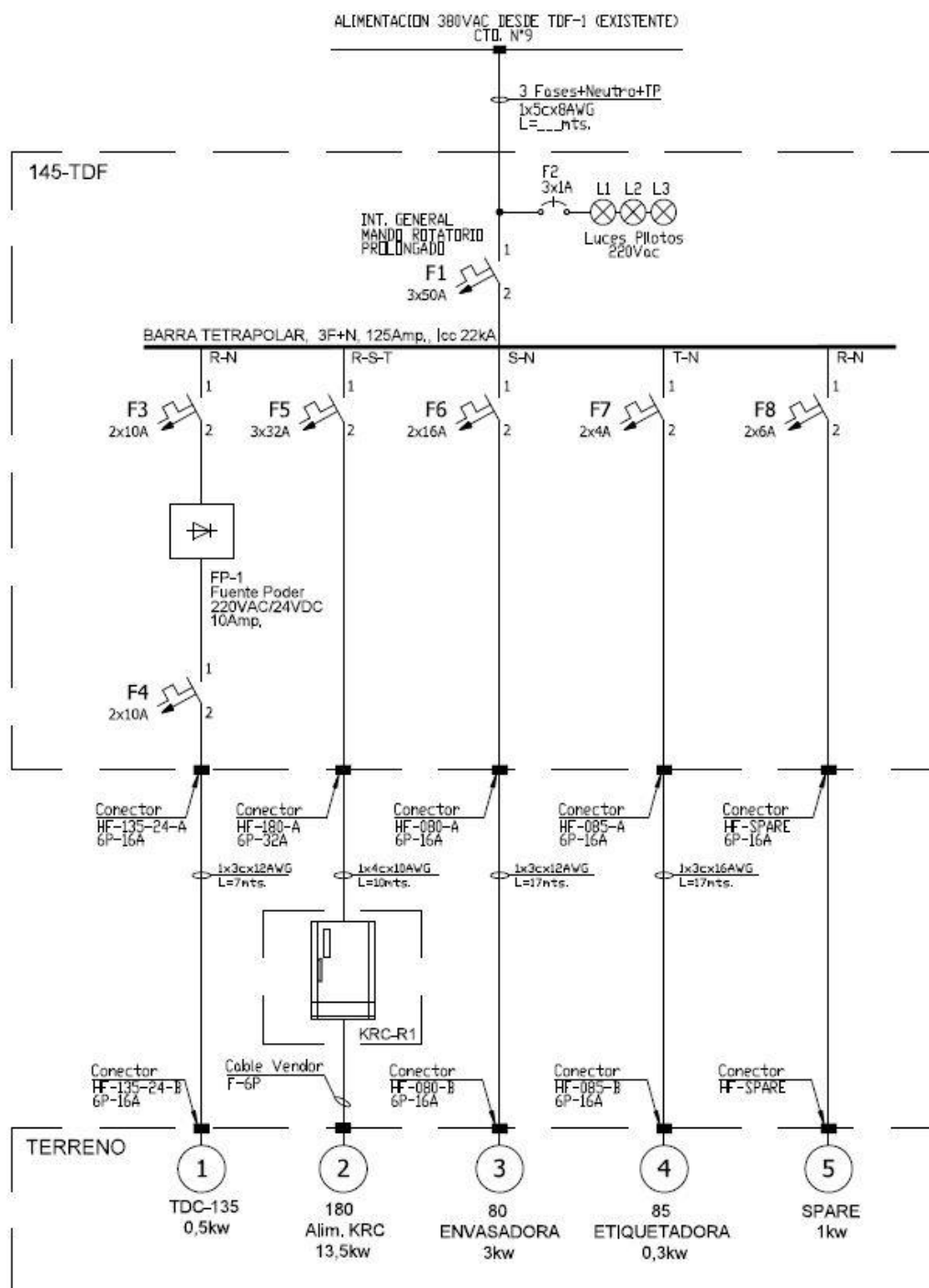


Ilustración 42 Plano unilineal del tablero de fuerza.

CUADRO DE CARGAS TABLERO DISTRIBUCION FUERZA 145-TDF						
CTD. Nº	EQUIPO	POTENCIA	PROTECC.	I NOMINAL	I PROTEC.	CABLE SUPERFLEX
	Protección Principal	17,96KW	F1	50A	3x50A	1x5cx8AWG
	Luces Piloto 220vac		F2	-	3x1A	1x1cx16AWG
	Fuente de Poder 220/24vac		F3	1,36A	2x10A	1x1cx12AWG
1	135, TDC-2 Tablero Distribución Control	0,23KW	F4	9,5A	2x16A	1x3cx12AWG
2	180, KRC Robot Homogenizado	13,5KW	F5	20,5A	3x32A	1x4cx10AWG
3	80, Envasador 220vac	3KW	F6	13,64A	2x16A	1x3cx12AWG
4	85, Etiquetadora 220vac	0,23KW	F7	1,05A	2x4A	1x3cx16AWG
5	Spare	1KW	F8	4,55A	2x6A	-

Ilustración 43 Cuadro de cargas TDF

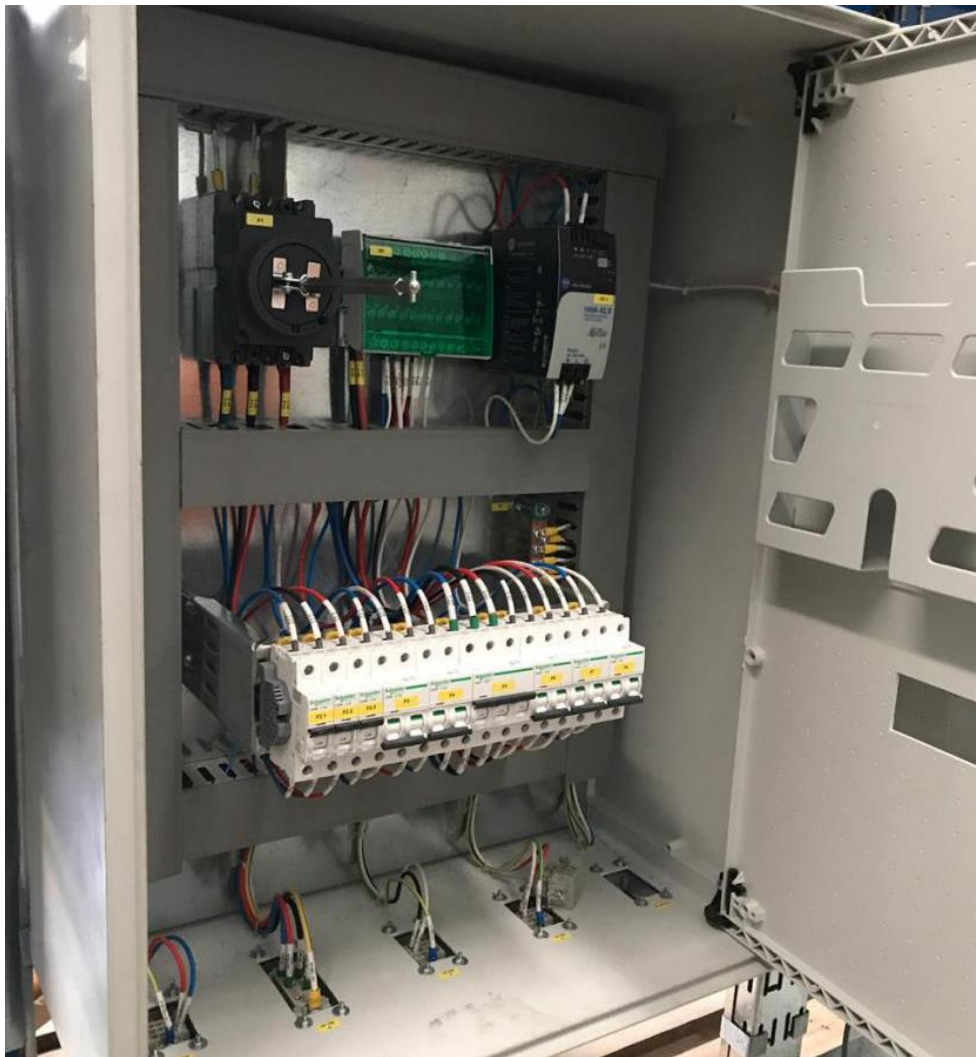


Ilustración 44 Tablero de fuerza del sistema robótico.

6.3 Creación de software

El sistema de homogenización contiene varios equipos que requieren del desarrollo de software para su funcionamiento. Manipulador robótico, controlador PLC, control HMI requieren todos de la programación de sus correspondientes softwares utilizando las herramientas expuestas en el capítulo 4.1.

6.3.1 Programa de manipulador robótico

En el inciso 5.5.1 se expone la estructura del programa del robot. En esta sección se ahondará más en el código de este programa. Los manipuladores robóticos KUKA se programan con el software KUKA.WorkVisual.

La arquitectura de los programas del controlador KRC4 consiste en 3 tipos de archivos:

- Archivos .src: contienen la lógica del programa. Las instrucciones de movimiento y lógica de programa se escriben en este tipo de archivos.
- Archivos .dat: son archivos que almacenan datos y variables. Es en este tipo de archivos donde se declaran los puntos de movimiento del robot
- Archivos .sub: corresponden a los llamados interpretes SUBMIT.

El controlador ejecuta siempre dos programas, el programa de robot, con toda la lógica operativa y de movimiento y un intérprete SUBMIT. Este último es un programa paralelo que se utiliza para el monitoreo independiente de variables globales y de sistema del controlador. También puede ser utilizado para ejecutar lógicas paralelas al programa del robot sin detener la ejecución del programa principal. En este sentido, pueden eventualmente realizar algunas tareas que en ambientes de programación tradicionales se realizan a través de interrupciones, como lo es la captura de señales. Una de las características principales del interprete SUBMIT es que siempre se está ejecutando incluso si no se está ejecutando un programa principal. Esto permite al controlador mantener un seguimiento de variables operativas aun estando detenido.

6.4 Arquitectura de control

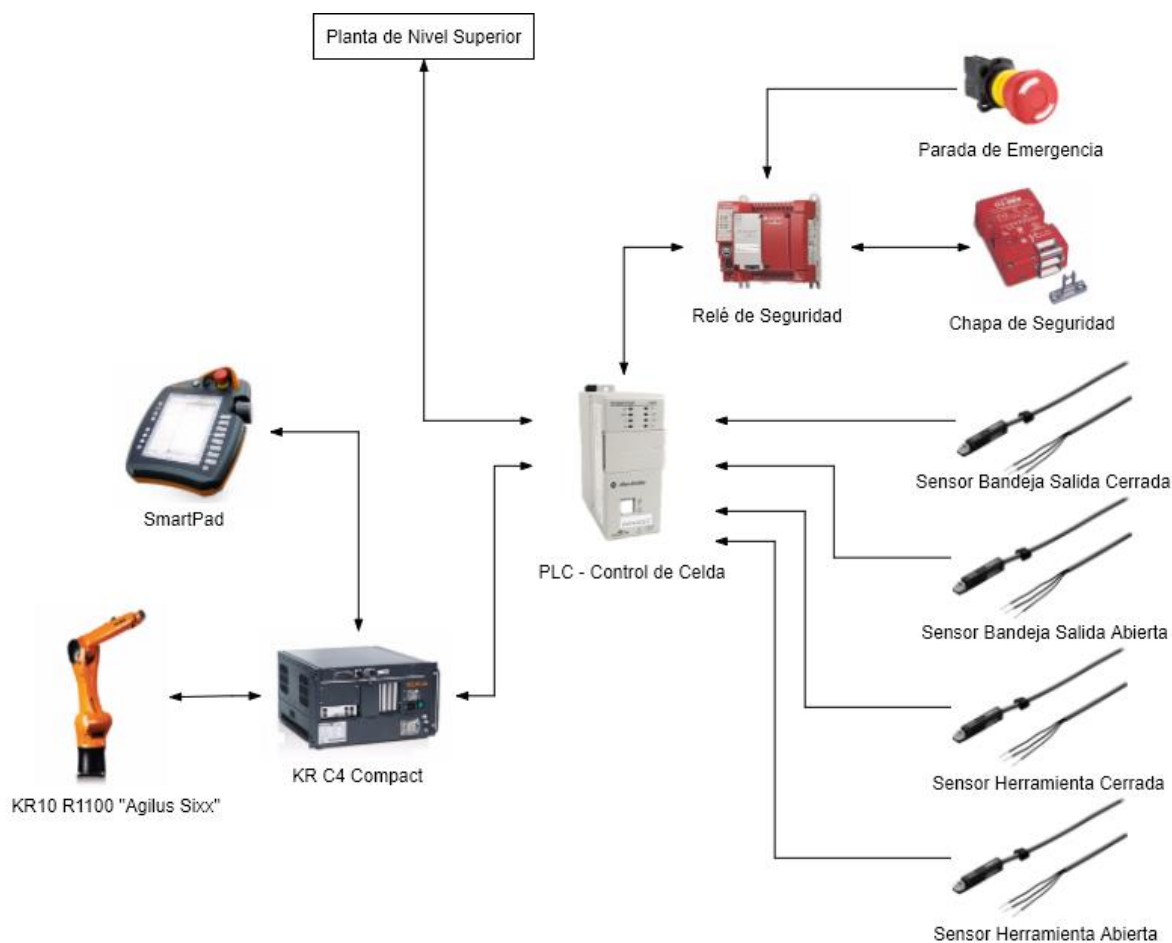


Ilustración 45 Diagrama de arquitectura de control

6.4.1 Estructura de programa

La estructura principal del programa del robot consta de un programa principal en el que se realiza la inicialización del sistema robótico y varias subrutinas, en las cuales se realizan acciones específicas, siendo la más importante la rutina de homogenización.

Los archivos del programa están estructurados en una estructura de carpetas que separa los programas según su función.

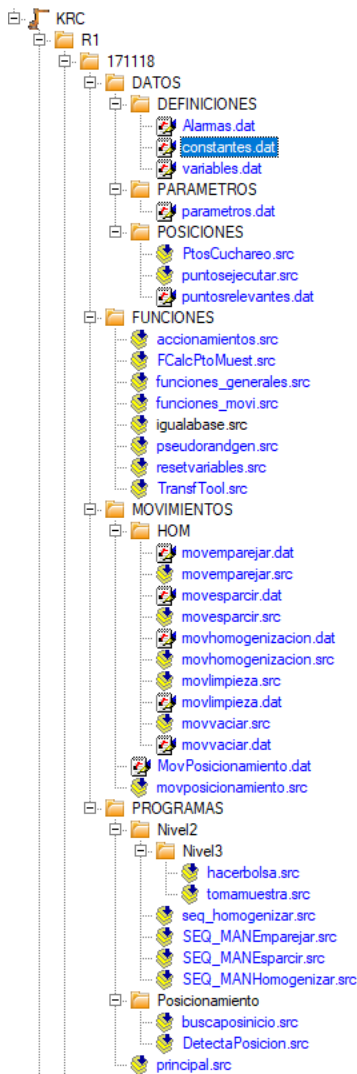


Ilustración 46 Estructura de carpetas del programa de homogenización

Las carpetas principales son:

- DATOS
- FUNCIONES
- MOVIMIENTOS
- PROGRAMAS

Dentro de la carpeta DATOS se encuentran los archivos que contienen todo lo que son datos de operación, declaración de variables globales y en particular, la definición de la malla de muestreo utilizada. También se encuentran definidos los

puntos importantes de los movimientos de robot, como el punto de inicio, posición de mantención, de envasadora, entre otros.

En la carpeta FUNCIONES se encuentran las definiciones de todas las funciones creadas para la operación del sistema.

La carpeta MOVIMIENTOS contiene la definición de todos los puntos de la operación del robot, además de contener las funciones que llaman a los movimientos. La lógica de estas funciones de movimiento esta descrita más adelante.

La carpeta PROGRAMAS incluye todos los programas de lógica del robot. Aquí se encuentran definidas todas las secuencias de operación, el programa principal y la rutina especial de recuperación de posición automática.

6.4.1.1 Programa principal

En este programa se realiza la iniciación de variables de ciclo de operación, se mueve el robot a la posición de inicio y se verifica si el robot se encuentra iniciando normalmente o debe reanudar desde la posición de ejecución anterior en caso de una detención inesperada.

Luego de las operaciones anteriores, el programa entra en un bucle donde queda a la espera del comando de iniciación de la rutina solicitada por el PLC.

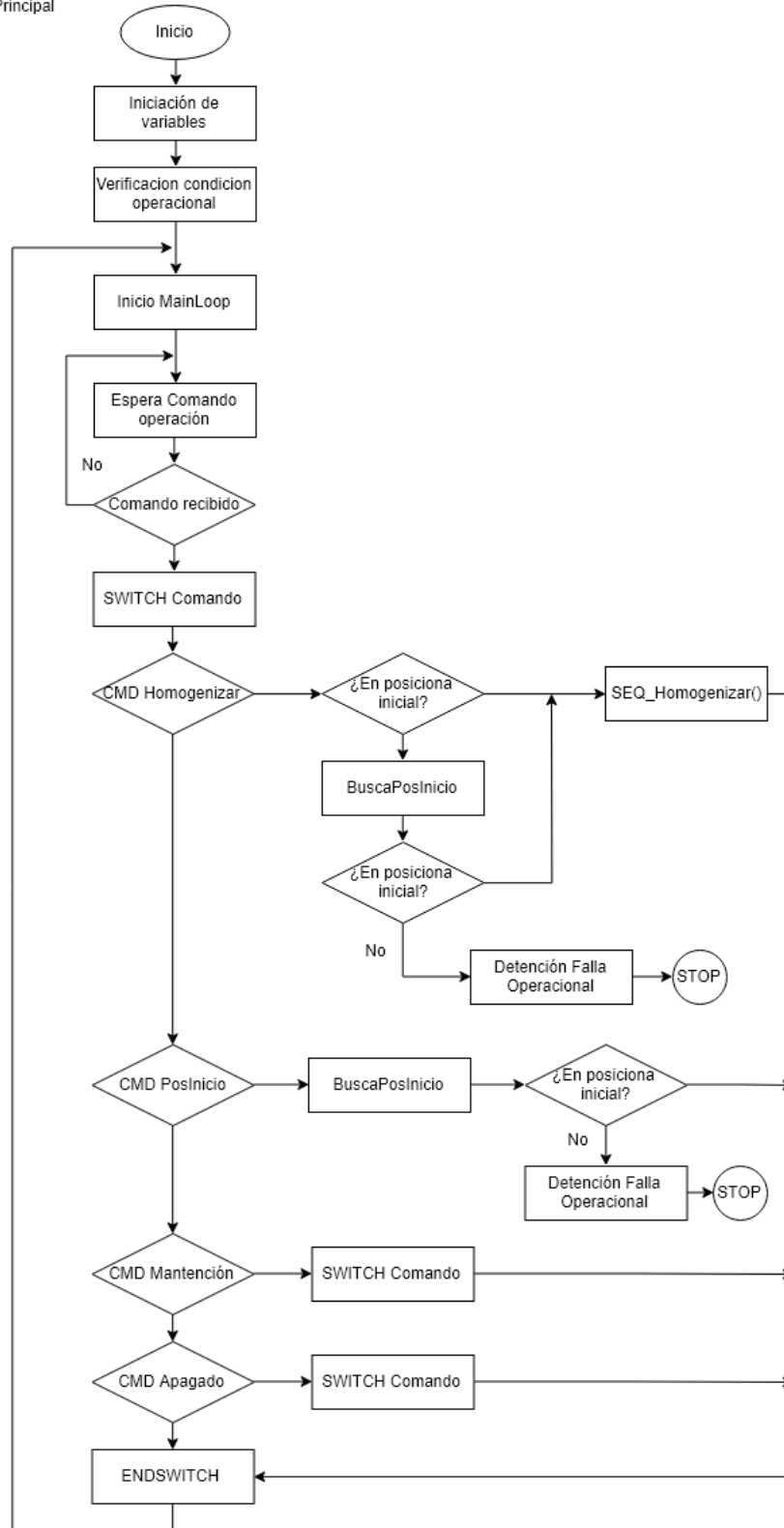


Ilustración 47 Diagrama de flujo del programa principal

```

LOOP
    EC_O_EnCiclo=FALSE

    IF NOT EC_I_HtaEnFalla THEN
        EC_O_FinCicloEnFalla=FALSE
    ENDIF

    EC_O_MainRun=TRUE
    EC_O_MainOp=TRUE
    WAIT SEC 0
    cancelarFalla=FALSE

    RESET_SEC_ACT() ;Reinicia siempre la variable de secuencia. Siempre parte
del principio

    REPEAT
        EC_O_EstadoRobot=1; espera comando
        CmdEjecutar=EC_I_CmdEjecutar
        EC_O_RecepcionCmd=TRUE
    UNTIL (CmdEjecutar <> 0)

    EC_O_EnCiclo=TRUE
    EC_O_RecepcionCmd=FALSE

    SWITCH CMD_NAME[CmdEjecutar]

        CASE #SEQ_Homogenizar

            ; DETERMINAR POSICION ACTUAL
            Posicion_Robot=DetectaPosicion()
            IF (POSICION_ROBOT==#Inicio) THEN
                GOTO INI_HOMOGEN
            ELSE
                ; BUSCAR POSICION INICIO

                IF BuscaPosInicio() THEN

                    ; DETERMINAR POSICION ACTUAL

                    Posicion_Robot=DetectaPosicion()

                    IF (POSICION_ROBOT==#Inicio) THEN

                        GOTO INI_HOMOGEN
                    ELSE
                        GOTO FIN_HOMOGEN
                    ENDIF
                ELSE
                    WAIT FOR FALSE
                    GOTO FIN_HOMOGEN
                ENDIF
            ENDIF
        INI_HOMOGEN:
        IF SEQ_Homogenizar() THEN
        ELSE
            WAIT FOR FALSE
        ENDIF

```

Este fragmento de código corresponde al programa principal del robot, donde se inicializan variables de operación y se produce la espera para la recepción de comando desde el PLC.

La sección REPEAT-UNTIL se corresponde con los tradicionales ciclos DO-WHILE en otros lenguajes. En esta sección se espera que la variable entera EC_I_CmdEjecutar, que corresponde a una entrada desde PLC, tenga un valor distinto de 0, lo que significa que un comando de acción fue enviado. Una vez obtenido, el valor ingresa en el bloque SWITCH-CASE que ejecuta la secuencia correspondiente al comando.

Los comandos existentes son:

- #Homogenizar: inicia la secuencia automática principal completa de homogenización
- #MAN_Esparcir: inicia la secuencia manual de esparcimiento.
- #MAN_Homogenizar: inicia la secuencia manual de homogenización.
- #MAN_Emparejar: inicia la secuencia manual de emparejamiento.
- #MAN_Tomamuestra: inicia la secuencia manual de toma de muestra
- #MAN_Limpieza: inicia la secuencia manual de limpieza
- #MovPosInicio: envía al robot a posición de inicio en modo manual
- #MovPosMantencion: envía al robot a posición de mantención en modo manual

Una vez ejecutado el comando el programa retorna al bucle de recepción de comando por medio de una instrucción LOOP-ENDLOOP.

6.4.1.2 Programa Homogenización

La rutina de homogenización ejecuta la operación fundamental del robot. Se subdivide en las etapas descritas en la sección anterior.

La ejecución del programa se realiza dentro de una estructura SWITCH-CASE. Para esto, cada sección de la rutina tiene asociada un número de etapa, el cual es evaluado cada vez que entra en la instrucción SWITCH. La variable que almacena la etapa en ejecución actual es definida como una variable global dentro del archivo de configuraciones del robot, por lo que el valor de ésta se retiene incluso luego de un reinicio completo del sistema.

La razón de esta estructura es que de esta forma el programa puede reanudar fácilmente desde cualquier punto pues, al ingresar a la rutina de homogenización y evaluar la instrucción SWITCH con la variable de etapa actual, el programa iniciara desde la última sección sin completar.

SEQ_Homogenizar

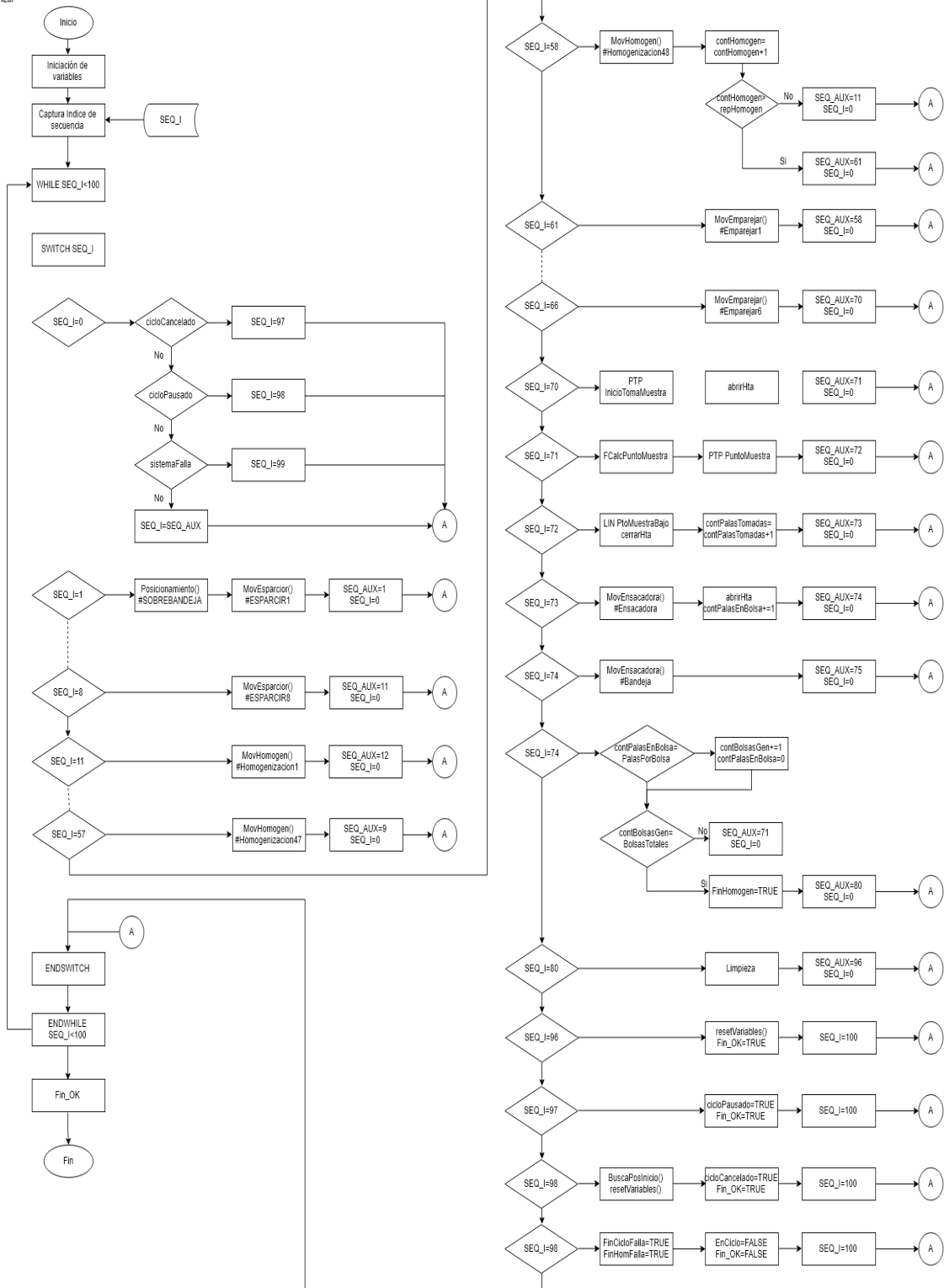


Ilustración 48 Diagrama de flujo del programa de homogenización

```

DEFFCT BOOL SEQ_Homogenizar( )

DECL INT SEQ_I
DECL INT SEQ_NIVEL
DECL INT SEQ_AUX
DECL BOOL FUN_OK
DECL BOOL BOOL_AUX

INI

PTP $POS_ACT
FUN_OK=FALSE
EC_O_EnCiclo=TRUE
SEQ_NIVEL=2
SEQ_I=SEC_ACT[SEQ_NIVEL]
SEQ_AUX=SEQ_I

WHILE SEQ_I<100

    SEC_ACT[SEQ_NIVEL]=SEQ_I
    IF SEQ_I>1 THEN
        SEQ_AnteriorHomogen=SEQ_I
    ENDIF

    ; Bloque estructura secuencia principal. El ciclo WHILE permite
que se avance por cada
    ; CASE, recorriendo el codigo completo.

    SWITCH SEQ_I

        ;*****
        ;          ESPARCIR
        ;*****

    CASE 0 ;Consulta por estado de ejecucion del programa

        ;PAUSA
        IF cicloPausado THEN
            SEQ_I=97
            GOTO ContinuaCiclo
        ENDIF

        ;CANCELAR
        IF cicloCancelado THEN
            SEQ_I=98
            GOTO ContinuaCiclo
        ENDIF

        ;FALLA (HTA)
        IF cancelarFalla THEN
            SEQ_I=99
            GOTO ContinuaCiclo
        ENDIF

```


El programa SEQ_Homogenizacion corresponde a la secuencia completa de homogenización. Esta construido con una estructura SWITCH-CASE dentro de un bucle WHILE. Cada CASE ejecuta una pequeña parte de la secuencia completa y a través del WHILE se van ejecutando todos los CASE uno tras otro en orden. Esto se logra con el manejo de la variable SEQ_I como índice de secuencia. Cada CASE tiene asignado un número que representa su índice y con este índice el SWITCH entra en el bloque correspondiente con cada iteración del ciclo. Al final de cada CASE se guarda en la variable el índice de la etapa siguiente.

Algunos de los CASE están reservados para realizar funciones especiales. El CASE 0 se utiliza para monitorear los comandos de detención de la secuencia. Los CASE del 96 al 99 manejan las instrucciones de salida de la secuencia para los casos de fin de ciclo normal, detención por pausa, detención por cancelación de secuencia y detención por falla de sistema, respectivamente.

Los CASE del 1 al 8 ejecutan los movimientos de esparcimiento de material; del 11 al 58 están los bloques de la homogenización; del 61 al 66 está el emparejado de material; del 70 al 75 se ejecuta la lógica de toma de muestra; el bloque 80 incluye los movimientos de la secuencia de limpieza.

El bloque 58 controla la repetición de la secuencia de homogenización, comparando las veces realizada frente al número de veces programado, llevando la secuencia de vuelta al bloque 11 si faltan repeticiones o avanzando al bloque 61 cuando se completan todas.

```
CASE 58
  MovHomogenizacion(#HOM_BLOCK48)
  contHomogenizacion=contHomogenizacion+1

  IF contHomogenizacion<=repHomogenizacion THEN
    SEQ_AUX=11
  ELSE
    SEQ_AUX=61
  ENDIF
  SEQ_I=0
```

De forma similar, el bloque 75 controla la cantidad de bolsas llenadas y cuantos incrementos se han tomado en cada una, llevando de vuelta al bloque 71 si faltan o avanzando al bloque 80 cuando se finaliza el muestreo.

6.4.1.3 Lógica de toma de muestra.

```

CASE 70
    FPtrVel(80)
    FSetBaseTool(1,4)

    PTP InicioTomaMuestra C_PTP

    SEQ_AUX=71
    SEQ_I=0

CASE 71
    abrirHta()
    ptoMuestra=FCalcPtoMuest(contPalasEnBolsa, contBolsasGen+1)
    ptoMuestraBajo=ptoMuestra
    ptoMuestraBajo.Z=0

    FSetBaseTool(1,4)
    FPtrVel(100)

    PTP ptoMuestra C_PTP

    SEQ_AUX=72
    SEQ_I=0

CASE 72
    FLinVel(2)
    FSetBaseTool(3,4)
    LIN ptoMuestraBajo
    cerrarHta()
    WAIT SEC 1
    contPalasTomadas=contPalasTomadas+1
    MaterialEnHta=TRUE

    CONTINUE
    IF contPalasTomadas==1 THEN
        PULSE ( EC_0_PrimerIncremento, TRUE, 1 )
    ENDIF
    CONTINUE

    SEQ_AUX=73
    SEQ_I=0

CASE 73
    FSetBaseTool(1,4)
    FLinVel(2)
    LIN ptoMuestra C_DIS
    MovVaciar(#TOMAMUESTRA_ENSACADORA)

    WAIT SEC 0
    WAIT FOR EC_I_EnsacadoraOK OR cicloCancelado

    IF NOT (cicloCancelado OR cancelarFalla) THEN

        abrirHta()
        MaterialEnHta=FALSE
        contPalasEnBolsa=contPalasEnBolsa+1
        WAIT SEC 0.5
        cerrarHta()
        WAIT SEC 0.5
        abrirHta()
        WAIT SEC 0.5
        cerrarHta()
        WAIT SEC 1

    ENDIF

    SEQ_AUX=74
    SEQ_I=0

CASE 74
    MovVaciar(#ENSACADORA_TOMAMUESTRA)
    cerrarHta()

    SEQ_AUX=75
    SEQ_I=0

CASE 75
    IF contPalasEnBolsa==PalasPorBolsa THEN
        contBolsasGen=contBolsasGen+1
        contPalasEnBolsa=0
        contPalasTomadas=0
    ENDIF

    IF contBolsasGen==BolsasTotales THEN
        EC_0_EnCicloHomogen=FALSE
        PULSE(EC_0_TerminaHomoOK,TRUE,2)
        SEQ_AUX=80
    ELSE
        SEQ_AUX=71
    ENDIF

    SEQ_I=0

```

Como se mencionó previamente, la lógica de toma de muestra esta construida en la secuencia principal de la rutina de homogenización, en los CASE desde el 70 al 75.

El CASE 70 funciona como bloque de ingreso, con el robot moviéndose a la posición inicial de toma de muestra.

En el CASE 71 es donde se determina el punto de la bandeja donde se va a tomar la muestra. Esto se realiza con la función *FCalcPtoMuest()*.

```
DEFECT E6POS FCalcPtoMuest(fnc_PalasEnBolsa:IN, fnc_ContBolsa:IN)

DECL E6POS fnc_PtoMuestreo
DECL INT fnc_ContBolsa
DECL INT fnc_PalasEnBolsa

fnc_PtoMuestreo={X 0,Y 0,Z 150,A -90,B -8,C 180}
PtosMuestreo(fnc_PalasEnBolsa+(fnc_ContBolsa)*20)
fnc_PtoMuestreo.X=70+offsetTomaMuestraX*(NPx-1)
fnc_PtoMuestreo.Y=10+offsetTomaMuestraY*(NPy-1)

RETURN fnc_PtoMuestreo
-ENDEFCT
```

Esta función toma dos parámetros de entrada, el número de incrementos que se han tomado y la cantidad de bolsas terminadas. Estos valores se utilizan para el cálculo del punto a muestrear.

Se inicializa el punto base *fnc_PtoMuestreo* que funciona como *placeholder* para recibir las coordenadas del punto de muestra. Luego, se ejecuta la subrutina *PtosMuestreo* con los parámetros de entrada, lo que devuelve el valor de las coordenadas del punto de muestreo respecto de la matriz de muestreo (no de las coordenadas cartesianas espaciales). Dentro de esta subrutina está definida la malla de muestreo a utilizar como dos vectores, uno para la coordenada X y otro para la coordenada Y, respecto de la matriz creada en la bandeja y descrita en la sección **5.4.6**. El índice con el que se busca la coordenada para X e Y dentro de la malla se calcula con el número de incremento y de bolsa.

```

DEF PtosMuestreo (NumXY:in)
DECL INT NumXY

;*****MALLA MUESTREO*****

; 1 7 3 10 5
; 4 8 6 2 9

; primer cuchareo

PtoX[20]=3
PtoX[21]=7
PtoX[22]=2
PtoX[23]=5
PtoX[24]=10
PtoX[25]=1
PtoX[26]=10
PtoX[27]=4
PtoX[28]=8
PtoX[29]=7
PtoX[30]=3
PtoX[31]=1
PtoX[32]=2
PtoX[33]=8
PtoX[34]=4
PtoX[35]=5
PtoX[36]=9
PtoX[37]=6
PtoX[38]=6
PtoX[39]=9

PtoY[20]=2
PtoY[21]=5
PtoY[22]=5
PtoY[23]=2
PtoY[24]=5
PtoY[25]=2
PtoY[26]=2
PtoY[27]=5
PtoY[28]=5
PtoY[29]=2
PtoY[30]=5
PtoY[31]=5
PtoY[32]=2
PtoY[33]=2
PtoY[34]=2
PtoY[35]=5
PtoY[36]=5

```

Obtenidos los valores X e Y del punto de muestreo en la malla, se procede a convertirlos a coordenadas espaciales para el robot. Esto se hace con las expresiones siguientes:

```

fnc_PtoMuestreo.X=70+offsetTomaMuestraX*(NPx-1)
fnc_PtoMuestreo.Y=10+offsetTomaMuestraY*(NPY-1)

```

Los *offset* que aparecen en las expresiones están declarados en el archivo *parámetros.dat* y corresponden a la equivalencia entre los incrementos en las coordenadas de matriz de muestreo en milímetros. Para el proyecto, los valores son 115 mm para X y 114 mm para Y.

Luego de determinar el punto de muestreo, el robot se mueve al punto generado.

El CASE 72 es donde efectivamente se toma el incremento. Para esto se usa el punto auxiliar *PtoMuestraBajo*, que crea junto con el punto de muestra con las mismas coordenadas X e Y, pero con la coordenada Z en 0. Luego de bajar, el robot ordena cerrar la pala de la herramienta y contabiliza el incremento como tomado (no ingresado en bolsa).

El CASE 73 inicia con el desplazamiento a la ensacadora. Una vez allí ordena abrir la pala para liberar el material. Aquí recién se contabiliza el incremento como en la bolsa.

El CASE 74 corresponde al movimiento de regreso a la bandeja para el siguiente incremento.

En el CASE 75, como se mencionó antes, se determina y continuar tomando más incrementos para la bolsa actual, si la bolsa se llenó y se debe continuar con la siguiente o si ya todas las bolsas están listas.

6.4.1.4 Manejo de fallas y detenciones

La estructura segmentada del programa permite el seguimiento de la ejecución de la rutina mediante índices de secuencia, variables que almacenan el número de secuencia en ejecución. En caso de que se produzca una detención de la ejecución, por comando, por falla o por activación del circuito de seguridad, el robot es capaz de determinar en qué etapa de la ejecución del programa se encontraba y puede reanudar la ejecución automáticamente. Para ello el robot depende de dos rutinas instrumentales a este propósito, una función de detección de la posición donde se encuentra el robot y una función que, basado en esa posición, permite al robot llegar de forma autónoma a la posición inicial.

La razón por la que una simple reanudación desde el punto donde quedo en la última ejecución no es posible, es que en caso de una detención no controlada producto de la activación del circuito de seguridad el robot detiene la ejecución total del software, entrando en un estado STOP2. En este caso, el puntero de ejecución de programas se pierde y no existe forma para el controlador de retomar el mismo

puntero. Por este motivo es que se diseña una secuencia de recuperación que funciona de forma general para todos los tipos de detenciones.

6.4.1.4.1 Detección de posición

La detección de posición se realiza a través de la comparación de las posiciones angulares de cada uno de los ejes del robot respecto de posiciones de referencia. Las posiciones de referencia son puntos relevantes en la rutina del robot. Estas referencias son los equivalentes en coordenadas angulares de los puntos cartesianos utilizados en la rutina. La comparación se realiza con todas las referencias, con una tolerancia de coincidencia de $\pm 0.5^\circ$. Cuando el programa detecta una coincidencia dentro del rango de aceptación, el robot tiene la información requerida para iniciar la secuencia de recuperación, que lo lleva a la posición inicial.

6.4.1.4.2 Recuperación de posición inicial.

Una vez detectada la posición actual del robot, se entra en una rutina donde se encuentran programadas las trayectorias desde todos los puntos y zonas de referencia hasta la posición inicial. Algunas son movimientos directos mientras que otras tienen una serie de operaciones lógicas adicionales. Un ejemplo de esto es en el caso en que la detención se produzca durante el transporte de material desde la bandeja hasta la maquina ensacadora. El robot no puede simplemente ir hasta el punto inicial puesto que derramaría el material cargado, arruinando la muestra del lote completo. Por esto, el programa incluye variables de seguimiento de carga que le permiten saber si tiene material o no y en base a eso, determinar si antes de ir a la posición inicial debe realizar la descarga. Al hacer esto, la lógica de conteo de incrementos debe ejecutarse igualmente para no perder la continuidad del muestreo.

6.4.1.5 Estructura de programas de movimientos

Para llevar un control en la estructura del programa del robot, se diseñó una estructura en la que las operaciones lógicas se mantienen separadas de las instrucciones de movimiento. Esto se logra creando estas instrucciones en subrutinas separadas que son llamadas a través de un parámetro. El parámetro

utilizado es una variable *ENUM*, que es un tipo de dato que almacena una lista de nombres.

Se crearon distintas variables *ENUM* para cada etapa del proceso, donde se almacenaron los nombres de los bloques de movimientos que le corresponden a cada una.

```

DEFDAT Constantes PUBLIC

;*****
;                               TIPOS DE DATOS
;*****

GLOBAL ENUM TYPE_ENUM_PRI SEQ_Homogenizar, MAN_Esparcir, MAN_Homogenizar, MAN_Empar
GLOBAL ENUM TYPE_ENUM_HOMOGEN ESParcir, Homogenizar, Emparejar, NULL
GLOBAL ENUM TYPE_TOMAMUESTRA TomaIncremento, Vaciar
GLOBAL ENUM TYPE_CMD_MOV_ESPARCIR ESP_Inicio, ESP_Barrido1, ESP_Barrido2, ESP_Barrido3, ESP_Barrido4
GLOBAL ENUM TYPE_CMD_MOV_EMPAREJAR EMP_Barrido1, EMP_Barrido2, EMP_Barrido3, EMP_Barrido4
GLOBAL ENUM TYPE_CMD_MOV_HOMOGENIZAR HOM_Block1, HOM_Block2, HOM_Block3, HOM_Block4
GLOBAL ENUM TYPE_CMD_MOV_LIMPIEZA LIM_InicioLimpAire, LIM_LimpAire, LIM_PosAireSobr
GLOBAL ENUM TYPE_CMD_MOV_POSICION Inicio_SobreBandeja, Inicio_Ensacadora, Inicio_Ma
GLOBAL ENUM TYPE_CMD_MOV_VACIAR TomaMuestra_Ensacadora, Ensacadora_Tomamuestra, FAL
GLOBAL ENUM TYPE_POSROB Inicio, SobreBandeja, TomaMuestra, Ensacadora, Apagado, Man

;*****
;                               VARIABLES COMANDOS
;*****

DECL GLOBAL TYPE_ENUM_PRI CMD_NAME[10]

CMD_NAME[1]=#SEQ_Homogenizar|
CMD_NAME[2]=#MAN_Esparcir
CMD_NAME[3]=#MAN_Homogenizar
CMD_NAME[4]=#MAN_Emparejar
CMD_NAME[5]=#MAN_TomaMuestra
CMD_NAME[6]=#MAN_Limpieza
CMD_NAME[7]=#MovPosInicio
CMD_NAME[8]=#MovPosMantencion
CMD_NAME[9]=#MovPosApagado
CMD_NAME[10]=#NULL

ENDDAT

```

Como se muestra aquí, se crean los *ENUM* con el nombre tipo *TYPE_CMD_MOV_####* y el nombre de la sección a la que corresponde.

```

DEF MovEsparcir (CMD_MOV :IN)
    DECL TYPE_CMD_MOV_ESPARCIR CMD_MOV
    ACINI
        FAccel(50)
        FPtpVel(60)
        FLinVel(0.8)

        SWITCH CMD_MOV

            CASE #ESP_INICIO

                FAccel(50)
                FPtpVel(60)
                FSetBaseTool(1,3)

                PTP PosSobreBandeja C_PTP
                PosSobreBandejaAxis=$AXIS_ACT

                PTP Esparcir_P1_P1 C_PTP C_DIS

            CASE #ESP_BARRIDO1

                FLinVel(0.8)
                FSetBaseTool(2,3)
                LIN Esparcir_P1_P2 C_DIS
                LIN Esparcir_P1_P3 C_DIS

                FLinVel(0.5)
                LIN Esparcir_P1_P4 C_DIS

                FLinVel(0.8)
                LIN Esparcir_P1_P5 C_DIS

            CASE #ESP_BARRIDO2

                FSetBaseTool(2,3)
                LIN Esparcir_P1_P6 C_DIS
                |
                FSetBaseTool(2,2)
                LIN Esparcir_P1_P7 C_DIS

                FSetBaseTool(2,1)
                LIN Esparcir_P1_P8 C_DIS

                FSetBaseTool(2,3)
                LIN Esparcir_P1_P9 C_DIS

            CASE #ESP_BARRIDO3

```

Aquí se puede ver como se define la subrutina de movimientos para la etapa de esparcimiento. Está definida para recibir un parámetro de entrada (*CMD_MOV*) del tipo *TYPE_CMD_MOV_ESPARCIR*, que está definido para contener los nombres de las secciones.

La función de movimiento recibe el parámetro y entra en un bloque SWITCH-CASE que coteja el nombre de la sección a ejecutar.


```

CASE 2
  MovEsparcir(#ESP_BARRIDO1)
  SEQ_AUX=3
  SEQ_I=0
CASE 3
  MovEsparcir(#ESP_BARRIDO2)
  SEQ_AUX=4
  SEQ_I=0
CASE 4
  MovEsparcir(#ESP_BARRIDO3)
  SEQ_AUX=5
  SEQ_I=0
CASE 5
  MovEsparcir(#ESP_NIVELAR1)
  SEQ_AUX=6
  SEQ_I=0
CASE 6
  MovEsparcir(#ESP_NIVELAR2)
  SEQ_AUX=7
  SEQ_I=0
CASE 7
  MovEsparcir(#ESP_NIVELAR3)
  SEQ_AUX=8
  SEQ_I=0
CASE 8
  MovEsparcir(#ESP_NIVELAR4)
  SEQ_AUX=11
  SEQ_I=0

```

Luego, en la secuencia de homogenización, o en los comandos manuales de movimiento, la función *MovEsparcir* es llamada en secuencia con los nombres de las etapas deseadas.

6.4.2 Conectividad Robot-PLC

La conexión entre el controlador del robot y el PLC se realiza a través del protocolo de comunicación industrial *Ethernet/IP*. La configuración de la trama de dato consta de 54 Bytes de Salida y 44 Bytes de Entrada.

Por el lado del robot la configuración se realiza especificando los Bytes de la trama de datos, por lo tanto, se introducen los valores 54 y 44 para las salidas y entradas respectivamente. En el caso del PLC, se debe ingresar la cantidad de Palabras (WORD de 16 bit) a utilizar, por lo que se debe ingresar la mitad de los valores anteriores.

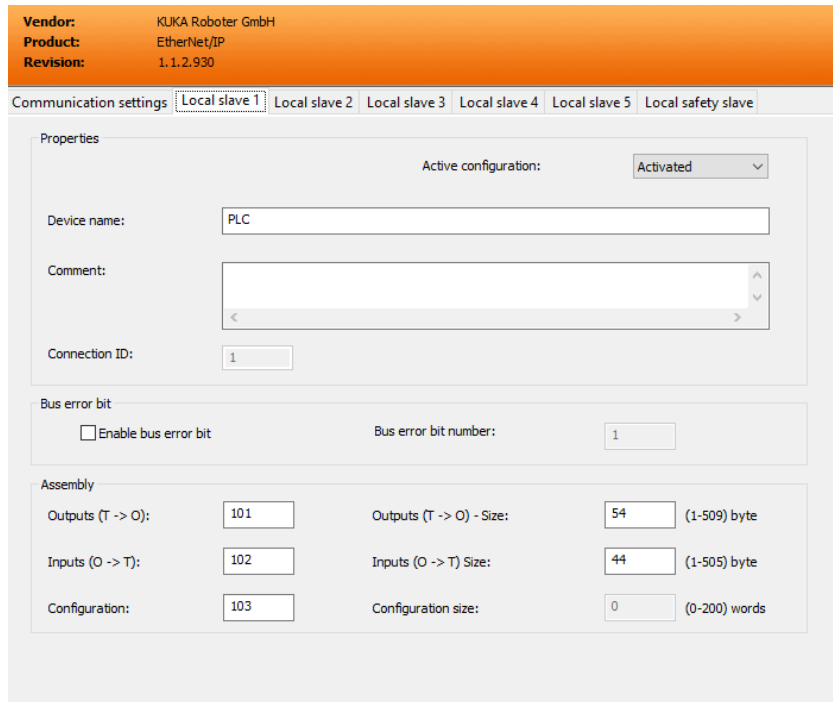


Ilustración 49 Ventana de configuración de comunicación *EthernetIP* del robot.

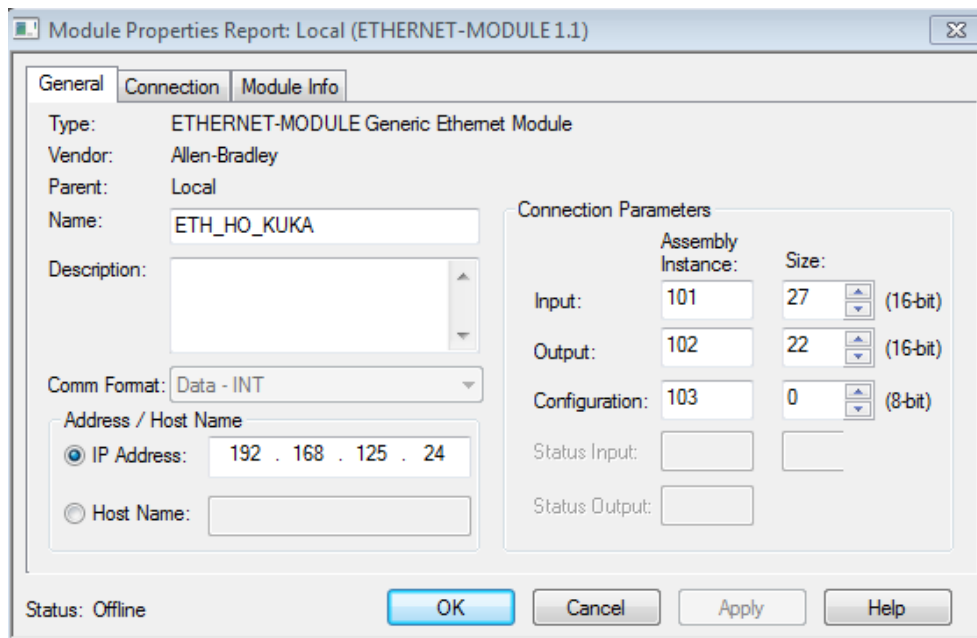


Ilustración 50 Ventana de configuración de comunicación *EthernetIP* del PLC

Una vez configurado el tamaño del *frame* de datos que se utilizara, se procede a hacer el *mapping* de los bits entre PLC y Robot. Esto se hace en WorkVisual, en la configuración de I/O de bus de campo.

The screenshot shows the 'Circuito EA' software interface. The top part has a tree view on the left under 'E/S' with sub-items: 'Entradas analógicas', 'Salidas analógicas', 'Entradas digitales', and 'Salidas digitales'. On the right, there's another tree view under 'Buses de campo' with items: 'Resolver Digital Converter (RDC)', 'Electronic Mastering Device (EMD)', 'KUKA System Bus (SYS-X48)', 'CIB Safety Module (SION-CIB)', 'Safety Interface Board SIB Standard (SION-SIB-STD)', and 'EtherNet/IP'. Below these are two tables showing I/O configurations.

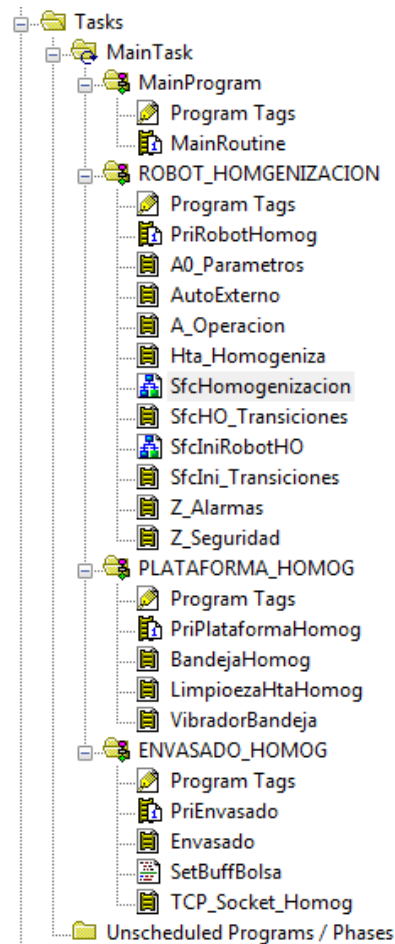
Name	Tipo	Descripción	E/S	E/S	Name	Tipo	Dirección
SIN[1]#G	BYTE		←	←	001:0001 Input	BYTE	0
SIN[9]#G	BYTE		←	←	001:0002 Input	BYTE	1
SIN[17]#G	BYTE		←	←	001:0003 Input	BYTE	2
SIN[25]#G	BYTE		←	←	001:0004 Input	BYTE	3
SIN[33]#G	BYTE		←	←	001:0005 Input	BYTE	4
SIN[41]#G	BYTE		←	←	001:0006 Input	BYTE	5
SIN[49]#G	BYTE		←	←	001:0007 Input	BYTE	6
SIN[57]#G	BYTE		←	←	001:0008 Input	BYTE	7
SIN[65]#G	BYTE		←	←	001:0009 Input	BYTE	8
SIN[73]#G	BYTE		←	←	001:0010 Input	BYTE	9
SIN[81]#G	BYTE		←	←	001:0011 Input	BYTE	10
SIN[89]#G	BYTE		←	←	001:0012 Input	BYTE	11
SIN[97]#G	BYTE		←	←	001:0013 Input	BYTE	12
SIN[105]#G	BYTE		←	←	001:0014 Input	BYTE	13
SIN[113]#G	BYTE		←	←	001:0015 Input	BYTE	14

Name	Tipo	Descripción	E/S	E/S	Name	Tipo	Dirección
SIN[1]#G	BYTE		←	←	001:0001 Input	BYTE	0
SIN[9]#G	BYTE		←	→	001:0001 Output	BYTE	0
SIN[17]#G	BYTE		←	→	001:0002 Input	BYTE	1
SIN[25]#G	BYTE		←	→	001:0002 Output	BYTE	1
SIN[33]#G	BYTE		←	→	001:0003 Input	BYTE	2
SIN[41]#G	BYTE		←	→	001:0003 Output	BYTE	2
SIN[49]#G	BYTE		←	→	001:0004 Input	BYTE	3
SIN[57]#G	BYTE		←	→	001:0004 Output	BYTE	3
SIN[65]#G	BYTE		←	→	001:0005 Input	BYTE	4
SIN[73]#G	BYTE		←	→	001:0005 Output	BYTE	4
SIN[81]#G	BYTE		←	→	001:0006 Input	BYTE	5
SIN[89]#G	BYTE		←	→	001:0006 Output	BYTE	5
SIN[97]#G	BYTE		←	→	001:0007 Input	BYTE	6
SIN[105]#G	BYTE		←	→	001:0007 Output	BYTE	6
SIN[113]#G	BYTE		←	→	001:0008 Input	BYTE	7
SIN[121]#G	BYTE		←	→	001:0008 Output	BYTE	7
SIN[129]#G	BYTE		←	→	001:0009 Input	BYTE	8
SIN[137]#G	BYTE		←	→	001:0009 Output	BYTE	8
SIN[145]#G	BYTE		←	→	001:0010 Input	BYTE	9
SIN[153]#G	BYTE		←	→	001:0010 Output	BYTE	9
SIN[161]#G	BYTE		←	→	001:0011 Input	BYTE	10

At the bottom, the status bar shows '8 bit(s) seleccionados en 1 señal(es)' on both sides.

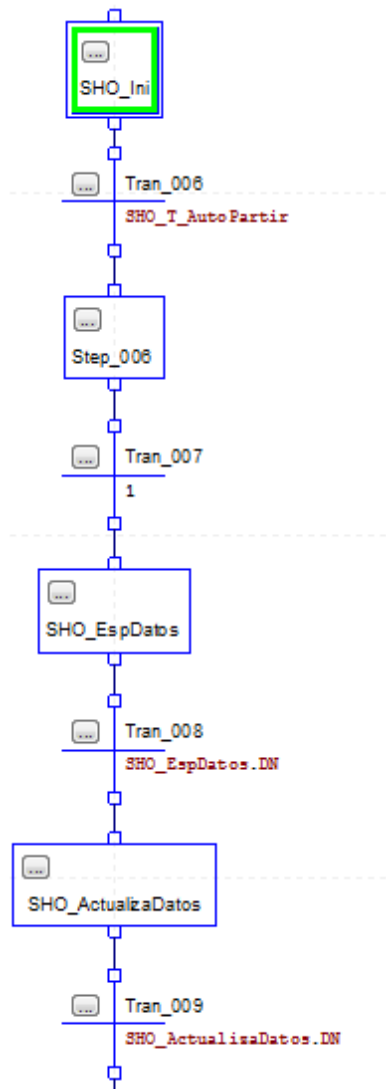
En este listado aparecen todos los bits de todos los bus de campos incorporados al robot. Se unen los bits de entrada del robot con los bits de salida del bus de campo requerido - en este caso, *EthernetIP* - utilizando *Drag&Drop*. Lo mismo se debe realizar con las salidas de robot y las entradas de bus. Los bits automáticamente se agrupan en *BYTES* para ser incorporados al *frame* de comunicación.

6.4.3 Programa de PLC

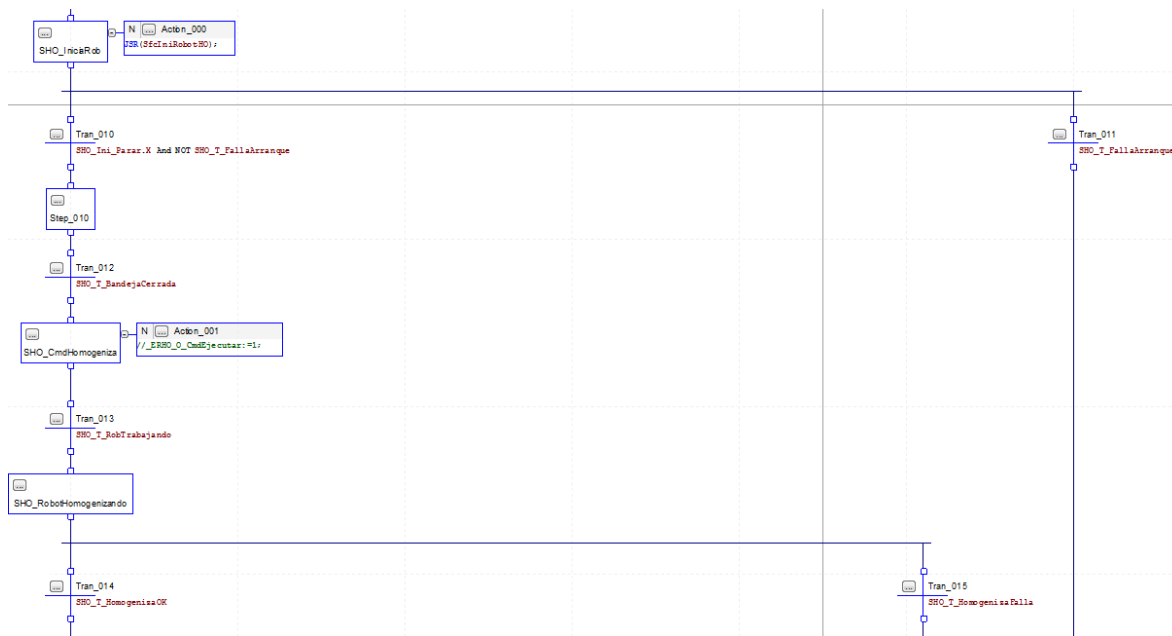


El programa de PLC separa la planta en tres componentes principales, a saber, el robot de homogenización, la bandeja de homogenización y la maquina envasadora.

La secuencia de operación del sistema, que incluye la operación del robot, la envasadora y todos los actuadores del sistema, está definida en un archivo SFC. Aquí, está programada la secuencia desde el arranque del robot, la apertura de la bandeja, el envío de comandos de PLC al robot y las secuencias de manejo de fallas.



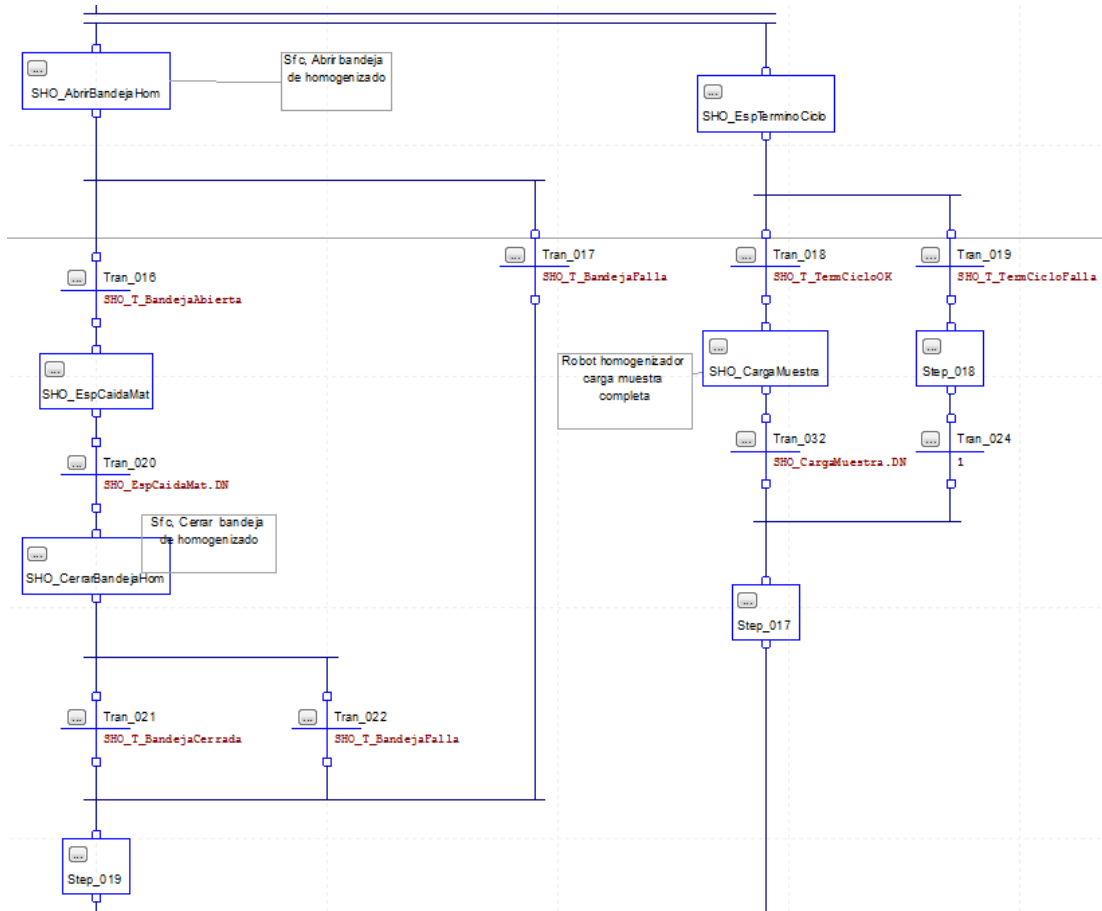
En esta primera sección del SFC el PLC inicia la secuencia marcando el inicio de la operación en modo automático, espera los datos desde la HMI y los carga en el sistema, ajustando las variables internas del PLC y las variables parametrizadas del robot.



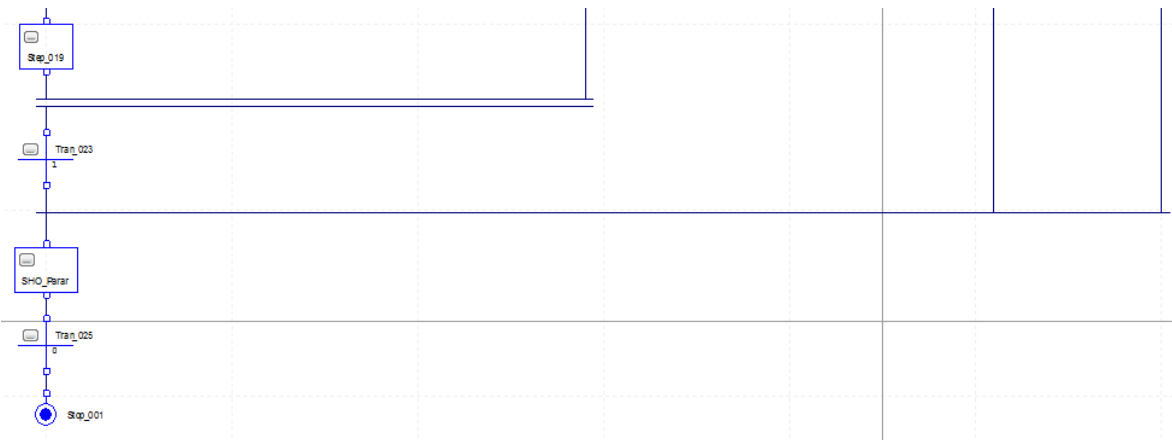
Luego, el PLC arranca el robot en caso de que no esté arrancado y verifica que el robot se encuentra en estado operativo. Aquí se ve el primer *branch* del SFC que es si la operación de arranque no se ejecuta exitosamente, situación en la que el programa se desvía por *FallaArranque*. A continuación, se verifica que la bandeja se encuentra cerrada y la cierra en caso de que no lo esté. Operativamente, no es factible que la bandeja se encuentre abierta puesto que se entiende que el material fue depositado en el sistema y, por lo tanto, la bandeja se encuentra cerrada. Aun así, esto se verifica por motivos de seguridad.

Una vez la bandeja se verifique cerrada, se envía el comando al robot para que inicie la operación de homogenización. En este punto, el programa de robot se encuentra en la sección de espera de comando. Desde aquí, el programa queda en espera a que el robot termine su operación.

La detección de la operación se hace a través de la variable del robot *EC_O_EnCicloHomogen*, que es una entrada en el PLC. Cuando esta variable queda en *FALSE*, el SFC reanuda su ejecución y entra en un segundo *branch* de verificación de falla. Aquí espera la llegada una de dos variables, *EC_O_TerminaHomoOK* o *EC_O_TerminaHomoEnFalla* y determina si debe proseguir con la secuencia o continuar en la línea de la salida por falla.



Aquí el SFC entra en un proceso paralelo. Por una parte, el robot prosigue con su operación en la etapa de limpieza, mientras que el PLC continúa con la operación de descarga de material de la bandeja y la limpieza de esta.



Finalmente, se llega a la salida del SFC. En este punto se conectan todas las líneas de escape del programa por falla, lo que lleva a la terminación de la ejecución del SFC.

6.4.4 Programa HMI

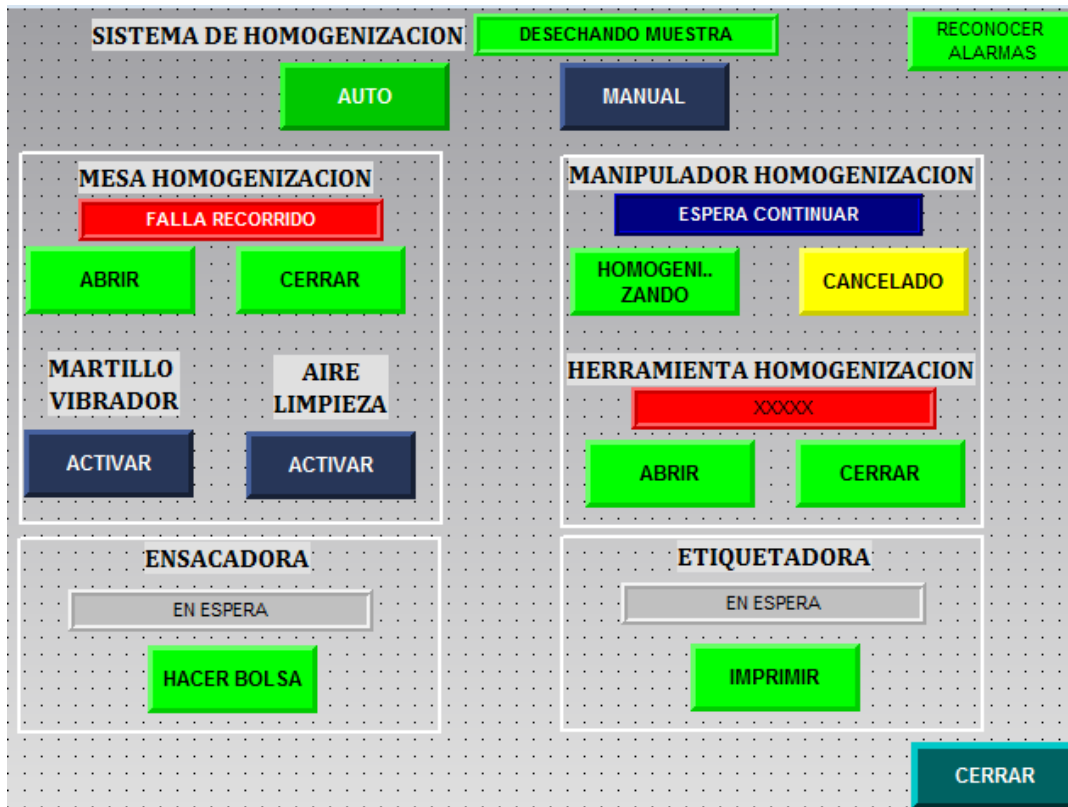


Ilustración 51 Pantalla de operación de sistema de homogenización

Esta pantalla contiene los indicadores y botones necesario para la correcta operación del SRHC. Tiene 5 zonas definidas.

6.4.4.1 Zona de indicación general de estado



Ilustración 52 Indicador general de estado

Esta zona se compone de un indicador de texto y tres botones indicadores. El cuadro indicador de texto muestra los siguientes mensajes:

- **ESPERA HOMOGENIZACIÓN:** El SRHC está operativo y en espera de la descarga de material sobre la bandeja para iniciar su operación en modo automático o el comando de inicio en modo manual.
- **FALTA CONDICIÓN OPERACIÓN:** El sistema se encuentra inhabilitado debido a que no se cumplen todas las condiciones operacionales y de seguridad requeridas para el funcionamiento del equipo.
- **INICIANDO:** el robot se encuentra en el ciclo de arranque.
- **HOMOGENIZANDO:** el sistema se encuentra realizando el ciclo de homogenización, operando normalmente.
- **DESECHANDO MUESTRA:** el sistema se encuentra en el proceso de apertura de bandeja liberando el material sobrante.
- **FALLA IMPRESORA:** el equipo detecta que la impresora no está operativa por estar en falla o por desconexión.
- **FALLA ENVASADORA:** el equipo detecta que la envasadora no se encuentra operativa por estar en falla o por desconexión.
- **FALLA MANIPULADOR:** el equipo detecta que el manipulador robótico se encuentra en falla producto de diversos posibles factores.
- **PARADA DE EMERGENCIA:** el sistema indica que existe algún interruptor de parada de emergencia activado.

Los botones son:

- **AUTO:** indica si el sistema se encuentra en modo automático cuando está de color verde y cambia a modo automático cuando se presiona si está en modo manual y se encuentra de color azul. En modo automático el sistema funciona acoplado al sistema de muestreo y controla la ejecución de la operación en

conjunto con la operación de muestreo. Los equipos individuales del sistema no pueden ser accionados de forma manual durante el modo automático.

- **MANUAL:** indica si el sistema se encuentra en modo manual cuando está de color verde y cambia a modo automático cuando se presiona si está en modo automático y se encuentra de color azul. En modo manual el sistema queda desacoplado del sistema de muestreo y entrega al operador la opción de accionar todos los equipos individualmente. En modo manual la secuencia de homogenización no puede iniciar por medio de comandos del sistema de muestreo.
- **RECONOCER ALARMAS:** cuando se encuentra de color verde indica que todas las alarmas han sido reconocidas y el sistema se encuentra habilitado para operar. Si se encuentra de color azul indica que alguno de los sistemas de seguridad se acciono o alguna falla de equipo ocurrió lo que deshabilita el sistema y requiere que las alarmas sean reconocidas. Presionar el botón reconoce y rearma el sistema solo bajo la condición de que todas las condiciones de alarma sean corregidas

6.4.4.2 Zona de operación de bandeja de homogenización



Ilustración 53 Zona Bandeja de Homogenización

Esta sección de la pantalla controla la operación manual de la bandeja de homogenización. Tiene un indicador de estado y cuatro botones. Los estados mostrados por el indicador son los siguientes:

N°	Descripción	Adicional
0	APAGADA	Fijo
1	INTERMEDIA	Parpadeo
2	ABRIENDO	Parpadeo
3	CERRANDO	Parpadeo
4	ABIERTA	Fijo
5	CERRADA	Fijo
6	PERMISO ABRIR	Parpadeo
7	PERMISO CERRAR	Parpadeo
9	INTERMEDIA	Parpadeo
10	ABRIENDO	Parpadeo
11	CERRANDO	Parpadeo
12	ABIERTA	Fijo
13	CERRADA	Fijo
14	PERMISO ABRIR	Parpadeo
15	PERMISO CERRAR	Parpadeo
16	XXXXXXXX	Parpadeo
17	XXXXXXXX	Parpadeo
19	INTERMEDIA	Parpadeo
20	ABRIENDO	Parpadeo
21	CERRANDO	Parpadeo
22	ABIERTA	Fijo
23	CERRADA	Fijo
24	XXXXXXXX	Parpadeo
25	FALLA DE SENSORES	Parpadeo
26	FALLA DE HABILITACION	Parpadeo
27	FALLA DE RECORRIDO	Parpadeo
28	XXXXXXXX	Parpadeo
29	XXXXXXXX	parpadeo
30	XXXXXXXX	parpadeo

- Los botones ABRIR y CERRAR accionan la válvula solenoide que comanda el cilindro de la bandeja de homogeneización, realizando la acción respectiva.
- El botón MARTILLO VIBRADOR activa el vibrador neumático instalado en la tolva de descarga de material.
- El botón AIRE LIMPIEZA activa la boquilla de aire comprimido utilizada para la limpieza de la herramienta de homogeneización.

6.4.4.3 Zona de operación de ensacadora



Ilustración 54 Zona ensacadora

La zona de operación de ensacadora contiene un indicador y un botón. Los mensajes del indicador son los siguientes:

- FUERA DE LÍNEA: la máquina envasadora se encuentra desconectada o fuera de modo automático. Esto puede ser por un error en la conexión o una falla operativa.
- EN ESPERA: la máquina envasadora se encuentra operativa y a la espera del comando de acción para generar una bolsa.
- HACIENDO BOLSA: la máquina envasadora se encuentra actualmente en el proceso de generar una bolsa.

El botón HACER BOLSA comanda a la máquina envasadora a generar una bolsa de forma manual.

6.4.4.4 Zona de operación manipulador



Ilustración 55 Zona Operación Manipulado Homogenización

Esta zona incluye dos botones y un indicador. Los mensajes mostrados en el indicador son los siguientes:

N°	Descripción	Adicional
0	INICIO SECUENCIA	Fijo
1	AUTO EXTERNO FALLA	Fijo
2	MANIPULADOR APAGADO	Fijo
3	NO CALIBRADO	Fijo
4	FUERA MODO EXTERNO	Fijo
5	SPS FUERA DE SERVICIO	Fijo
6	PARADA DE EMERGENCIA	Fijo
7	PROTECCIÓN DEL OPERADOR	Fijo
8	PROGRAMA DETENIDO	Fijo
9	PROG.DET.LISTO ARRANQUE	Fijo
10	EX. ARRANCANDO	Parpadeo
11	EX. HAB. ACCIONAMIENTOS	Parpadeo
12	EX. CONF. MENSAJES	Parpadeo
13	EX. ARRANQUE PROGRAMA	Parpadeo
14	EX. VÁLIDA PROGRAMA	Parpadeo
15	EX. ESPERA VALIDACIÓN	Parpadeo
16	EX. FINALIZADO	Parpadeo
17	PARADA DE EMERGENCIA ROBOT	Fijo
20	PROGRAMA FUNCIONANDO	Fijo
21	FUNCIONANDO SERVICIO	Fijo
22	FUNCIONANDO MANUAL	Fijo
23	FUNCIONANDO AUTOMATICO	Fijo
25	BUSCANDO INICIO	Fijo
26	HOMOGENIZANDO	Fijo
27	TOMANDO MUESTRA	Fijo
28	LIMPIANDO HERRAMIENTA	Fijo
29	ESPERANDO ETIQUETADORA	Fijo
30	ESPERANDO ENVASADORA	Fijo
39	LIMPIANDO HERRAMIENTA	Fijo
40	BUSCANDO INICIO	Fijo
42	ESPERA COMANDO	Fijo
43	ESPERA CONTINUAR	Fijo

El botón **HOMOGENIZAR** permite el inicio manual de la secuencia de homogenización. Cuando esto sucede el botón cambia el mensaje a **HOMOGENIZANDO** y el color de azul a verde. Mientras el manipulador está realizando su rutina de operación este mensaje se mantiene hasta que finaliza. El botón **CANCELAR** envía el comando al manipulador para cancelar la operación en la que actualmente se encuentra y reinicia el sistema quedando listo para una

operación nueva. Mientras se produce la cancelación el botón cambia a color amarillo y muestra el mensaje CANCELANDO.

6.4.4.5 Zona operación herramienta homogenización



Ilustración 56 Operación herramienta de homogenización

Esta sección comanda la válvula solenoide que acciona el mecanismo de la herramienta de homogenización. Por lo mismo, el funcionamiento de esta zona es idéntico al de la mesa de homogenización descrito en el inciso 5.1.3.

6.4.4.6 Zona operación etiquetadora



Ilustración 57 Operación de etiquetadora

Esta zona permite el control de la etiquetadora ubicada en la máquina ensacadora. Contiene dos elementos, un botón y un indicador. Los mensajes que el indicador muestra son:

- FUERA DE LÍNEA: la etiquetadora se encuentra desconectada o fuera de modo automático. Esto puede ser por un error en la conexión o una falla operativa.
- EN ESPERA: la etiquetadora se encuentra operativa y a la espera del comando de acción para etiquetar una bolsa.
- HACIENDO BOLSA: la etiquetadora se encuentra actualmente etiquetando una bolsa.

El botón IMPRIMIR indica a la etiquetadora que imprima una etiqueta sobre el film en el sector que será la próxima bolsa.

7 Validación del sistema y resultados

Para realizar la validación del sistema y analizar el rendimiento de éste, se preparó una prueba en terreno comparando los resultados de la muestra entre el proceso del sistema y el proceso actual de muestreo en piso, midiendo para esta prueba de validación inicial solo el porcentaje de humedad. Para ello, una empresa certificadora se encargó de llevar a cabo los protocolos de forma cerrada.

El procedimiento de muestreo a piso parte con el volcado de todo el material del camión en una superficie limpia del piso y luego, desde la pila formada, una retroexcavadora realiza una división sistemática de la pila tomando paladas en posiciones aleatorias y dejándolas a piso en dos lugares de forma intercalada, generando dos submuestras. Luego, de cada submuestra un operador toma los incrementos en puntos aleatorios alrededor de cada pila utilizando una lanza de muestreo generando dos muestras finales. El muestreo a piso se realiza posterior al muestreo realizado por el sistema robótico.

El sistema robótico se configuro para trabajar en su capacidad máxima de 3 muestras de 20 incrementos y adicionalmente, del material sobrante se extrajo manualmente una muestra extra de 20 incrementos utilizando una pala JIS-15 idéntica a la instalada en la herramienta de homogenización.

Para efectos de la prueba las muestras no fueron embolsadas, siendo depositadas en la maquina ensacadora normalmente, pero recibiendo el material en contenedores limpios.

Se definió que la diferencia máxima aceptable entre el proceso actual y el sistema robótico no debe superar el 0,5%. Además, se definió que una diferencia mayor a 0,2% sería aprobada con observaciones. Paralelamente, la varianza entre las muestras no debe ser mayor a 0,001 para que se considere estadísticamente valido.

7.1 Resultados de pruebas

Tabla 1 Resultados de las pruebas de humedad. En amarillo, los casos en los que existe observación.

MUESTRA	ORIGEN MUESTRA	% H2O	PROMEDIO	VARIANZA	DIF. PROM ROB-PISO/ROB-MAN
1	ROB-HOM-1	8,81014	8,81007	0,00039	
	ROB-HOM-2	8,78596			
	ROB-HOM-3	8,83413			
	MAN-BAND	8,79133			0,01875
	PISO-1	9,01925	8,97025	0,00240	0,16017
	PISO-2	8,92125			
2	ROB-HOM-1	8,36268	8,34070	0,00049	
	ROB-HOM-2	8,31033			
	ROB-HOM-3	8,34910			
	MAN-BAND	8,27396			0,06674
	PISO-1	8,60551	8,58189	0,00056	0,24118
	PISO-2	8,55826			
3	ROB-HOM-1	8,92489	8,87745	0,00126	
	ROB-HOM-2	8,83967			
	ROB-HOM-3	8,86780			
	MAN-BAND	8,83294			0,04452
	PISO-1	8,99428	8,96821	0,00068	0,09076
	PISO-2	8,94214			
4	ROB-HOM-1	8,23461	8,22806	0,00044	
	ROB-HOM-2	8,19959			
	ROB-HOM-3	8,24997			
	MAN-BAND	8,28706			0,05900
	PISO-1	8,32853	8,32235	0,00004	0,09430
	PISO-2	8,31617			
5	ROB-HOM-1	9,04199	9,03292	0,01495	
	ROB-HOM-2	8,87886			
	ROB-HOM-3	9,17790			
	MAN-BAND	9,09715			0,06423
	PISO-1	9,09481	9,13196	0,00138	0,09904
	PISO-2	9,16912			
6	ROB-HOM-1	8,70605	8,66362	0,00112	
	ROB-HOM-2	8,66048			
	ROB-HOM-3	8,62431			
	MAN-BAND	8,67434			0,01072
	PISO-1	8,90957	8,88387	0,00066	0,22025
	PISO-2	8,85816			
7	ROB-HOM-1	9,17619	9,15849	0,00020	
	ROB-HOM-2	9,14156			
	ROB-HOM-3	9,15773			
	MAN-BAND	9,11681			0,04168
	PISO-1	9,27627	9,34858	0,00523	0,19009
	PISO-2	9,42088			
8	ROB-HOM-1	8,43273	8,37566	0,00174	
	ROB-HOM-2	8,35999			
	ROB-HOM-3	8,33427			
	MAN-BAND	8,38359			0,00793
	PISO-1	8,47176	8,45193	0,00039	0,07627
	PISO-2	8,43210			

9	ROB-HOM-1	8,80792	8,79365	0,00048	
	ROB-HOM-2	8,76267			
	ROB-HOM-3	8,81034			
	MAN-BAND	8,74985			0,04380
	PISO-1	8,82759	8,81141	0,00026	0,01777
	PISO-2	8,79524			
10	ROB-HOM-1	8,66642	8,65847	0,00089	
	ROB-HOM-2	8,61858			
	ROB-HOM-3	8,69042			
	MAN-BAND	8,62174			0,03674
	PISO-1	8,69172	8,66134	0,00092	0,00286
	PISO-2	8,63095			
11	ROB-HOM-1	8,69219	8,68886	0,00053	
	ROB-HOM-2	8,71521			
	ROB-HOM-3	8,65918			
	MAN-BAND	8,60122			0,08764
	PISO-1	8,65291	8,65989	0,00005	0,02897
	PISO-2	8,66687			
12	ROB-HOM-1	8,78479	8,77297	0,00098	
	ROB-HOM-2	8,73016			
	ROB-HOM-3	8,80397			
	MAN-BAND	8,77193			0,00104
	PISO-1	8,71623	8,69987	0,00027	0,07310
	PISO-2	8,68350			
13	ROB-HOM-1	8,81046	8,80377	0,00049	
	ROB-HOM-2	8,77408			
	ROB-HOM-3	8,82678			
	MAN-BAND	8,58629			0,21749
	PISO-1	8,64629	8,64456	0,00000	0,15921
	PISO-2	8,64283			
14	ROB-HOM-1	8,66712	8,63552	0,00054	
	ROB-HOM-2	8,62732			
	ROB-HOM-3	8,61211			
	MAN-BAND	8,61009			0,02543
	PISO-1	8,54619	8,53293	0,00018	0,10259
	PISO-2	8,51967			
15	ROB-HOM-1	8,70889	8,70395	0,00041	
	ROB-HOM-2	8,67713			
	ROB-HOM-3	8,72584			
	MAN-BAND	8,70877			0,00482
	PISO-1	8,71255	8,71300	0,00000	0,00905
	PISO-2	8,71346			
16	ROB-HOM-1	8,71956	8,75207	0,00159	
	ROB-HOM-2	8,72844			
	ROB-HOM-3	8,80823			
	MAN-BAND	8,76684			0,01476
	PISO-1	9,02639	8,98852	0,00143	0,23645
	PISO-2	8,95065			
17	ROB-HOM-1	8,96405	8,96434	0,00014	
	ROB-HOM-2	8,95007			
	ROB-HOM-3	8,97889			
	MAN-BAND	7,56619			1,39815
	PISO-1	7,71147	7,67666	0,00121	1,28768
	PISO-2	7,64185			

18	ROB-HOM-1	7,24167	7,28215	0,01439	0,01856	
	ROB-HOM-2	7,15970				
	ROB-HOM-3	7,44509				
	MAN-BAND	7,26359	7,33359	0,00516		0,05144
	PISO-1	7,40541				
	PISO-2	7,26178				
19	ROB-HOM-1	7,72715	7,85113	0,51241	0,93993	
	ROB-HOM-2	7,04301				
	ROB-HOM-3	8,78323				
	MAN-BAND	8,79106	8,90816	0,00045		1,05703
	PISO-1	8,92938				
	PISO-2	8,88694				
20	ROB-HOM-1	8,82319	8,79659	0,00037	0,03223	
	ROB-HOM-2	8,78855				
	ROB-HOM-3	8,77801				
	MAN-BAND	8,76435	8,70787	0,00122		0,08872
	PISO-1	8,67300				
	PISO-2	8,74274				

La **tabla 1** muestra los resultados de las pruebas de operación del sistema, en las que se midió el porcentaje de humedad del material y se comparó con el proceso de muestreo y homogenización existente. La fórmula utilizada para el cálculo de la varianza es la indicada en la *ecuación 1*, mostrada en el inciso 3.1.1.2. El término s_{PA}^2 de la ecuación en este caso es 0 puesto que no existen procesos posteriores a este que contribuyan a la varianza total del proceso de muestreo.

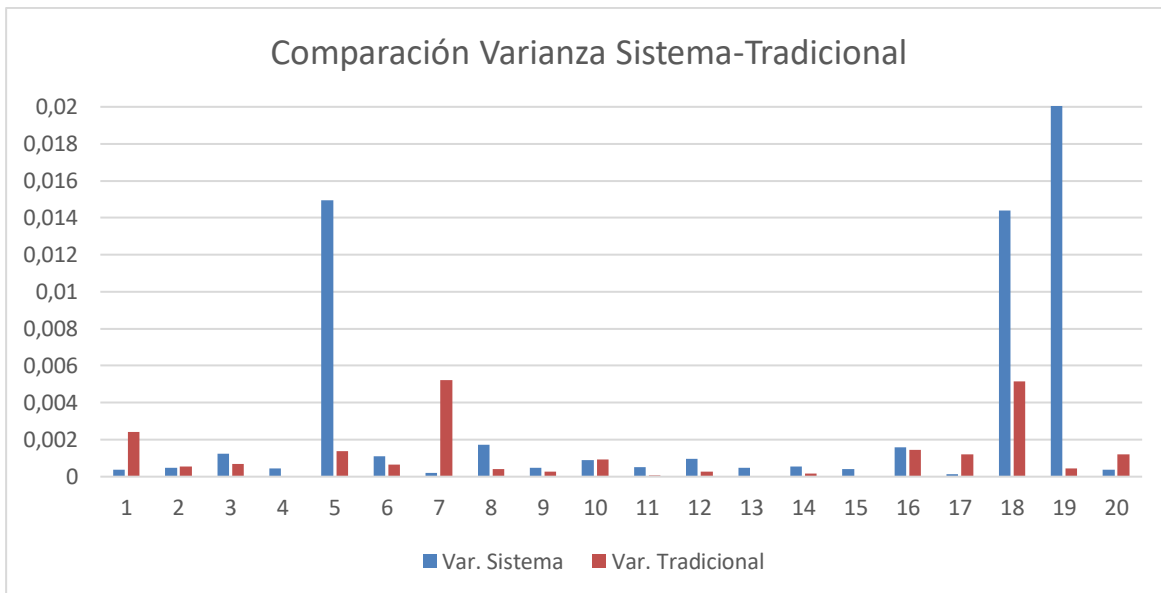


Gráfico 1 comparativa de la varianza entre los resultados para el muestreo con el sistema robótico (Azul) frente al muestreo tradicional en piso (Rojo).

Basados en las condiciones estipuladas en la sección anterior, se puede ver que los resultados del sistema robótico son prometedores. Con 2 resultado rechazados por estar fuera de rango, el sistema muestra una aceptabilidad del 90%. Además, en vista de que la diferencia entre el porcentaje de humedad reportado en la muestra del sistema robótico y la muestra tradicional excede por mucho el rango de aceptación y que es mayor a dos veces la desviación estándar entre los resultados, podemos determinar que dichos valores no son estadísticamente relevantes.

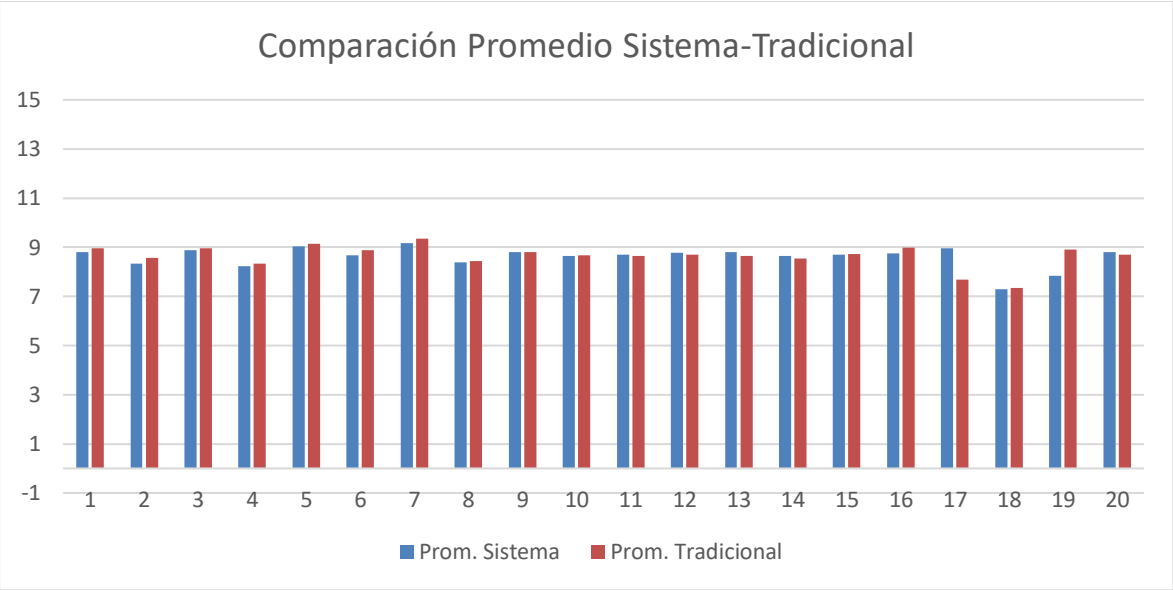


Gráfico 2 comparativa de las medias entre los resultados para el muestreo con el sistema robótico (Azul) frente al muestreo tradicional en piso (Rojo).

Mas preocupante es que 7 de las 20 muestras procesadas por el sistema presentan una varianza superior al valor de corte definido. Esto significa que la toma de muestra realizada por el sistema no presenta la consistencia entre muestras para asegurar que el muestreo fue realizado correctamente. Sin embargo, se aprecia también que el muestreo en piso presenta el mismo rendimiento en este aspecto, con 7 resultados donde la varianza supera el valor de corte. Esto puede ser interpretado como que el sistema robótico presenta el mismo desempeño que el muestreo tradicional.

8 Conclusiones

Gracias al trabajo realizado para llevar a cabo este proyecto podemos obtener una serie de conclusiones respecto de la operación de un sistema automático para la replicación del proceso de homogenización y toma de muestra:

1. La calidad del muestreo hecho por el sistema robótico es a lo menos igual que la realizada por el proceso tradicional de homogenización manual si nos basamos únicamente en el resultado de los análisis del porcentaje de agua en las muestras que, estando dentro del rango de varianza definido como aceptable, muestra valores muy similares al proceso tradicional.
2. Si bien el sistema robótico presenta un desempeño similar al proceso tradicional, aun se puede mejorar en la consistencia de las muestras tomadas, como se evidencia con la varianza tan variable.
3. El sistema cumple el objetivo de replicar el proceso de homogenización tradicional. Esto implica que con más desarrollo sería posible crear un diseño que impulse una mejora significativa al muestreo.
4. Los componentes seleccionados para la ejecución del proyecto fueron adecuados, presentando la funcionalidad requerida para el trabajo.
5. El diseño de la herramienta de homogenización, que fue pensado específicamente para replicar el actuar de un operador humano y evitar la necesidad de un intercambiador de herramientas, queda demostrado como una alternativa válida para realizar las operaciones de homogenización y muestreo, considerando que este fue una prueba de concepto exitosa.

9 Referencias

1. ISO 12743, *Copper, lead, zinc and nickel concentrates – Sampling procedures for determination of metal and moisture content* (ISO: Geneva) (2018)
2. Francois-Bongarcon, D., & Gy, P. (2002). *The most common error in applying Gy's Formula in the theory of mineral sampling, and the history of the liberation factor*. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 102(8), 475-479.
3. Pitard, F. F. (1993). *Pierre Gy's sampling theory and sampling practice: heterogeneity, sampling correctness, and statistical process control*. CRC Press.
4. Gy, P. (2012). *Sampling of particulate materials theory and practice* (Vol. 6). Elsevier.
5. KUKA (2012), *KUKA System Software 8.2, Operating and Programming Instructions for System Integrators*, Germany
6. KUKA (2003), *KR C2 / KR C3 Expert Programming*, Germany
7. 24horas.cl. (2014, febrero 24). *Fiscalía desbarata banda que robaba concentrado de cobre*. Retrieved from <https://www.24horas.cl/nacional/fiscalia-desbarata-banda-que-robaba-concentrado-de-cobre-1093760>
8. A. A., & R. P. (2016, October 27). *Las huellas de 4 mil toneladas de concentrado de cobre de Codelco que se esfumaron en el desierto*. Retrieved from <https://ciperchile.cl/2016/10/27/las-huellas-de-las-4-mil-toneladas-de-cobre-de-codelco-que-se-esfumaron-en-el-desierto/>
9. Bazán, V., Sarquis, P., Brandaleze, E., & Orozco, I. (2010, December). *CARACTERIZACIÓN DE CONCENTRADOS DE COBRE PRODUCIDOS EN ARGENTINA PARA ANALIZAR LA FACTIBILIDAD DE LA INSTALACIÓN DE UNA PLANTA PIROMETALÚRGICA*. Retrieved from https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052010000300008#tab1.

10. Jamasmie, C. (2018, March 07). Rio Tinto autonomous trucks now hauling a quarter of Pilbara material. Retrieved from <http://www.mining.com/rio-tinto-autonomous-trucks-now-hauling-quarter-pilbara-material/>