

**DESARROLLO DE APLICACIONES DE SIMULACIÓN DE PROCESOS  
INDUSTRIALES UTILIZANDO LOS SISTEMAS ROBÓTICOS LEGO  
MINDSTORM**

**INVESTIGADORES:  
ÁLVARO EDUARDO GONZÁLEZ TARAZONA  
ROGERIO PORRAS BENÍTEZ**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PIEDRECUESTA  
AÑO 2012**

**DESARROLLO DE APLICACIONES DE SIMULACIÓN DE PROCESOS  
INDUSTRIALES UTILIZANDO LOS SISTEMAS ROBÓTICOS LEGO  
MINDSTORM**

**DIRECTORES DEL PROYECTO:  
MSC. CLAUDIA LEONOR RUEDA GUZMÁN  
MSC. ORLANDO FEDERICO GONZÁLEZ CASALLAS**

**INVESTIGADORES:  
ÁLVARO EDUARDO GONZÁLEZ TARAZONA  
ROGERIO PORRAS BENÍTEZ**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PIEDECUESTA  
AÑO 2012**

**Cada una de las metas alcanzadas hasta ahora  
Hacen parte de nuestro caminar en esta vida  
Terrena por lograr desarrollarme integralmente.  
Hoy al culminar los estudios profesionales,  
Queremos expresar nuestra eterna gratitud a  
Dios y a todas las personas  
Que hicieron posible este logro.**

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan sus agradecimientos a:

A Dios por la vida y por entregarnos la fuerza, entendimiento paciencia y amor en todos los momentos vividos durante nuestra carrera

Orlando Federico González Casallas, Ingeniero Industrial y Director de la investigación por su colaboración y su valiosa orientación.

Claudia Leonor Rueda Guzmán, Ingeniera Electrónica y Directora de la investigación por su valiosa orientación.

A la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga, por brindarnos todos los medios necesarios para llevar a feliz término nuestro proyecto.

## TABLA DE FIGURAS

Figura 1 Ecuación Control PID.....	16
Figura 2El vehículo April.....	17
Figura 3Planta petrolera México .....	21
Figura 4 Planta hecha con Solidedge.....	22
Figura 5Versión experimental Brick MIT .....	26
Figura 6Versión Comercial RCX.....	27
Figura 7Versión NXT. ....	28
Figura 8Motor sistema NXT. ....	29
Figura 9Sensor de Luz. ....	30
Figura 10Sensor de Contacto .....	30
Figura 11Sensor Ultrasónico.....	31
Figura 12Sensor de color RGB.....	32
Figura 13Batería Recargable LEGO. ....	33
Figura 14 Banda Transportadora.....	35
Figura 15 Ensamble Envase - Tapa.....	35
Figura 16. Diagrama de Flujo.....	41
Figura 18. Comportamiento Tiempos Proceso Tapado.....	46
Figura 19. Comportamiento Tiempos Proceso Selección. ....	48
Figura 20. Comportamiento Tiempos Almacenaje. ....	50
Figura 21. Comportamiento Tiempos Totales .....	52
Figura 23 Diagrama de bloques del sistema de control .....	54
Figura 24 Diagrama de Procesos .....	55
Figura 25. Sensores Banda Transportadora (botellas).....	56
Figura 26. Motor Banda Transportadora.....	56
Figura 27. Banda Transportadora (Botellas).....	57
Figura 28. Diagrama de procesos (Posición Banda Transportadora) .....	58
Figura 29. Sensores Banda Transportadora.....	59
Figura 30. Motor Banda Transportadora.....	59
Figura 31. Banda Transportadora (Tapas).....	60
Figura 32. Diagrama de procesos (Posición Banda Transportadora Tapas).....	61
Figura 33. Motor de Tapado.....	62
Figura 34. Pistón de Tapado.....	63
Figura 35. Diagrama de Procesos (Posición Pistón de Tapado) .....	64
Figura 36. Motores Brazo Robótico .....	65
Figura 37. Brazo Robótico Selección de Color.....	66
Figura 38. Brazo Robótico unido a un NXT .....	66
Figura 39. Diagrama de Procesos (Posición Brazo Selector) .....	67

Figura 40. Distribución de los motores del Monta Carga.....	68
Figura 41. Componentes del Monta Cargas .....	68
Figura 42. Recorrido Monta Carga .....	69
Figura 43. Diagrama de procesos (Posición Monta Carga) .....	70
Figura 44. Monta Carga a Control Remoto.....	71
Figura 45. Control Remoto del Monta Carga .....	72
Figura 46. Open Another File.....	73
Figura 47. Escoger Carpeta Programas de armado .....	73
Figura 48. Escoger Archivo Brazo Mecánico.....	74
Figura 49. Hacer Click para Obtener el Paso a Paso .....	74
Figura 50. Click Flecha para tener el Paso a Paso .....	75
Figura 51. Construcción Brazo Robótico con el software LEGO DIGITAL DESIGNER. ....	75
Figura 52. Sensor RGB hecho en LEGO DIGITAL DESIGNER .....	76
Figura 53. Modelo Terminado Brazo Robótico hecho en LEGO DIGITAL DESIGNER .....	77
Figura 54. Diagrama de flujo general del programa desarrollado en LabVEIW_2009 .....	78
Figura 55. Menú principal control de la planta.....	79
Figura 56. Funcionamiento manual de la planta embotelladora .....	80
Figura 57. Funcionamiento automático de la planta embotelladora .....	80
Figura 58 Menú Inventario Tiempos.....	81
Figura 59 Menú de ayuda para el usuario .....	81
Figura 60 Abrir programa en Labview .....	82
Figura 61 Encender módulo Brick.....	82
Figura 62 Correr el programa de LabVIEW .....	83
Figura 63 SPECIFY NXT .....	83
Figura 64 Programa Utilizado para la toma de datos del sensor de tacto para llevar el inventario a) CASE FALSE b) CASE TRUE .....	84
Figura 65 Configuración del SPECIFIC NXTpara el control de la planta. ....	84
Figura 66 Programación del sensor de la banda de tapas y los botones de automático o manual.....	85
Figura 67 Control de los motores de la banda transportadora (Motor banda botellas) .....	86
Figura 68 Programación del sensor de la banda transportadora de tapas .....	87
Figura 69 Programación del pistón de tapado.....	88
Figura 71 Configuración del sensor RGB .....	89
Figura 72 Las dos rutas posibles del brazo robótico.....	90
Figura 73 Reporte de datos en Excel .....	91
Figura 74. Tabla Excel .....	91
Figura 75. Programación del montacargas .....	92
Figura 76. Herramientas utilizadas para la conexión Bluetooth.....	92

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Número Recomendado de Observaciones.....	36
Tabla 2 Datos Premuestra.....	37
Tabla 3 Datos de la muestra.....	38
Tabla 4. Etapas Fundamentales.....	41
Tabla 5. Subgrupos Ensamble.....	42
Tabla 6. . Tabla de valores estándar para diagramas de control.....	43
Tabla 7. Subgrupos Tapado.....	45
Tabla 8. Subgrupos Selección.....	47
Tabla 9. Subgrupos Almacenaje.....	49
Tabla 10. Subgrupos Totales.....	51

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	12
2	INFORMACIÓN GENERAL DEL PROYECTO .....	13
3	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	14
4	ESTADO DEL ARTE.....	16
4.1	LEGO MINDSTORMS - based mobile robots team .....	16
4.2	APRIL - A PID Robot Implemented with LEGO.....	16
4.3	Matlab meets Mindstorms.....	17
4.4	Estudio de las posibilidades didácticas en ingeniería de control del LEGO Mindstorms NXT.....	17
4.5	Lego en la Universidad Nacional de Colombia .....	17
4.6	Ensambladora de Autos creada con Legos.....	18
5	OBJETIVOS.....	19
5.1	OBJETIVO GENERAL.....	19
5.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	19
6	MARCO TEÓRICO .....	20
6.1	Definición del Problema .....	20
6.2	Sistema de Simulación .....	20
6.3	CLASES DE DISTRIBUCIÓN DE PLANTA. ....	23
6.3.1	Distribución por producto:.....	23
6.3.2	Distribución por proceso:.....	23
6.3.3	Distribución de tecnología de grupos o celular .....	24
6.3.4	Distribución por posición fija:.....	24
6.3.5	Distribución justo a tiempo:.....	25
6.4	ANÁLISIS DE MÉTODOS Y ESTUDIO DE TIEMPOS. ....	25
6.5	HISTORIA DEL LEGO MINDSTORMS.....	26
6.5.1	COMPONENTES DE LEGO MINDSTORMS.....	28
6.6	SENSORES.....	29
6.6.1	SENSOR DE LUZ.....	29
6.6.2	SENSOR DE CONTACTO.....	30
6.6.3	SENSOR ULTRASÓNICO.....	31

6.6.4	SENSOR DE COLOR RGB. ....	31
6.7	BATERÍA RECARGABLE.....	32
7	METODOLOGÍA.....	34
7.1	Tamaño de muestra.....	36
7.2	ANÁLISIS DE METODOS Y ESTUDIO DE TIEMPOS .....	41
7.2.1	FASE 1.....	42
7.2.2	FASE 2 TAPADO.....	45
7.2.3	FASE 3 SELECCIÓN.....	47
7.2.4	FASE 4 ALMACENAJE.....	49
7.3	ANÁLISIS GENERAL DE TIEMPOS DEL PROCESO COMPLETO DE LA EMBOTELLADORA.....	51
7.4	DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA.....	54
7.4.1	BANDA TRANSPORTADORA (BOTELLAS).....	56
7.4.2	BANDA TRANSPORTADORA (TAPAS). ....	59
7.4.3	PISTÓN DE TAPADO. ....	62
7.4.4	BRAZO ROBÓTICO SELECCIONADOR DE COLOR.....	65
7.4.5	MONTA CARGA.....	68
7.4.6	MONTA CARGA A CONTROL REMOTO.....	71
8	GUÍAS DE ARMADO DE LA PLANTA EMBOTELLADORA.....	73
9	LABVIEW.....	78
9.1	RECOLECCIÓN DE DATOS Y CONTROL DEL SIMULADOR .....	79
9.1.1	Control general del programa .....	79
9.1.2	Conecciones para el funcionamiento. ....	82
9.1.3	Recoleccion de datos de los sensores.....	83
9.2	Programación de la planta embotelladora.....	85
9.3	Programación del pistón de tapado.....	87
9.4	Programación del brazo robótico.....	88
9.5	Almacenamiento de los datos.....	90
9.6	Programación de los montacargas.....	91
10	CONCLUSIONES .....	94
11	BIBLIOGRAFIA.....	95

## RESUMEN GENERAL DEL TRABAJO DE GRADO

**TITULO:** DESARROLLO DE APLICACIONES DE SIMULACIÓN DE PROCESOS INDUSTRIALES UTILIZANDO LOS SISTEMAS ROBÓTICOS LEGO MINDSTORM.

**AUTOR(ES):** ÁLVARO EDUARDO GOZÁLEZ TARAZONA.  
ROGERIO PORRAS BENÍTEZ.

**FACULTAD:** Facultad de Ingeniería Electrónica.  
Facultad de Ingeniería Industrial.

**DIRECTOR(ES):** CLAUDIA LEONOR RUEDA GUZMÁN.  
ORLANDO FEDERICO GONZÁLEZ CASALLAS.

### RESUMEN

El presente proyecto identifica la necesidad de los estudiantes e ingenieros de recrear una planta de procesos industriales y plantear una solución a la poca interacción que tienen los estudiantes con las plantas de procesos reales donde se puede observar las diferentes distribuciones de planta y los principales problemas presentados en la industria colombiana. Se realiza el montaje y simulación de una planta embotelladora a escala utilizando los sistemas LEGO MINSDTORM y su respectiva distribución de planta, se diseña una plataforma de software en Labview para realizar el control y adquirir los datos para estudiarlos a través de procesos estadísticos y tener control de la producción. Se desarrollaron guías de construcción y programación de la planta; para lograr esto se implementó una estructura que permite modificaciones a la estructura según se necesite a través de la plataforma LEGO MINSDTORM ya que es una herramienta práctica para el estudiante. De acuerdo al montaje obtenido y los estudios realizados en este proyecto se llegó a la conclusión que la automatización de procesos industriales ayuda a tener una visión profunda y real de las teorías de la automatización además se concluyó que las herramientas de simulación interactivas ayudan a los estudiantes a trabajar en equipo, a adquirir destreza en la supervisión de procesos industriales, al diseño de planta, distribución de bodega y manejo de variables para facilitar su estudio estadístico, económico y permitirle a los estudiantes tener una experiencia directa con una planta de producción que son fundamentales en las organizaciones industriales.

**PALABRAS CLAVES:** LEGO MINSTORM, Simulación, Planta, Estadísticos, Producción, Industriales, Organizaciones.

## GENERAL ABSTRACT OF WORK DEGREE

**TITLE:** APPLICATION DEVELOPMENT PROCESS SIMULATION USING LEGO MINDSTORMS ROBOTIC SYSTEMS.

**AUTHOR(S):** ÁLVARO EDUARDO GOZÁLEZ TARAZONA.  
ROGERIO PORRAS BENÍTEZ.

**FACULTY:** Faculty of Electrical Engineering.  
Faculty of Industrial Engineering.

**DIRECTOR(S):** CLAUDIA LEONOR RUEDA GUZMÁN.  
ORLANDO FEDERICO GONZÁLEZ CASALLAS.

### ABSTRACT

The present project identifies the need of the students and engineers of recreating a plant of industrial processes and a solution raises to small interaction that the students have with the plants of royal processes where it is possible to observe the different distributions of plant and the principal problems presented in the Colombian industry. There realizes the assembly and simulation of a plant bottling works to scale using the systems LEGO MINSDTORM and his respective distribution of plant, a platform of software is designed in Labview to realize the control and to acquire the information to study them across statistical processes and to have control of the production. There developed guides of construction and programming of the plant; to achieve this there was implemented a structure that allows modifications the structure as need across the platform LEGO MINSDTORM since it is a practical tool for the student. In agreement to the obtained design and the studies realized in this project it came near to the conclusion that the automation of industrial processes helps to have a deep and royal vision of the theories of the automation in addition one concluded that the interactive tools of simulation help the students to be employed at equipment, to acquire skill in the supervision of industrial processes, to the design of plant, distribution of warehouse and managing variable to facilitate his statistical, economic study and to allow the students to have a direct experience with a plant of production that they are fundamental in the industrial organizations.

**KEY WORDS:** LEGO MINSTORM, Simulation, Plant, Statisticians, Production, Manufacturers, Organizations.

# 1 INTRODUCCIÓN

Los procesos industriales como parte fundamental de la ingeniería además de ser de alto costo, son generadores de alto riesgo para los operadores. Con la evolución de la simulación de procesos se ha logrado disminuir las pérdidas empresariales por mal manejo de equipo o poco conocimiento del proceso, y se ha logrado brindar mejores procesos de producción. A pesar de todas las investigaciones, avances y estudios, existe un número importante de procesos industriales que no pueden ser abordados sin suponer un alto riesgo, ya sea por el poco conocimiento del proceso o por la complejidad de las máquinas a utilizar, sumando a esto los costos elevados de la infraestructura que requiere el proceso.

Lo que se busca al implementar procesos de simulación es mejorar las condiciones al manipular los equipos, y de esta forma capacitar al operario para que sea competente sin importar las condiciones de trabajo. Asegurando así altos estándares de calidad.

Con la evolución de la tecnología es necesario crear instrumentos que propicien un acercamiento cada vez más real frente a las situaciones que se pueden presentar, Es por esto que los simuladores se han convertido en la herramienta esencial para la representación de cualquier tipo de problema que pueda surgir, brindando así ventajas incalculables para los procesos industriales.

El simulador desarrollado está orientado a tres tipos de procesos presentes en una fábrica de embotellamiento con distribución de planta por producto estos son: recepción de materia prima, ensamble y almacenamiento, evidenciando así la destreza de los ingenieros para poder manejar óptimamente este tipo de proceso.

Por medio de este proyecto se busca crear una aplicación de simulación que incluye análisis de métodos y cálculo de tiempos de producción, abierta a la modificación de la estructura y arquitectura de los procesos implementados a través de la plataforma LEGO MINDSTORM de acuerdo a la necesidad de cumplir los objetivos académicos de cada una de las áreas de aplicación. Adicionalmente crear una herramienta versátil, previa al desarrollo de futuras aplicaciones industriales, como prácticas de laboratorios, cálculos estadísticos y generación de reportes útiles para la academia. Para obtener el resultado final se verá involucrado trabajo ingenieril tanto electrónico como industrial de tal forma que ambos programas académicos aporten conocimientos y se vean favorecidos con la aplicación.

A continuación se presentarán las etapas de diseño y desarrollo a seguir para la construcción de la planta de producción a través de la plataforma LEGO MINDSTORM, primero se mostrará la metodología y el estado del arte, luego un resumen sobre las distribuciones de planta y la plataforma de LEGO MINDSTORM, después se presenta la descripción de la planta creada y simulada en LEGO MINDSTORM y sus respectivos manuales para el montaje y puesta en marcha. Finalizando con las conclusiones del proyecto y las recomendaciones para investigaciones futuras.

## 2 INFORMACIÓN GENERAL DEL PROYECTO

### **Título**

Desarrollo de aplicaciones de simulación de procesos industriales utilizando los sistemas robóticos LEGO MINDSTORM.

### **Directores del Proyecto**

Msc. Claudia Leonor Rueda Guzmán.  
Msc. Orlando Federico González Casallas

### **Autores del Proyecto**

Álvaro Eduardo González Tarazona  
Rogerio Porras Benítez

### **Grupo de investigación**

Grupo de Investigación en Control Industrial  
Grupo de Investigación de Procesos (ProLog)

### **Instituciones Participantes**

Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga

### **Duración del Proyecto**

7 meses

### **Valor Total del Proyecto**

\$5'000.000,00

### **Palabras claves**

Lego Mindstorm, Servo motores, sensores, plantas, sistemas de producción, Procesos industriales.

### 3 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En la actualidad la tecnología permite a las empresas tener un flujo de información en tiempo real proporcionando dinamismo en las actividades, sumado a esto los clientes, exigen confiabilidad de las operaciones pues estos suponen que los productos deben estar disponibles de manera permanente. Requieren de personal capacitado y calificado para la manipulación del proceso de producción y demandan de una inversión en procesos de simulación para el entrenamiento de sus empleados. Para poder cumplir con lo anterior se requiere de la planeación detallada de las operaciones de la empresa, pues en estas se encuentran las variables que se pueden controlar para que se cumpla con el objetivo de satisfacer al cliente.<sup>1</sup>

Para poder desarrollar lo anteriormente nombrado las empresas tendrían que empezar a realizar inversión en procesos de investigación, así como también se requeriría de grandes inversiones económicas que convierten en un riesgo enorme el hecho de crear una industria especialmente en un país en desarrollo como Colombia

Para los ingenieros, la simulación de procesos industriales actualmente se realiza de varias maneras, unas con estructuras más complejas que otras. La mayor dificultad de estas simulaciones es recrear lo mejor posible una planta real, en donde estén integrados todos los factores que se pueden observar durante el proceso verdadero, paros por alguna falla en el producto final, alarmas por falta de materia prima, mejoras en la productividad de la fábrica en tantos por ciento etc.

Las simulaciones por computadora a veces complementan o incluso sustituyen a los sistemas de modelización para los que no es posible hallar soluciones analíticas de forma cerrada, tratan de generar una muestra de escenarios representativos para un modelo en el que una relación completa de todos los estados posibles de este, sería muy costoso o imposible<sup>2</sup>”, pero la falta de contacto con el proceso y el poco realismo de este tipo de simulación, generan que se sesgue la información recibida por parte del simulador.

Otra forma de realizar estas prácticas es recreando plantas a una menor escala para entrenar a los ingenieros antes de enfrentarlos con el proceso real, pero estos simuladores son muy costos y su arquitectura no permite realizar mucho cambios en el proceso, ni añadir otras variables que puedan ser útiles en el proceso de entrenamiento y aprendizaje. Existe un aspecto más complicado el

---

<sup>1</sup>Ballou, Ronald H. Administración de la Cadena de Suministros. 5ª. ed. Otros factores que afectan el tiempo de procesamiento del pedido. México: Pearson Education, 2004. pp. 145 – 146.

<sup>2</sup>En línea < [http://es.wikipedia.org/wiki/Simulaci%C3%B3n\\_por\\_computadora](http://es.wikipedia.org/wiki/Simulaci%C3%B3n_por_computadora) /> [Consulta 13 de junio de 2012]

cual consiste en hacer las simulaciones utilizando una planta verdadera y empezar a aprender sobre el proceso real, pero esto es un riesgo ya que una mala decisión podría hacer que se pierda mucho dinero, sea por una parada de la planta, por el daño en algún componente de la máquina o peor, aun poner en riesgo la vida de los operarios.

En este proyecto se realizó una planta embotelladora, para recrear tres diferentes procesos reales pero con la posibilidad de realizar modificaciones a la estructura según se necesite. Se crearon áreas de trabajo para que el proceso sea más eficiente y más seguro utilizando así una distribución de planta por producto, esto da varias ventajas frente a otro tipo de distribuciones de planta y da una mejor aplicación al simulador que se realizó.

Para mantener la similitud entre los sistemas reales y los simulados, se desarrollaron prácticas de construcción y programación de la plataforma LEGO MINDSTORMS teniendo en cuenta herramientas tecnológicas más amigables con el estudiante, se buscó que el estudiante pudiera observar los pasos de construcción y programación de las plantas gracias a la utilización de las Tecnologías de la información y la comunicación (TIC's). "Las aulas IG (INTEGRATE GRID), como elemento de las guías desarrolladas, son espacios que están dirigidos por el Docente y aplicados al estudiante, conformando así los contenidos educativos, la evaluación y los medios de comunicación e información que permiten la interacción con el aula. La implementación de estas aulas virtuales impulsan una oferta educativa flexible, pertinente y de mayor cobertura, basada en el AUTO TIEMPO y AUTO ESPACIO en el que el estudiante desarrolla competencias académicas para el trabajo"<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup>SUARES SIERRA, Oscar. Diseño e implementación de aulas virtuales en entorno IG para control industrial en la universidad de pamplona .Bucaramanga, 2011, 8 h. Trabajo de Grado (Ingeniero Electrónico). Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de Ingeniería Electrónica

## 4 ESTADO DEL ARTE

### 4.1 LEGO MINDSTORMS - based mobile robots team

Haciendo una investigación sobre los trabajos de investigación relacionado con el tema se ha encontrado este trabajo el cual se trata de una tesis doctoral en el área de Informática realizada por Daniele Benedettelli en la Università di Siena, Ha sido desarrollada usando la versión RCX de Mindstorms ésta es la primera versión conocida. Aunque este proyecto no tiene en común nada con el proyecto que se pretende realizar, el autor es uno de los principales desarrolladores de Lego Mindstorms en el mundo (es el creador del NXC) y sus aportes han sido fundamentales dentro de muchos proyectos educativos hechos con Lego. El informe original está disponible (en italiano) gratuitamente en su web personal, <http://daniele.benedettelli.com>

### 4.2 APRIL - A PID Robot Implemented with LEGO

Es un proyecto de Kevin McLeod llevado a cabo en la University of British Columbia, sobre la implementación de un sistema de control con un regulador (Proporcional-Integral-Derivativo) PID en un Mindstorms NXT. Es básicamente un vehículo equipado con sensores ultrasónicos en la parte anterior, que le permiten leer la distancia a un obstáculo y mantenerse a una distancia fija del mismo. Está realizado en lenguaje NXC. El objetivo es interactuar cambiando las constantes  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  del controlador y evaluar la capacidad del sistema para mantener la distancia al obstáculo. Tengamos en cuenta que la ley de control para un controlador PID es de la forma:

Figura 1 Ecuación Control PID<sup>4</sup>

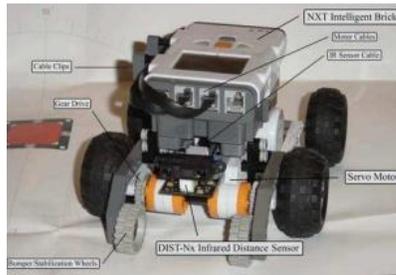
$$U(t) = U_p(t) + U_i(t) + U_d(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

Donde  $e(t)$  es la señal de error, la diferencia entre la salida del sistema y la referencia deseada. El vehículo es el mostrado en la Figura 4.

---

<sup>4</sup> [En línea] <<http://mecatroavila.blogspot.com/2010/10/controlador-pid.html>> (Consultado 30-8-12)

Figura 2 El vehículo April<sup>5</sup>



### 4.3 Matlab meets Mindstorms

Es el proyecto del Instituto de Imagen y Visión por Ordenador, RWTH Aachen, en Alemania, sobre el uso de Matlab en el control directo del NXT. Permite enlazar aplicaciones realizadas en Matlab con el sistema operativo del Brick. Es quizá uno de los proyectos más importantes sobre la materia, incluyendo cursos con asistencia de más de 300 alumnos y el uso de 100 robots.

### 4.4 Estudio de las posibilidades didácticas en ingeniería de control del LEGO Mindstorms NXT

Es un estudio llevado a cabo en la Universidad Politécnica de Cartagena, España, por parte de Guillermo Nieves. El objetivo del estudio era recabar toda la información posible, estudiar y evaluar las capacidades de Lego Mindstorms para su uso docente en ingeniería de control<sup>6</sup>

El trabajo muestra el marcado interés que existe al interior de las comunidades de aficionados a la robótica alrededor del mundo por utilizar el Lego Mindstorms en sus creaciones.

### 4.5 Lego en la Universidad Nacional de Colombia

Es el proyecto base para esta propuesta. Se trata de dos prácticas en las que se hace una introducción al control digital y PID, y más adelante un par de ejercicios más profundos de caracterización de sistemas e implementación de diversas estrategias de control de mayor complejidad.

<sup>5</sup> [En Línea] <<http://www.physics.ubc.ca/kevinmcl~/projects/lego/APRIL/>>[Consulta 3-11-11]

<sup>6</sup> NIEVES MOLINA, G. Estudio de las posibilidades didácticas en ingeniería de control del LEGO MindstormsNXT. Cartagena, 2008. Trabajo de grado (Ingeniero Industrial). Universidad Politécnica de Cartagena, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

#### **4.6 Ensambladora de Autos creada con Legos**

Es un proyecto llevado a cabo en el Instituto de Baja Bavaria, en Alemania, en donde sus estudiantes construyen una planta capaz de ensamblar vehículos a partir de una gran cantidad de piezas sueltas.

## **5 OBJETIVOS**

### **5.1 OBJETIVO GENERAL**

Diseñar, simular y construir un prototipo de planta embotelladora de tres procesos: distribución de materia prima, ensamble y almacenamiento utilizando la plataforma comercial LEGO MINDSTORM.

### **5.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Estudiar modelos pedagógicos para desarrollar guías de aplicación didácticas entendibles y de fácil manejo para los estudiantes utilizando las TIC's (Tecnologías de la Información y las Comunicaciones).
- Proponer y seleccionar la distribución de planta adecuada para la construcción del prototipo.
- Implementar los sensores incluidos dentro de la plataforma LEGO MINDSTORM para realizar la adquisición de señales del prototipo de planta embotelladora construida.
- Diseñar una plataforma de software en Labview para adquirir los datos suministrados por los sensores y realizar el control de la planta de procesos.
- Desarrollar unas guías de construcción, realización y programación de la planta embotelladora.

## 6 MARCO TEÓRICO

### 6.1 Definición del Problema

La facultad de Ingeniería Electrónica y de Ingeniería Industrial de la Universidad Pontificia Bolivariana posee aplicaciones en los laboratorios de Sistemas de control y de automatización de procesos industriales conocidos como Laboratorios virtuales en dichos laboratorios los estudiantes tratan de entender los fenómenos que son relevantes en un sistema o planta de producción, lo cual es una desventaja debido a que no se puede poner en práctica la teoría que se enseña en la universidad.

Existen problemas en los laboratorios debido a que las arquitecturas de los sistemas implementados son cerradas y no es posible realizarles ninguna modificación es decir no son configurables, este problema no es propio de los laboratorios, el problema radica en que no existe el diseño de una guía de aplicaciones de plantas de simulación de procesos en donde los estudiantes tengan contacto directo con la planta. Los laboratorios son implementos que van a mejorar y ayudar a los estudiantes a terminar de entender los procesos y las explicaciones de las teorías vistas durante la carrera con la gran ventaja de que el cerebro humano es más retentivo e intuitivo cuando es capaz de palpar y de observar directamente los fenómenos.<sup>7</sup>

### 6.2 Sistema de Simulación

Uno de los principales problemas en la academia en la enseñanza de la automatización de procesos industriales es la falta de ejercicios prácticos que ayuden a los estudiantes a generar conocimientos cercanos a la realidad, como se muestra en la Figura 3 una planta real muestra todos los posibles problemas que se puedan generar durante las jornadas de trabajo, no solo de la planta sino hasta del mismo medio ambiente.

---

<sup>7</sup>S. Moor, P. R. Piergiovanni, M. Metzger Process Control Kits: A Hardware and Software Resource., 35th ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference, October 19-22, 2005, Indianapolis, IN .

Figura 3 Planta petrolera México<sup>8</sup>



Resulta altamente costoso y peligroso llevar a los estudiantes de una universidad, que cursan pregrado, a una planta como la del ejemplo anterior donde los riesgos de una mala decisión por culpa de la falta de práctica y conocimiento sería mortal para el personal de la planta; de ahí se puede concluir que se debe tener una solución menos riesgosa y más económica.

Por medio de implementación del software se logró que estas plantas fueran más asequibles a los estudiantes y que estos pudieran realizar sus prácticas de manera ágil y eficiente.

Se puede clasificar el software para la simulación en dos grandes grupos: los lenguajes y los simuladores. Un lenguaje de simulación es un software de naturaleza general y posee algunas características especiales para ciertas aplicaciones, tal como ocurre con SLAM 11 y SIMAN con sus módulos de manufactura. El modelo es desarrollado usando las instrucciones adecuadas del lenguaje y permitiendo al analista un gran control para cualquier clase de sistema<sup>9</sup> y los simuladores que es un paquete de más robustez en donde se puede realizar una simulación teniendo como objetivo principal la realización para un ambiente específico y no variable.

Para poder realizar una simulación se deben seguir ciertos pasos para lograr el éxito propuesto, lo primero es definir el sistema, esto consiste en estudiar el problema, identificar los objetivos y especificar lo que se quiere medir; después de definir los resultados esperados con nuestro estudio, se define y se construye un

---

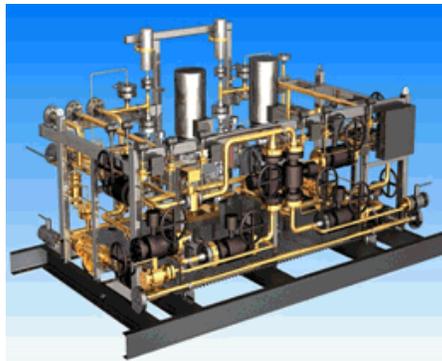
<sup>8</sup> En línea <<http://www.eltiradero.net/incendio-de-plataforma-petrolera-transocean-golfo-de-mexico-2456/>> [Consulta 3-11-11]

<sup>9</sup> Sistema de bibliotecas. SOFTWARE DE SIMULACIÓN [En Línea] <[http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/indata/v02\\_n1/software.htm/](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/indata/v02_n1/software.htm/)> [Consulta 3-11-11]

modelo en el que se obtendrán todos los resultados deseados, aquí es muy necesario tener en cuenta todas y cada una de las variables que forman parte del sistema, además de sus relaciones lógicas y diagramas.

Después de esto se sigue con la implementación del modelo en un lenguaje de programación como C++, java, liso, etc., o si se utiliza algún paquete como Automod, Autocad, Simula, etc., para procesar y obtener resultados. El proceso de verificación consiste en compilar y depurar el modelo del sistema que se ha simulado con el propósito de validar los requerimientos de diseño para los que fue creado.

Figura 4 Planta hecha con Solidedge<sup>10</sup>



Ahora se procede a validar las diferencias entre el sistema real y el sistema simulado, para esto se hacen cinco pasos básicos y fundamentales: primero recoger opiniones de expertos sobre los resultados; segundo, verificar la exactitud con que la simulación puede predecir datos históricos; el tercero la exactitud en la predicción del futuro; el cuarto es la comprobación de falla del modelo y por último la confianza en el modelo realizado y como se utilizaran los datos arrojados.

A continuación se procede con la experimentación que consiste en generar datos deseados sin tener en cuenta el análisis de ningún tipo, simplemente es recoger resultados. Para que esto no sea innecesario se necesita una etapa de análisis en donde se interpretan los resultados de la simulación y tomar la decisión correcta.

Por último, documentar todos estos resultados en dos partes: una de tipo técnico y otro conocido como manual de usuario, lo que permite mayor facilidad para que el estudiante interactúe con estos modelos.

No obstante, el desarrollo del software está limitado frente a las condiciones reales de las empresas; entre las limitantes está el contacto con el entorno y la dinámica

---

<sup>10</sup>[En Línea] <[http://www.itscz.net/software/solidedge/se\\_fr.html](http://www.itscz.net/software/solidedge/se_fr.html) > [Consulta 3-11-11]

del sistema. Esta última es de vital importancia pues existe diferencia entre la eficiencia teórica y real de las máquinas o un proceso de producción.

### **6.3 CLASES DE DISTRIBUCIÓN DE PLANTA<sup>11</sup>.**

#### **6.3.1 Distribución por producto:**

Llamada también distribución de Taller de Flujo. Es aquella donde se disponen el equipo o los procesos de trabajo de acuerdo con los pasos progresivos necesarios para la fabricación de un producto. Si el equipo se dedica a la producción continua de una pequeña línea de productos, por lo general se le llama Línea de Producción o Línea de Montaje.

Ejemplo: Manufactura de pequeños aparatos eléctricos: tostadoras, planchas, batidoras; Aparatos mayores: lavadoras, refrigeradoras, cocinas; Equipo electrónico: computadoras, equipos de discos compactos; y Automóviles.

Taller de flujo hace referencia a un sistema de producción dispuesto para que fluyan con mayor facilidad los productos dominantes. Aquí la gama de productos es mayor que el de las líneas de producción y el equipo no es tan especializado. La producción tiende a ser por lotes de cada artículo, en vez de una secuencia mezclada continua. Se adecua para grandes volúmenes. Una línea de montaje puede variar desde un 100 % hecho por los trabajadores a toda la línea de producción totalmente automatizada.

#### **6.3.2 Distribución por proceso:**

Llamada también Distribución de Taller de Trabajo o Distribución por Función. Se agrupan el equipo o las funciones similares, como sería un área para tomos, máquina de estampado.

De acuerdo con la secuencia de operaciones establecida, una parte pasa de un área a otra, donde se ubican las máquinas adecuadas para cada operación. Ejemplo: hospitales, pediatría, maternidad, cuidados intensivos.

La técnica de mayor uso para obtener una distribución por proceso, es acomodar las estaciones que realizan procesos similares de manera que se optimice su ubicación relativa. En muchas instalaciones, la ubicación óptima implica colocar de manera adyacente las estaciones entre las cuales hay gran cantidad de tráfico.

El criterio de optimización es minimizar los costos de movimientos interdependientes, o sea minimizar el costo de manejo de materiales entre

---

<sup>11</sup>Sippper, Daniel; Bulfin, Robert L. Planeación y Control de la Producción. México: McGraw-Hill, c1998. pp. 145 – 205.

estaciones.

Como el flujo numérico de artículos entre estaciones no revela los factores cualitativos que pueden ser decisivos para la distribución, se emplea una técnica conocida como PSI (Planificación Sistemática de Distribución de Planta) o SLP (SystematicLayoutPlanning). Esto implica desarrollar un diagrama de relaciones, que permite estudiar el grado de importancia de tener cada estación adyacente con respecto a las demás.

### **6.3.3 Distribución de tecnología de grupos o celular<sup>12</sup>**

Agrupar máquinas diferentes en centros de trabajo (o celdas), para trabajar sobre productos que tienen formas y necesidades de procesamiento similares. La T.G (Tecnología de Grupos), se parece a la distribución por proceso, ya que se diseñan las celdas para realizar un conjunto de procesos específicos. También es semejante a la distribución por producto, pues las celdas se dedican a una gama limitada de productos.

Ejemplo: manufactura de circuitos impresos para computador, confecciones.

El objetivo general de la Distribución de Tecnología de grupos o Celular es obtener los beneficios de una distribución por producto en la producción de tipo de taller de trabajo. Estos beneficios incluyen:

Mejores relaciones humanas. Las celdas consisten en unos cuantos hombres, que forman un pequeño equipo de trabajo: un equipo produce unidades completas.

Mejora en la experiencia de los operadores. Sólo se ve un número limitado de piezas diferentes, en un ciclo de producción finito. Repetición.

Menos manejo de materiales e inventario en proceso. Viajan menos piezas por el taller.

Preparación más rápida. Hay menos tareas, se reducen los cambios de herramientas.

### **6.3.4 Distribución por posición fija:**

El producto, por cuestiones de tamaño o peso, permanece en un lugar, mientras que se mueve el equipo de manufactura a donde está el producto.

Ejemplo: construcción de un puente, un edificio, un barco de alto tonelaje.

---

<sup>12</sup>Industrial Data© UNMSM. Facultad de Ingeniería Industrial. [en línea].  
<[http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/indata/v01\\_n2/tipos.htm](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/indata/v01_n2/tipos.htm)>[citado el 13-07-2012].

### **6.3.5 Distribución justo a tiempo<sup>13</sup>:**

Puede ser de dos tipos: Línea de flujo semejante a una línea de montaje y Distribución por proceso o taller de trabajo. En la distribución en línea se disponen en secuencia el equipo y las estaciones de trabajo. En la distribución por proceso, el objetivo es simplificar el manejo de materiales y crear rutas normales que enlacen el sistema con movimiento frecuente de materiales. Cuando la demanda es continua y la línea de producción se encuentra balanceada, es posible colocar las estaciones de trabajo una junto a otra. En teoría cuando se toma cierta cantidad de productos del extremo final de la línea, el sistema opera arrastrando la línea para remplazar las unidades que se quitaron. En la práctica significa que el movimiento y la producción de piezas se efectúan a un ritmo programado, pero sólo cuando cada trabajador ha terminado y liberado la pieza.

En el caso de agrupación por función, el arrastre se obtiene por medio de un procedimiento de manejo de materiales.

## **6.4 ANÁLISIS DE MÉTODOS Y ESTUDIO DE TIEMPOS.**

Los estudios de tiempos y los análisis de los métodos, son todavía dos de las herramientas de investigación más importantes aplicadas en la industria y necesarias para los ingenieros industriales.

Se podría definir el análisis de métodos como “El registro y examen crítico – sistemático de los modos de realizar actividades, con el fin de efectuar mejoras”<sup>14</sup>. Los principales propósitos al realizar dicho estudio son:

- a) Mejorar los procesos, procedimientos y la disposición de la fábrica, taller y lugar de trabajo, así como el diseño del equipo e instalaciones.
- b) Economizar el esfuerzo humano.
- c) Crear mejores condiciones de trabajo.
- d) Reducir costos en el uso de materiales, maquinaria y mano de obra.

El estudio de tiempos de igual manera la podríamos definir como: “Técnica para determinar con mayor exactitud posible, partiendo de un número de observaciones, el tiempo para llevar a cabo una tarea determinada con arreglo a una norma de rendimiento preestablecido”<sup>15</sup>.

---

<sup>13</sup> [en línea] <Unidad VI JIT. Atlantic International University> [consulta 5-9-12]<<http://cursos.aiu.edu/Control%20de%20la%20Produccion/PDF/Tema%206.pdf>> [citado el 13-07-2012].

<sup>14</sup> Meyers, Fred. Estudio de métodos y tiempos para la manufactura. Segunda edición.

<sup>15</sup> Barnes, Raph M. “Estudio de movimientos y tiempos” Quinta edición.

## 6.5 HISTORIA DEL LEGO MINDSTORMS.<sup>16</sup>

El LEGO MINDSTORMS inicio en el año 1986 a través de un proceso de integración e investigación entre el MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY (MIT) Y LEGO, gracias al convenio se desarrolló el dispositivo llamado “Ladrillo Programable” o “Brick”.

El resultado de la investigación fue un pequeño computador alojado dentro de una estructura plástica de LEGO, el Brick tenía la premisa de ofrecer la posibilidad de introducir y controlar computadores, esto le otorga al usuario no solo crear y controlar objetos reales, si no también le permite crear conexiones entre diversos conceptos científicos y el mundo que lo rodea.

Figura 5 Versión experimental Brick MIT<sup>17</sup>



El Ladrillo Programable al principio fue creado para niños y fue probado por el MIT en ambientes activos, en los cuales los niños construían mecanismos que les permitía manipular los objetos de su entorno y su comportamiento también construían maquinas con forma de animales y les otorgaban un cierto comportamiento para que interactuaran con el entorno, esto obligaba a los niños a plantear soluciones a los retos que se planteaban. Los experimentos fueron exitosos e impulsó la creación de la versión comercializable por parte de lego.

<sup>16</sup> [En línea] <<http://www.bdigital.unal.edu.co/3833/1/280230.2010.pdf>> [consulta 21-8-12]

<sup>17</sup> [En línea] <<http://el.media.mit.edu/logo-foundation/pubs/logoupdate/v7n1/v7n1-pbrick.html>> [consulta 21-8-12]

La primera generación comercializable de Mindstorms fue el RCX, apareció en el mercado en 1998 y se vendieron más de 80.000 unidades en tres meses y esto permitió la popularidad a nivel internacional en el campo de la robótica.

Las características principales del RCX son:

- CPU Hitachi H8/3292 a 16 MHz.
- 16 KB de memoria ROM.
- 32 KB de RAM.
- 3 entradas para sensores.
- 3 salidas para actuadores.
- 1 puerto infrarrojo para comunicación.

Figura 6 Versión Comercial RCX.<sup>18</sup>



La desventaja del RCX la representaba sus motores eléctricos, los motores no ofrecían un gran torque y no tenían encoder y su principal ventaja era su tamaño reducido.

En Junio de 2006 luego de una crisis financiera LEGO saco al mercado el NXT. El paquete de desarrollo que viene con el NXT está enfocado hacia el campo de la robótica, por lo que permite construir sistemas mucho más interesantes que las versiones anteriores y su estética es más atractiva y sus piezas son similares al perfil con que se construyen maquinas sencillas en la actualidad.

---

<sup>18</sup> [En línea] <<http://el.media.mit.edu/logo-foundation/pubs/logoupdate/v7n1/v7n1-pbrick.html>> [consulta 21-8-12]

Figura 7 Versión NXT.<sup>19</sup>



La enorme popularidad de LEGO MINDSTORMS, hace que el producto llame la atención de cualquier usuario, esta es una razón muy importante a la hora de escoger a LEGO como el material base de este trabajo.

### **6.5.1 COMPONENTES DE LEGO MINDSTORMS.**

#### **6.5.1.1 MOTORES.**

Son dispositivos electromecánicos de corriente continua e imán permanente, el torque y la velocidad de rotación de cada motor está determinada por la existencia y el tipo de engranajes reductores que contengan, las variaciones están por el lado de la potencia disponible y de la transmisión.

Algunos motores cuentan con protección interna contra sobre cargas y también contra sobretensiones, esto implica que no siempre se puede sostener velocidades máximas por tiempo indefinido.

El motor tiene sensores de rotación incorporados que miden la posición angular y es capaz de reportar la información al Brick, esto permite un control completo del motor además los sistemas operativos permiten manejar más de un motor a la vez.

---

<sup>19</sup> [En línea] <<http://www.generationrobots.com/lego-mindstorms-nxt-intelligent-brick,us,4,9841.cfm>> [Consulta 21-8-12]

Figura 8 Motor sistema NXT.<sup>20</sup>



## 6.6 SENSORES.

El LEGO MINDSTORMS cuenta con sensores de diferentes tipos que le permiten medir variables de naturaleza diversa.

### 6.6.1 SENSOR DE LUZ.<sup>21</sup>

Este sensor le permite al robot distinguir entre la luz y oscuridad, midiendo la intensidad de la luz le permite al robot ver en blanco y negro.

El sensor se puede usar en dos modos:

El primer modo detecta la luz del ambiente y se puede usar para detectar si un cuarto tiene la luz prendida o apagada, o la intensidad de la luz que entra por la ventana dependiendo de la hora, del día o incluso para programar un robot que siga una fuente de luz.

El segundo modo el mismo sensor emite una luz y luego mide que tanto rebota o refleja esta luz en las superficies. Este modo lo podemos usar para diferenciar el brillo de los colores en una superficie (el robot seguirá la línea negra basada en este principio). Incluso se ha usado para detectar la distancia hasta el suelo con una mejor precisión que con el sensor ultrasónico.

---

<sup>20</sup> [En línea]

<[http://complubot.educa.madrid.org/pruebas/lego\\_nxt\\_version\\_educativa/lego\\_nxt\\_version\\_educativa\\_index.php](http://complubot.educa.madrid.org/pruebas/lego_nxt_version_educativa/lego_nxt_version_educativa_index.php)> [Consulta 21-8-12]

<sup>21</sup> [En línea] <<http://rbtnt.blogspot.com/2009/06/el-sensor-de-luz.html>> [consulta 21-8-12]

Figura 9 Sensor de Luz.<sup>22</sup>



### 6.6.2 SENSOR DE CONTACTO.<sup>23</sup>

El sensor de contacto permite que el ladrillo inteligente LEGO MINDSTORMS NXT sea capaz de detectar presión, tanto cuando el sensor es presionado como cuando se libera. El sensor también es capaz de contar presiones únicas o múltiples.

Figura 10 Sensor de Contacto<sup>24</sup>



---

<sup>22</sup> [En línea] <<http://rbtntxt.blogspot.com/2009/06/el-sensor-de-luz.html>> [Consulta 21-8-12]

<sup>23</sup> [En línea] <<http://www.electricbricks.com/lego-educativo-mindstorms-sensor-9843-sensor-contacto-nxt-lego-education-p-567.html>> [Consulta 21-8-12]

<sup>24</sup> [En línea] <<http://www.electricbricks.com/lego-educativo-mindstorms-sensor-9843-sensor-contacto-nxt-lego-education-p-567.html>> [Consulta 21-8-12]

### 6.6.3 SENSOR ULTRASÓNICO.<sup>25</sup>

El sensor ultrasónico le permite al robot ver y detectar obstáculos así como medir distancias.

Este sensor funciona igual que como lo hace un radar o un sonar. Envía ondas de sonido en una frecuencia muy alta y mide el tiempo que el rebote de las ondas de sonido tarda en regresar al sensor.

Figura 11 Sensor Ultrasónico.<sup>26</sup>



### 6.6.4 SENSOR DE COLOR RGB.<sup>27</sup>

El sensor de Color NXT funciona de la siguiente manera:

Se conecta a un puerto de sensores del NXT mediante un cable NXT normal y hace uso del protocolo digital de comunicaciones I2C. El Número de Color calculado por el sensor se refresca aproximadamente 100 veces por segundo.

Este sensor incorpora tres LEDs (RGB: red, green, blue) de distinto color que iluminan la superficie cuyo color desea detectarse. Se mide la intensidad que esta superficie refleja para cada uno de los colores y, Mediante el valor de la intensidad relativa reflejada de cada uno de los colores, el sensor de color calcula un Número de Color, que es el valor que se devuelve al programa NXT.

---

<sup>25</sup> [En línea] <<http://rbtntxt.blogspot.com/2009/02/el-sensor-ultrasonico-o-de-ultra-sonido.html>> [Consulta 21-8-12]

<sup>26</sup> [En línea] <<http://shop.lego.com/en-US/Ultrasonic-Sensor-9846>> [Consulta 21-8-12]

<sup>27</sup> [En línea] <[www.inf.uct.cl/.../1275007417avance%20investigacion%20sensores](http://www.inf.uct.cl/.../1275007417avance%20investigacion%20sensores)> [Consulta 21-8-12]

Figura 12 Sensor de color RGB.<sup>28</sup>



## 6.7 BATERÍA RECARGABLE.<sup>29</sup>

La batería recargable de Lego (9693).

Ventajas:

Ofrece una capacidad de 2100 mAh. Cuando está recién cargada reporta un total de 8.5v. Además se puede recargar sin necesidad de desmontarla del brick.

Desventajas:

La batería incrementa el tamaño del NXT en un centímetro, provocando que algunos modelos no puedan ser armados como se indica en los manuales y finalmente el precio es elevado respecto a las otras opciones. Además tenemos que adquirir también el transformador (8887) que se encargará de recargar la batería. Lo que incrementa el precio.

---

<sup>28</sup> [En línea] <[http://www.legoeducation.us/eng/product/nxt\\_color\\_sensor/2223](http://www.legoeducation.us/eng/product/nxt_color_sensor/2223)> [Consulta 21-8-12]

<sup>29</sup> [En línea] <<http://nxtmexico.wordpress.com/2010/12/21/baterias-para-el-nxt/>> [Consulta 21-8-12]

Figura 13 Batería Recargable LEGO.<sup>30</sup>



---

<sup>30</sup> [En línea] <[http://www.robotui.com/product.php?id\\_product=51](http://www.robotui.com/product.php?id_product=51)> [Consulta 21-8-12]

## 7 METODOLOGÍA

La distribución de planta implica la organización de los espacios para el movimiento de material, almacenamiento, equipos o líneas de producción, equipos industriales, administración, servicios para el personal etc.

La distribución que se propuso en este trabajo fue la DISTRIBUCIÓN POR PRODUCTO ya que el producto que se simuló es de producción continuá, también se le conoce como línea de producción o línea de montaje. Se propuso esta distribución para lograr los objetivos que se buscan a través de la distribución de planta los cuales son: la integración de todos los factores que afecten la distribución, movimiento de material según distancias mínimas, circulación del trabajo a través de la planta, utilización efectiva de todo el espacio, mínimo esfuerzo y seguridad en los trabajadores y flexibilidad en la ordenación para facilitar reajustes o ampliaciones.

También se tuvo en cuenta los principios básicos que son: la satisfacción y la seguridad (igualdad de condiciones, será siempre más efectiva la distribución que haga el trabajo más satisfactorio y seguro para los trabajadores), la integración de conjunto (la mejor distribución es la que integra a los hombres, materiales, maquinaria y cualquier otro factor de modo que resulte el mejor compromiso entre todas las partes), mínima distancia recorrida (es siempre mejor la distribución que permite que la distancia a recorrer por el material sea la menor posible), circulación o flujo de materiales (es mejor aquella distribución que ordene las áreas de trabajo de modo que cada operación o proceso esté en el mismo orden o secuencia en que se trasformen), espacio cubico (la economía se obtiene utilizando de un modo efectivo todo el espacio disponible, tanto en vertical como en horizontal) y flexibilidad (siempre es más efectiva la distribución que puede ser ajustada o reordenada con menos costo o inconvenientes)<sup>31</sup>.

El proceso que se diseñó es el montaje de dos bandas trasportadoras (ver Figura 14) las cuales son las encargadas de llevar la materia prima de las dos primeras partes del producto (envase y tapas) y posicionarlas a través de sensores (ver Figura 15) de forma precisa para el ensamble, luego la banda trasportadora principal continua hasta detenerse debajo de un pistón (ver Figura 24) el cual es el encargado de ejercer presión sobre la tapa y lograr unir las dos piezas (envase y tapa) por presión, después el producto sigue su camino por la banda hasta llegar al final de esta y es tomada por un brazo mecánico (ver figura 24) el cual está encargado de colocar el producto encima de un sensor para seleccionar el tipo de

---

<sup>31</sup>[En línea]<[http://www.uclm.es/area/ing\\_rural/AsignaturaProyectos/Tema5.pdf](http://www.uclm.es/area/ing_rural/AsignaturaProyectos/Tema5.pdf)> [08-06-12]

producto y ubicarlo en su respectiva caja, seguidamente es recogida la caja por un montacargas (ver Figura 24) y este la lleva a los estantes de almacenamiento.

Figura 14 Banda Transportadora

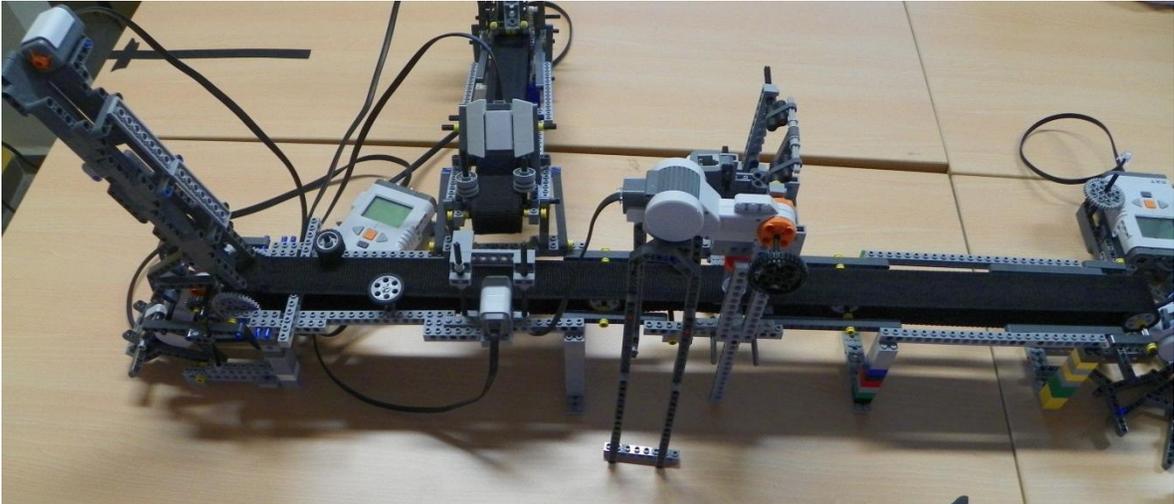
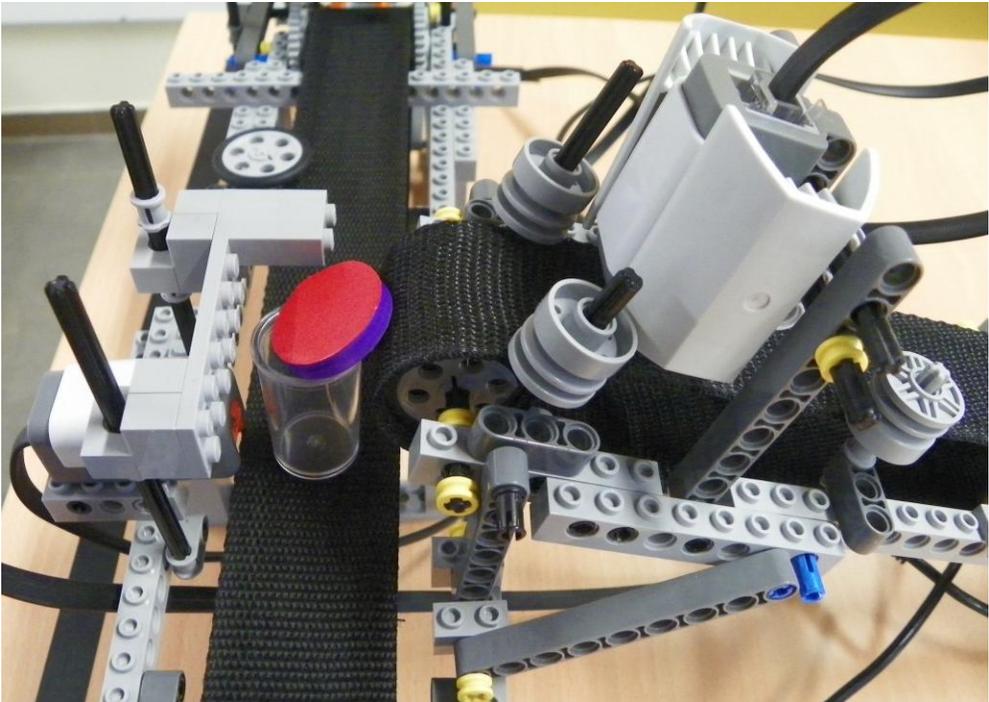


Figura 15 Ensamble Envase - Tapa



Para el análisis de los datos a estudiar primero se escoge la técnica de muestreo para hallar el tamaño de muestra apropiado para tener una confiabilidad adecuada.

### 7.1 Tamaño de muestra.

Para determinar el número de ciclos se debe tener una medición que cumpla un estándar. Se eligió usar una tabla diseñada por Albert E. Shaw en el estudio de tiempos en la compañía General Electric (véase Tabla 1). Esta tabla permite usar la experiencia del estudio, de esta manera tener un tamaño de muestra que en campo facilite la recolección de información.

**Tabla 1 Número Recomendado de Observaciones.**<sup>32</sup>

Tiempo de ciclo en minutos	Número recomendado de ciclos
0,10	200
0,25	100
0,50	60
0,75	40
1,00	30
2,00	20
2,00 – 5,00	15
5,00 – 10,00	10
10,00 -20,00	8
20,00 – 40,00	5
40,00 ó más	3

#### **Premuestra:**

Para poder utilizar la tabla diseñada por Albert E. Shaw en el estudio de tiempos para la compañía General Electric (véase Tabla 1) es necesario tener un tiempo promedio el cual lo tomamos de una premuestra para después hallar el número total de muestras a estudiar.

---

<sup>32</sup>Benjamin, Nivel. Freivalds, Andris. Ingeniería Industrial: Métodos, estándares y Diseño del Trabajo. Decima Edición. Alfa Omega [pag. 340]

**Tabla 2 Datos Premuestra.**

Numero	Tiempo (sg)
1	35,13
2	35,28
3	35,17
4	34,58
5	35,30
6	35,22

Fórmula 1. Media

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n Xi}{n}$$

$$\bar{X} = \frac{35,13 + 35,28 + 35,17 + 34,58 + 35,30 + 35,22}{6}$$

$x = 35,11$  segundos (Ver Fórmula 1)

Ya que la Tabla 1 no evidencia la cantidad de muestras para un tiempo de 35,11 segundos se emplea la interpolación para hallar la cantidad de muestras a tomar y así hallar el resultado de  $n = 83,82$  muestras (Ver Fórmula 2), este resultado se aproxima a 84 muestras.

Fórmula 2. Interpolación

$$y = y_0 + \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} (x - x_0)$$

$$y = 100 + \frac{60 - 100}{0,50 - 0,25} (0,3511 - 0,25)$$

$$y = 83,82 \approx 84 \text{ muestras}$$

Y = La variable y significa la cantidad de muestras a tomar, como no es un número exacto se aproxima al siguiente número.

### Rango.

Fórmula 3. Rango

$$\text{Rango} = \text{máximo} - \text{mínimo}$$

### Muestra.

**Tabla 3 Datos de la muestra.**

#	Proceso				T. total
	Ensamble	Tapado	Selección	Almacenaje	
1	10,70	7,39	9,30	9,05	36,44
2	10,59	7,24	9,35	9,10	36,28
3	10,55	7,28	9,41	9,28	36,52
4	10,61	7,25	9,42	9,16	36,44
5	10,54	7,30	9,52	9,07	36,43
6	10,50	7,33	9,55	9,02	36,40
7	10,47	7,28	9,41	9,16	36,33
8	10,73	7,28	9,36	9,20	36,57
9	10,55	7,27	9,31	9,26	36,39
10	10,63	7,27	9,38	9,07	36,35
11	10,57	7,27	9,30	9,09	36,23
12	10,57	7,26	9,35	9,12	36,30
13	10,57	7,26	9,45	9,14	36,42
14	10,71	7,25	9,52	9,16	36,64
15	10,54	7,25	9,56	9,15	36,50
16	10,56	7,27	9,49	9,18	36,50

**Tabla 3 Datos de la Muestra. (Continuación)**

17	10,56	7,29	9,57	9,28	36,70
18	10,55	7,25	9,34	9,26	36,40
19	10,65	7,28	9,45	9,08	36,46
20	10,49	7,27	9,32	9,17	36,25
21	10,58	7,30	9,55	9,27	36,70
22	10,63	7,33	9,38	9,08	36,42
23	10,58	7,34	9,48	9,23	36,63
24	10,53	7,31	9,31	9,26	36,41
25	10,67	7,29	9,33	9,25	36,54
26	10,71	7,30	9,39	9,21	36,61
27	10,70	7,28	9,41	9,07	36,46
28	10,69	7,31	9,48	9,19	36,67
29	10,70	7,33	9,39	9,20	36,62
30	10,71	7,26	9,56	9,05	36,58
31	10,54	7,29	9,57	9,12	36,52
32	10,61	7,28	9,31	9,16	36,36
33	10,56	7,27	9,30	9,24	36,37
34	10,53	7,31	9,39	9,27	36,50
35	10,49	7,33	9,47	9,28	36,57
36	10,48	7,29	9,41	9,05	36,23
37	10,55	7,31	9,47	9,12	36,45
38	10,59	7,34	9,51	9,21	36,65
39	10,66	7,33	9,54	9,16	36,69
40	10,65	7,29	9,57	9,19	36,70
41	10,61	7,28	9,30	9,20	36,39
42	10,67	7,31	9,32	9,05	36,35
43	10,68	7,32	9,33	9,07	36,40
44	10,70	7,34	9,39	9,14	36,57
45	10,72	7,29	9,36	9,21	36,58
46	10,69	7,28	9,45	9,27	36,69
47	10,69	7,31	9,49	9,23	36,72
48	10,67	7,29	9,53	9,25	36,74
49	10,59	7,31	9,52	9,27	36,69
50	10,60	7,33	9,56	9,28	36,77
51	10,61	7,31	9,51	9,05	36,48
52	10,60	7,29	9,50	9,08	36,47
53	10,59	7,26	9,41	9,11	36,37

**Tabla 3 Datos de la Muestra. (Continuación)**

54	10,63	7,29	9,40	9,14	36,46
55	10,66	7,31	9,34	9,12	36,43
56	10,61	7,33	9,39	9,16	36,49
57	10,63	7,29	9,30	9,21	36,43
58	10,65	7,28	9,32	9,25	36,50
59	10,66	7,29	9,45	9,27	36,67
60	10,69	7,31	9,53	9,05	36,58
61	10,65	7,29	9,48	9,09	36,51
62	10,71	7,26	9,53	9,05	36,55
63	10,66	7,28	9,55	9,07	36,56
64	10,67	7,28	9,57	9,17	36,69
65	10,60	7,32	9,31	9,28	36,51
66	10,59	7,31	9,37	9,05	36,32
67	10,62	7,29	9,46	9,26	36,63
68	10,64	7,26	9,55	9,25	36,70
69	10,65	7,28	9,32	9,28	36,53
70	10,61	7,27	9,39	9,05	36,32
71	10,59	7,32	9,57	9,08	36,56
72	10,65	7,29	9,45	9,09	36,48
73	10,63	7,35	9,47	9,11	36,56
74	10,60	7,31	9,40	9,13	36,44
75	10,66	7,25	9,50	9,15	36,56
76	10,61	7,28	9,51	9,17	36,57
77	10,66	7,30	9,56	9,21	36,73
78	10,70	7,33	9,48	9,26	36,77
79	10,69	7,31	9,43	9,07	36,50
80	10,61	7,25	9,41	9,11	36,38
81	10,63	7,24	9,47	9,12	36,46
82	10,65	7,38	9,30	9,15	36,48
83	10,59	7,35	9,36	9,19	36,49
84	10,61	7,24	9,40	9,27	36,52

## 7.2 ANALISIS DE METODOS Y ESTUDIO DE TIEMPOS

En el análisis del diagrama de flujo de proceso se identificaron 4 etapas definidas y secuenciadas las cuales conforman de manera global el proceso de armado y simulación de una planta embotelladora tal como se presentan a continuación.

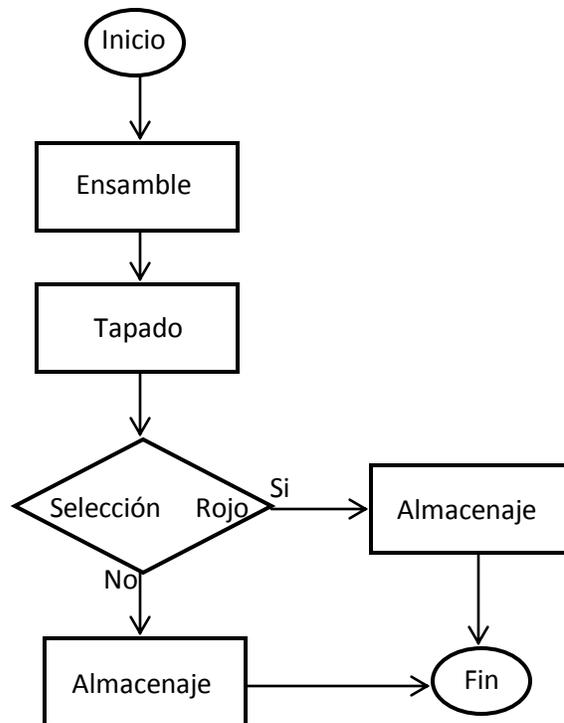
Tabla 4. Etapas Fundamentales

Etapas fundamentales en diagrama de flujo de proceso			
Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4
ENSAMBLE	TAPADO	SELECCIÓN	ALMACENAJE

Se utilizó el cronómetro para la toma de los tiempos en las diferentes etapas básicamente por su fácil uso, porque se pretende establecer tiempos estándar y por el montaje en la plataforma robótica LEGO MINDSTORM.

Resultados obtenidos.

Figura 16. Diagrama de Flujo



Para analizar los datos por medio de tabla de control dividimos el tamaño de la muestra en subgrupos cada uno con 4 observaciones.

### 7.2.1 FASE 1.

La tabla 5 representa los tiempos de muestra del proceso de ensamble organizados en cuatro subgrupos respectivamente.

Tabla 5. Subgrupos Ensamble

Subgrupo	Tiempo sg				Media	Rango
	Muestra	muestra	muestra	muestra		
1	10,70	10,63	10,68	10,67	10,67	0,07
2	10,59	10,58	10,70	10,60	10,62	0,12
3	10,55	10,53	10,72	10,59	10,60	0,19
4	10,61	10,67	10,69	10,62	10,65	0,08
5	10,54	10,71	10,69	10,64	10,65	0,17
6	10,50	10,70	10,67	10,65	10,63	0,2
7	10,47	10,69	10,59	10,61	10,59	0,22
8	10,73	10,70	10,60	10,59	10,66	0,14
9	10,55	10,71	10,61	10,65	10,63	0,16
10	10,63	10,54	10,60	10,63	10,60	0,09
11	10,57	10,61	10,59	10,60	10,59	0,04
12	10,57	10,56	10,63	10,66	10,61	0,1
13	10,57	10,53	10,66	10,61	10,59	0,13
14	10,71	10,49	10,61	10,66	10,62	0,22
15	10,54	10,48	10,63	10,70	10,59	0,22
16	10,56	10,55	10,65	10,69	10,61	0,14
17	10,56	10,59	10,66	10,61	10,61	0,1
18	10,55	10,66	10,69	10,63	10,63	0,14
19	10,65	10,65	10,65	10,65	10,65	0
20	10,49	10,61	10,71	10,59	10,60	0,22
21	10,58	10,67	10,66	10,61	10,63	0,09
PROMEDIO TOTAL					10,62	0,14

Al realizar el análisis estadístico de los datos particularmente de tendencia lineal con base en la tabla de coeficientes para diagramas de control se tiene los siguientes datos:

Tabla 6. Tabla de valores estándar para diagramas de control.

Tamaño de la muestra N	Gráfica $\bar{x}$	Gráfica de R		
	$A_2$	$D_3$	$D_4$	$d_2$
2	1.880	---	3.267	1.128
3	1.023	---	2.575	1.693
4	0.729	---	2.282	2.059
5	0.577	---	2.115	2.326
6	0.483	---	2.004	2.534
7	0.419	0.076	1.924	2.704
8	0.373	0.136	1.864	2.847
9	0.337	0.184	1.816	2.970
10	0.308	0.223	1.777	3.078

Coefficientes determinados.

- $A_2= 0,729$     $D_3= 0$     $D_4= 2,282$     $d_2 = 2.326$  (ver Tabla 6)

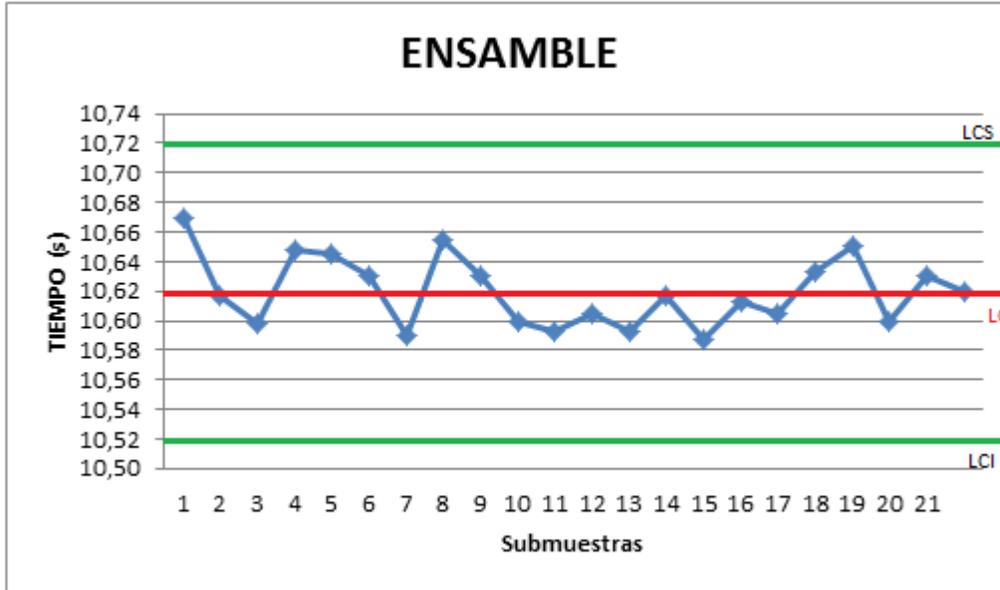
Línea central:  $LC = \bar{x} = 10.62s$ .

Promedio aritmético de los rangos:  $R = 0.14$

Límite de control superior:  $LCS = \bar{x} + A_2 * R = 10.62 + 0.729 * 0.14 = 10.72$

Límite de control inferior:  $LCI = \bar{x} - A_2 * R = 10.62 - 0.729 * 0.14 = 10.52$

Figura 17. Comportamiento de Tiempos Proceso de Ensamble



El proceso de Ensamble se encuentra en control ya que todos los datos de las sub-muestras están dentro de los límites superiores e inferiores permitidos, los dispositivos digitales se encuentran bien calibrados y funcionan correctamente.

En las mediciones finales del proceso, los datos se encuentran más agrupados con lo cual se infiere que a medida que se repite el proceso, se puede obtener un tiempo de proceso más ajustado al tiempo real.

El proceso funciona de manera muy eficiente ya que entre el pico (10.67s.) y el tiempo estándar (10.62s.) existe una diferencia de solo 0.05s.

El rango de tiempo en el proceso es de 0.26 s. lo que revela el grado exacto del proceso gracias a la utilización de sensores y equipos digitales.

## 7.2.2 FASE 2 TAPADO

Tabla 7. Subgrupos Tapado

Subgrupo	Tiempo sg				Media	Rango
	Muestra	muestra	muestra	muestra		
1	7,39	7,33	7,32	7,28	7,33	0,11
2	7,24	7,34	7,34	7,32	7,31	0,1
3	7,28	7,31	7,29	7,31	7,30	0,03
4	7,25	7,29	7,28	7,29	7,28	0,04
5	7,30	7,30	7,31	7,26	7,29	0,05
6	7,33	7,28	7,29	7,28	7,30	0,05
7	7,28	7,31	7,31	7,27	7,29	0,04
8	7,28	7,33	7,33	7,32	7,32	0,05
9	7,27	7,26	7,31	7,29	7,28	0,05
10	7,27	7,29	7,29	7,35	7,30	0,08
11	7,27	7,28	7,26	7,31	7,28	0,05
12	7,26	7,27	7,29	7,25	7,27	0,04
13	7,26	7,31	7,31	7,28	7,29	0,05
14	7,25	7,33	7,33	7,30	7,30	0,08
15	7,25	7,29	7,29	7,33	7,29	0,08
16	7,27	7,31	7,28	7,31	7,29	0,04
17	7,29	7,34	7,29	7,25	7,29	0,09
18	7,25	7,33	7,31	7,24	7,28	0,09
19	7,28	7,29	7,29	7,38	7,31	0,1
20	7,27	7,28	7,26	7,35	7,29	0,09
21	7,30	7,31	7,28	7,24	7,28	0,07
PROMEDIO TOTAL					7,29	0,07

Datos:

Coeficientes determinados.

- $A_2 = 0,729$      $D_3 = 0$      $D_4 = 2,282$      $d_2 = 2.326$  (ver Tabla 6)

Línea central:  $LC = \bar{x} = 7.29s$ .

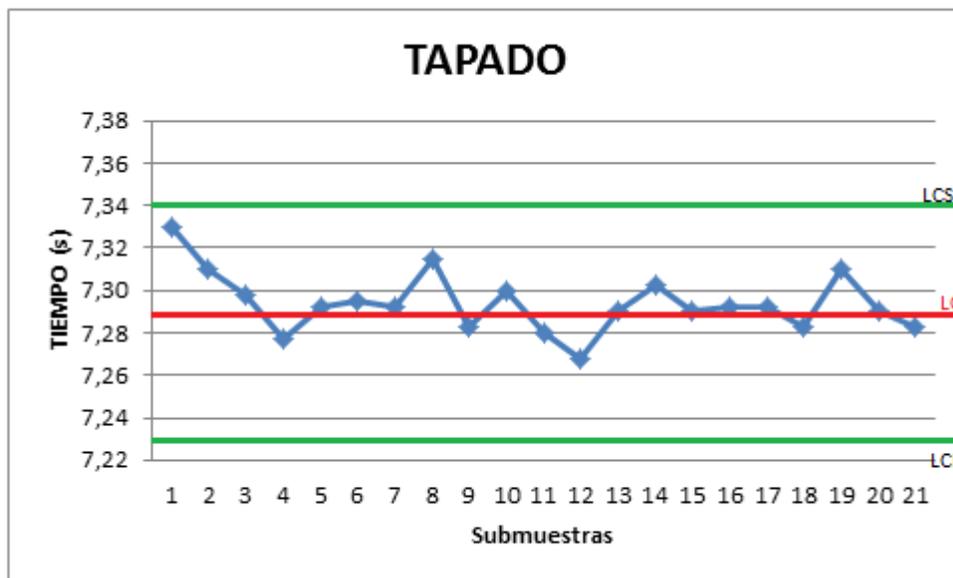
Promedio aritmético de los rangos:  $R = 0.07$

Límite de control superior:  $LCS = \bar{x} + A_2 * R = 7.29 + 0.729 * 0.07 = 7.34s$

Límite de control inferior:  $LCI = \bar{x} - A_2 * R = 7.29 - 0.729 * 0.07 = 7.23s$

Al realizar un análisis estadístico de los datos de la tabla 6 para la etapa de Tapado se puede señalar mediante la Figura 18.

Figura 18. Comportamiento Tiempos Proceso Tapado



El proceso de Tapado se encuentra en control, los dispositivos electrónicos funcionan correctamente, todos los datos de las sub-muestras se encuentran dentro del rango establecido.

El tiempo estándar es muy cercano a los picos superior e inferior luego el proceso de tapado se realiza de manera muy eficiente.

### 7.2.3 FASE 3 SELECCIÓN

Tabla 8. Subgrupos Selección

Subgrupo	Tiempo sg				Media	Rango
	Muestra	muestra	muestra	muestra		
1	9,30	9,38	9,33	9,57	9,40	0,27
2	9,35	9,48	9,39	9,31	9,38	0,17
3	9,41	9,31	9,36	9,37	9,36	0,1
4	9,42	9,33	9,45	9,46	9,42	0,13
5	9,52	9,39	9,49	9,55	9,49	0,16
6	9,55	9,41	9,53	9,32	9,45	0,23
7	9,41	9,48	9,52	9,39	9,45	0,13
8	9,36	9,39	9,56	9,57	9,47	0,21
9	9,31	9,56	9,51	9,45	9,46	0,25
10	9,38	9,57	9,50	9,47	9,48	0,19
11	9,30	9,31	9,41	9,40	9,36	0,11
12	9,35	9,30	9,40	9,50	9,39	0,2
13	9,45	9,39	9,34	9,51	9,42	0,17
14	9,52	9,47	9,39	9,56	9,49	0,17
15	9,56	9,41	9,30	9,48	9,44	0,26
16	9,49	9,47	9,32	9,43	9,43	0,17
17	9,57	9,51	9,45	9,41	9,49	0,16
18	9,34	9,54	9,53	9,47	9,47	0,2
19	9,45	9,57	9,48	9,30	9,45	0,27
20	9,32	9,30	9,53	9,36	9,38	0,23
21	9,55	9,32	9,55	9,40	9,46	0,23
PROMEDIO TOTAL					9,43	0,19

Datos:

Coeficientes determinados.

- $A_2 = 0,729$     $D_3 = 0$     $D_4 = 2,282$     $d_2 = 2,326$  (ver Tabla 6)

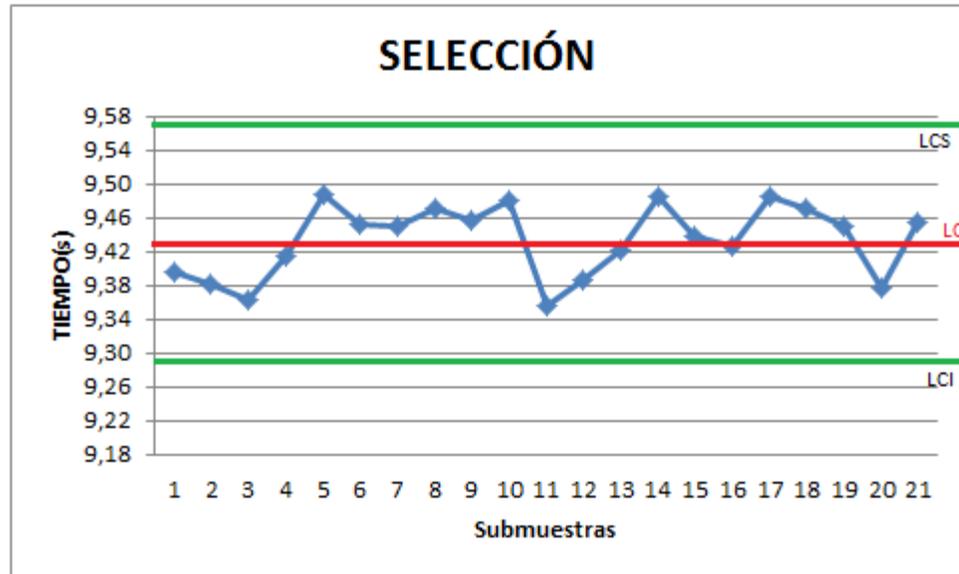
Línea central:  $LC = \bar{x} = 9.43s.$

Promedio aritmético de los rangos:  $R = 0.19$

Límite de control superior:  $LCS = \bar{x} + A_2 * R = 9.43 + 0.729 * 0.19 = 9.57s.$

Límite de control inferior:  $LCI = \bar{x} - A_2 * R = 9.43 - 0.729 * 0.19 = 9.29s.$

Figura 19. Comportamiento Tiempos Proceso Selección.



El proceso de selección se encuentra en control, los datos de las sub-muestras se encuentran entre los límites superior e inferior permitidos para un eficiente funcionamiento de los sistemas digitales.

## 7.2.4 FASE 4 ALMACENAJE.

Tabla 9. Subgrupos Almacenaje

Subgrupo	Tiempo sg				Media	Rango
	Muestra	muestra	muestra	muestra		
1	9,05	9,08	9,07	9,17	9,09	0,12
2	9,10	9,23	9,14	9,28	9,19	0,18
3	9,28	9,26	9,21	9,05	9,20	0,23
4	9,16	9,25	9,27	9,26	9,24	0,11
5	9,07	9,21	9,23	9,25	9,19	0,18
6	9,02	9,07	9,25	9,28	9,16	0,26
7	9,16	9,19	9,27	9,05	9,17	0,22
8	9,20	9,20	9,28	9,08	9,19	0,2
9	9,26	9,05	9,05	9,09	9,11	0,21
10	9,07	9,12	9,08	9,11	9,10	0,05
11	9,09	9,16	9,11	9,13	9,12	0,07
12	9,12	9,24	9,14	9,15	9,16	0,12
13	9,14	9,27	9,12	9,17	9,18	0,15
14	9,16	9,28	9,16	9,21	9,20	0,12
15	9,15	9,05	9,21	9,26	9,17	0,21
16	9,18	9,12	9,25	9,07	9,16	0,18
17	9,28	9,21	9,27	9,11	9,22	0,17
18	9,26	9,16	9,05	9,12	9,15	0,21
19	9,08	9,19	9,09	9,15	9,13	0,11
20	9,17	9,20	9,05	9,19	9,15	0,15
21	9,27	9,05	9,07	9,27	9,17	0,22
PROMEDIO TOTAL					9,16	0,17

Datos:

Coeficientes determinados.

- $A_2 = 0,729$      $D_3 = 0$      $D_4 = 2,282$      $d_2 = 2,326$  (ver Tabla 6)

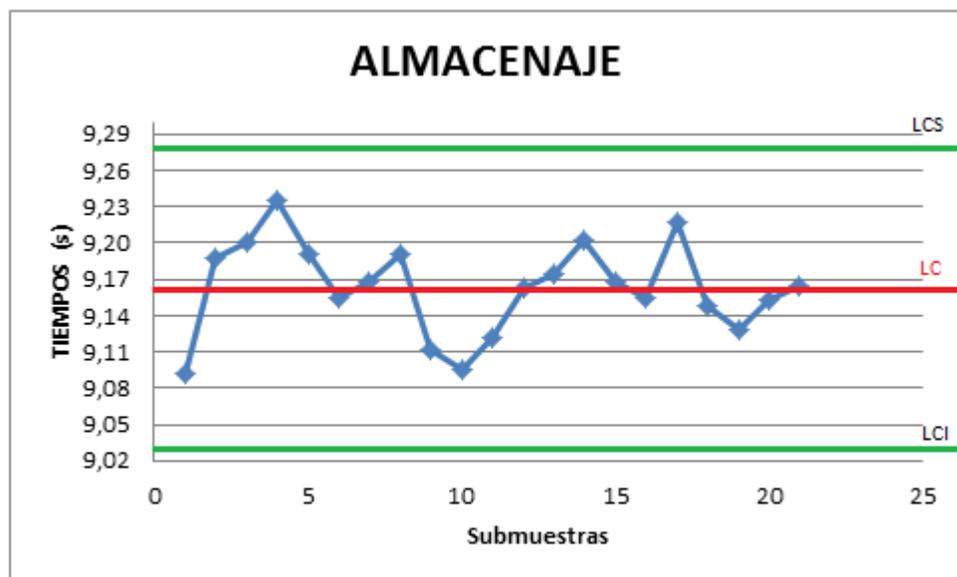
Línea central:  $LC = \bar{x} = 9.16s$ .

Promedio aritmético de los rangos:  $R = 0.17$

Límite de control superior:  $LCS = \bar{x} + A_2 * R = 9.16 + 0.729 * 0.17 = 9.28s$ .

Límite de control inferior:  $LCI = \bar{x} - A_2 * R = 9.16 - 0.729 * 0.17 = 9.04s$ .

Figura 20. Comportamiento Tiempos Almacenaje.



El proceso de almacenaje se encuentra en control, todas las sub-muestras están dentro del rango permitido luego los dispositivos digitales funcionan correctamente.

### 7.3 ANÁLISIS GENERAL DE TIEMPOS DEL PROCESO COMPLETO DE LA EMBOTELLADORA.

Tabla 10. Subgrupos Totales

Subgrupo	Tiempo sg				Media	Rango
	Muestra	muestra	muestra	muestra		
1	36,44	36,42	36,40	36,69	36,49	0,29
2	36,28	36,63	36,57	36,51	36,50	0,35
3	36,52	36,41	36,58	36,32	36,46	0,26
4	36,44	36,54	36,69	36,63	36,58	0,25
5	36,43	36,61	36,72	36,70	36,62	0,29
6	36,40	36,46	36,74	36,53	36,53	0,34
7	36,33	36,67	36,69	36,32	36,50	0,37
8	36,57	36,62	36,77	36,56	36,63	0,21
9	36,39	36,58	36,48	36,48	36,48	0,19
10	36,35	36,52	36,47	36,56	36,48	0,21
11	36,23	36,36	36,37	36,44	36,35	0,21
12	36,30	36,37	36,46	36,56	36,42	0,26
13	36,42	36,50	36,43	36,57	36,48	0,15
14	36,64	36,57	36,49	36,73	36,61	0,24
15	36,50	36,23	36,43	36,77	36,48	0,54
16	36,50	36,45	36,50	36,50	36,49	0,05
17	36,70	36,65	36,67	36,38	36,60	0,32
18	36,40	36,69	36,58	36,46	36,53	0,29
19	36,46	36,70	36,51	36,48	36,54	0,24
20	36,25	36,39	36,55	36,49	36,42	0,3
21	36,70	36,35	36,56	36,52	36,53	0,35
PROMEDIO TOTAL					36,51	0,27

Datos:

Coeficientes determinados.

- $A_2= 0,729$      $D_3= 0$     $D_4= 2,282$      $d_2 = 2.326$  (ver Tabla 6)

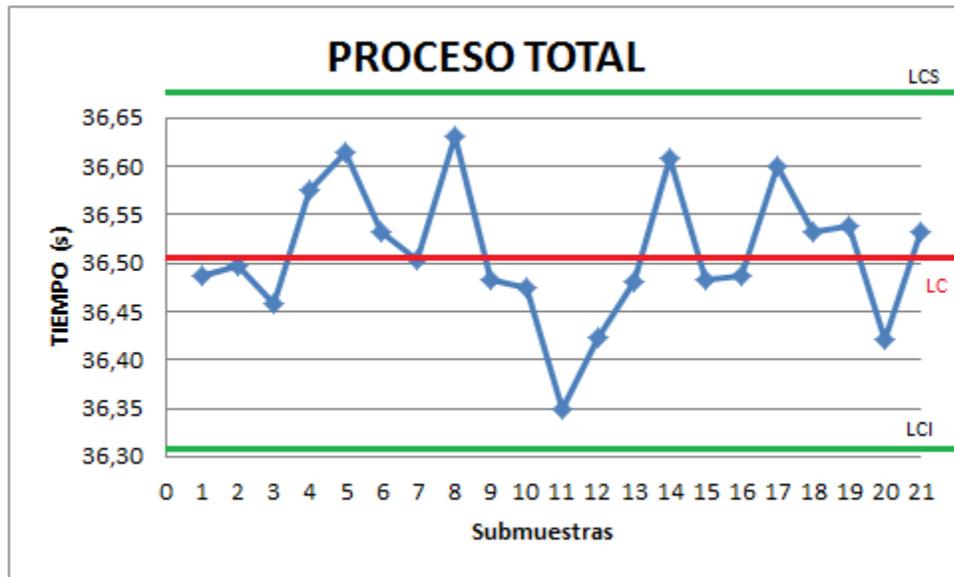
Línea central: LC =  $\bar{x}= 36.51s$ .

Promedio aritmético de los rangos:  $R = 0.27$

Límite de control superior:  $LCS = \bar{x} + A_2 * R = 36.51 + 0.729 * 0.27 = 36.70s.$

Límite de control inferior:  $LCI = \bar{x} - A_2 * R = 36.51 - 0.729 * 0.27 = 36.31s.$

Figura 21. Comportamiento Tiempos Totales



El proceso total de la embotelladora está en control, los tiempos totales de las sub-muestras están dentro del rango operativo permitido. La selección de los dispositivos y su calibración permiten que el sistema funcione dentro de los tiempos adecuados.

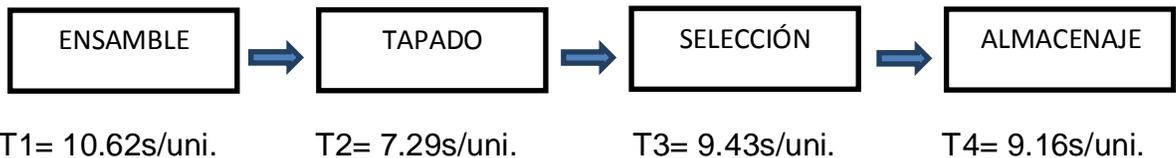
Sin embargo el proceso tiene fluctuaciones en los tiempos las cuales aunque son mínimas repercuten en los tiempos totales de las jornadas de trabajo y por ende en la productividad de la misma.

## BALANCEAMIENTO DE LINEA.

A partir del análisis de tiempo de manera particular para cada proceso, se procede a realizar un balanceamiento de línea que permite identificar cuellos de botella y detalles en el proceso de embotellamiento.

Este proceso se puede llevar a cabo gracias a que los procesos son consecutivos es decir que están concatenados y a que se tiene tiempos estandarizados de las duraciones de cada proceso. (Ver Figura 22)

Figura 22. Procesos



El almacenaje se hace botella por botella, cada botella cuenta con su respectiva caja.

El tiempo total de elaboración de un producto es:  $T. \text{ total} = 36.5\text{s/uni.}$

### Aspectos importantes.

- En los procesos de ensamble y tapado se da un sub uso de la maquinaria para el tapado, es decir, no está trabajando al 100% de la capacidad normal.
- Existe un cuello de botella en el proceso de tapado y selección, ya que los tiempos de selección son mayores en comparación con los de tapado, esto trae como consecuencia un represamiento de las botellas. Sería conveniente aumentar la velocidad del Brazo Robotico o analizar la posibilidad de insertar otro brazo.
- El proceso comprendido entre la selección y el almacenaje Se da de forma eficiente, es decir que existen los dispositivos adecuados para almacenar la mercancía como montacargas ya que los tiempos son similares de 9.43s/uni y de 9.16s/uni.

### 7.4 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA

Figura 23 Diagrama de bloques del sistema de control

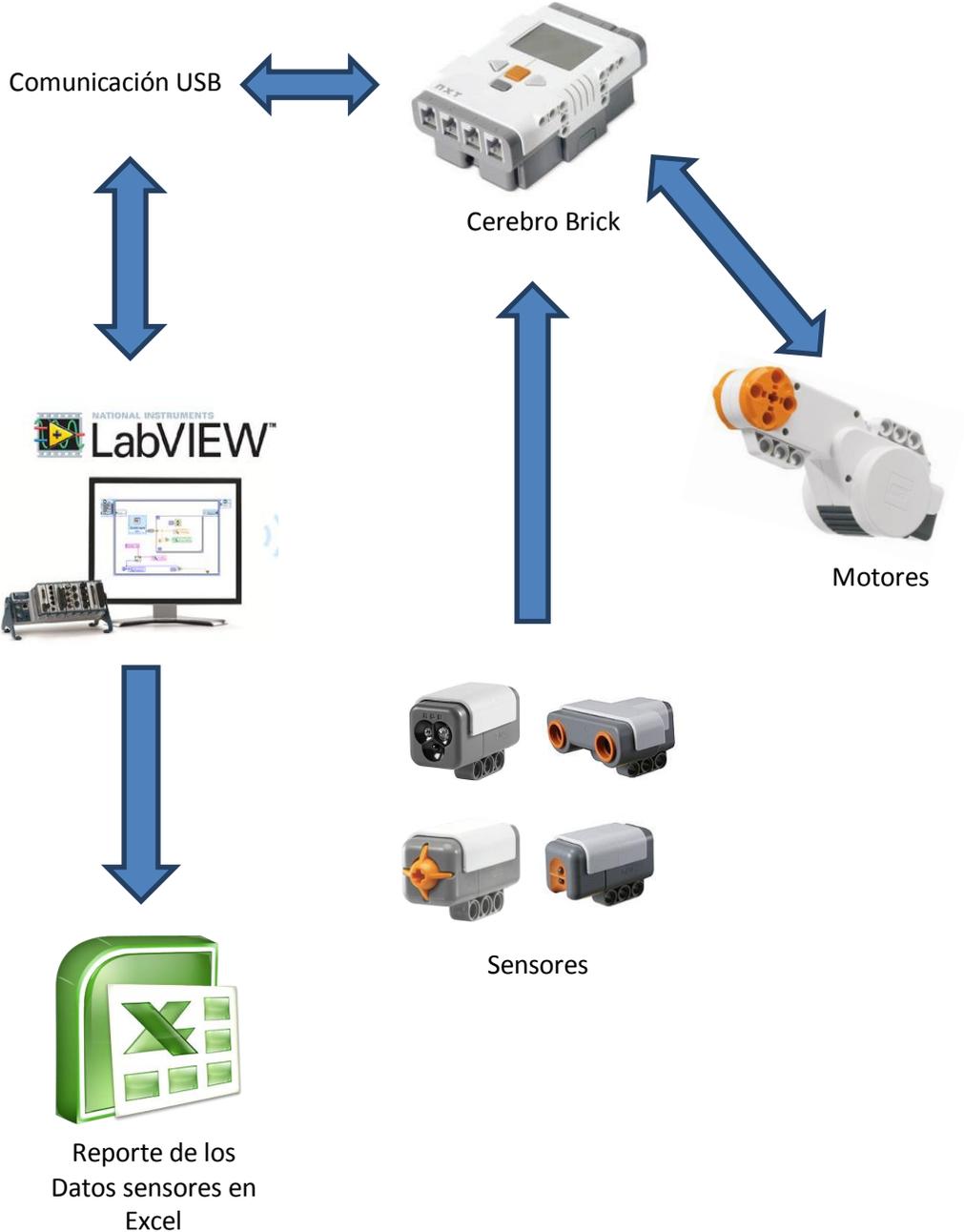
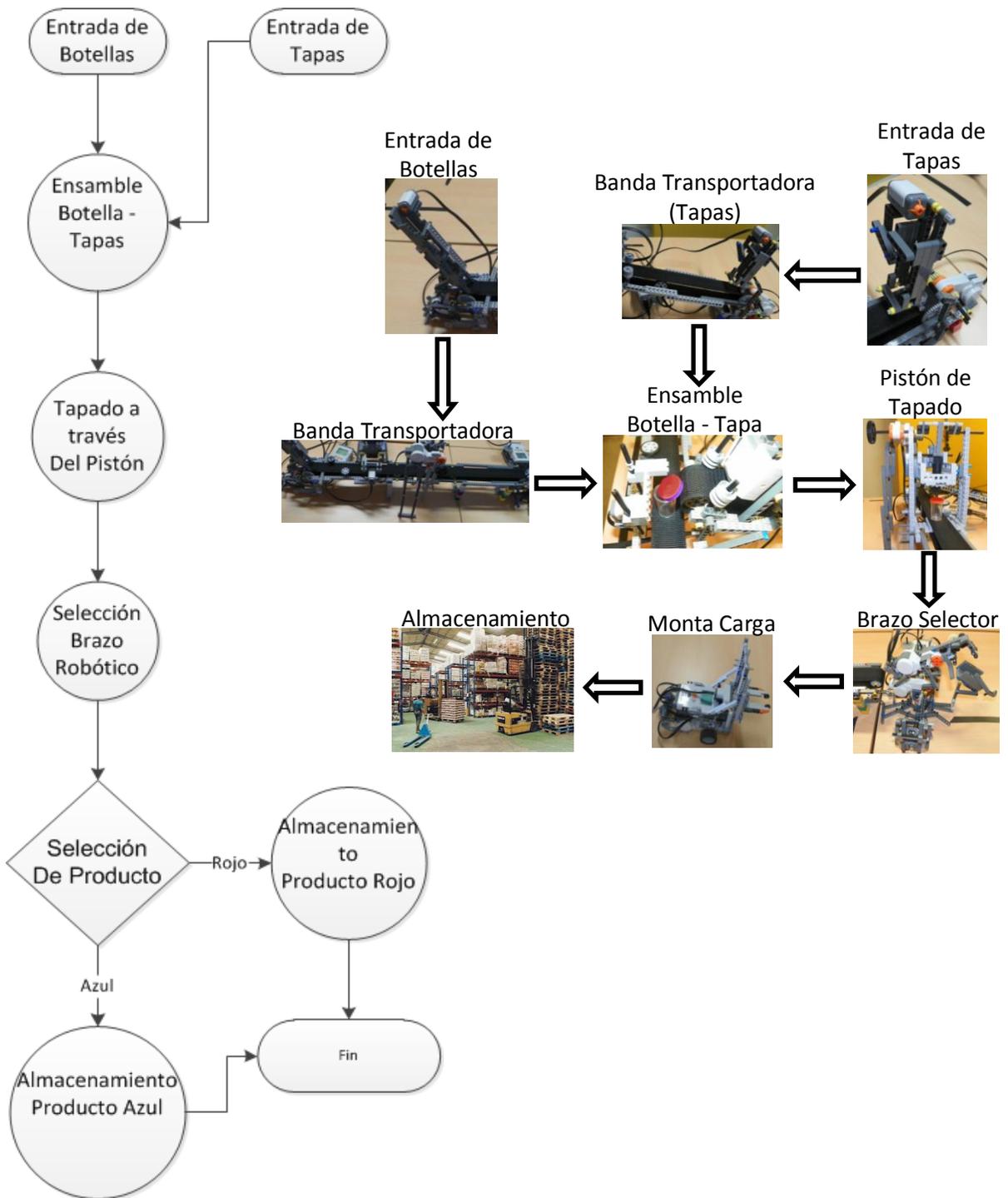


Figura 24 Diagrama de Procesos



### 7.4.1 BANDA TRANSPORTADORA (BOTELLAS).

La Banda Transportadora de botellas está conformada por un sensor de luz, un sensor de contacto (ver Figura 25) y un motor el cual está encargado de generar la rotación a los piñones encargados de darle el movimiento a la banda transportadora (ver Figura 26) cuyo material es el nylon de diámetro 80 cm y toda la estructura cuenta con diferentes piezas de lego en las cuales se encuentra soportada la Banda Transportadora de tapas, el Pistón de Tapado y el Brazo Robótico los cuales ejercen sus funciones sobre la banda respectivamente (ver Figura 27).

Figura 25. Sensores Banda Transportadora (botellas)

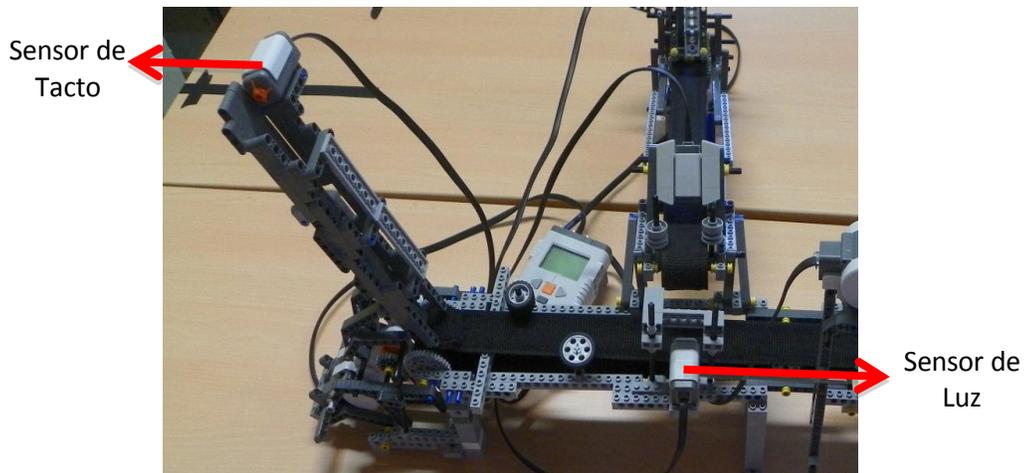
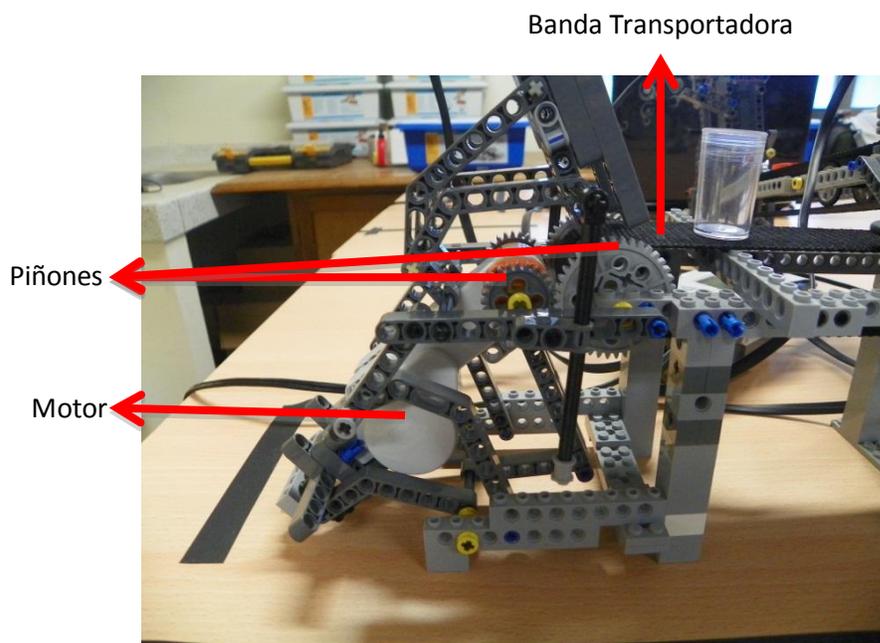


Figura 26. Motor Banda Transportadora



El sensor de luz cumple la función de medir la intensidad de luz, cuando la botella se ubica al frente del sensor la intensidad de luz cambia y de inmediato se detiene la banda para permitir que la tapa sea depositada encima de la botella (ver Figura 15). Cuando pasa la tapa la lectura de la intensidad de luz disminuye y le permite a la Banda Transportadora disminuir su velocidad para que al caer encaje bien sobre la botella, posteriormente la banda continúa con su movimiento hasta llegar al Pistón de Tapado (ver Figura 34) y terminando con el proceso del Brazo Robótico (ver Figura 37).

Figura 27. Banda Transportadora (Botellas)

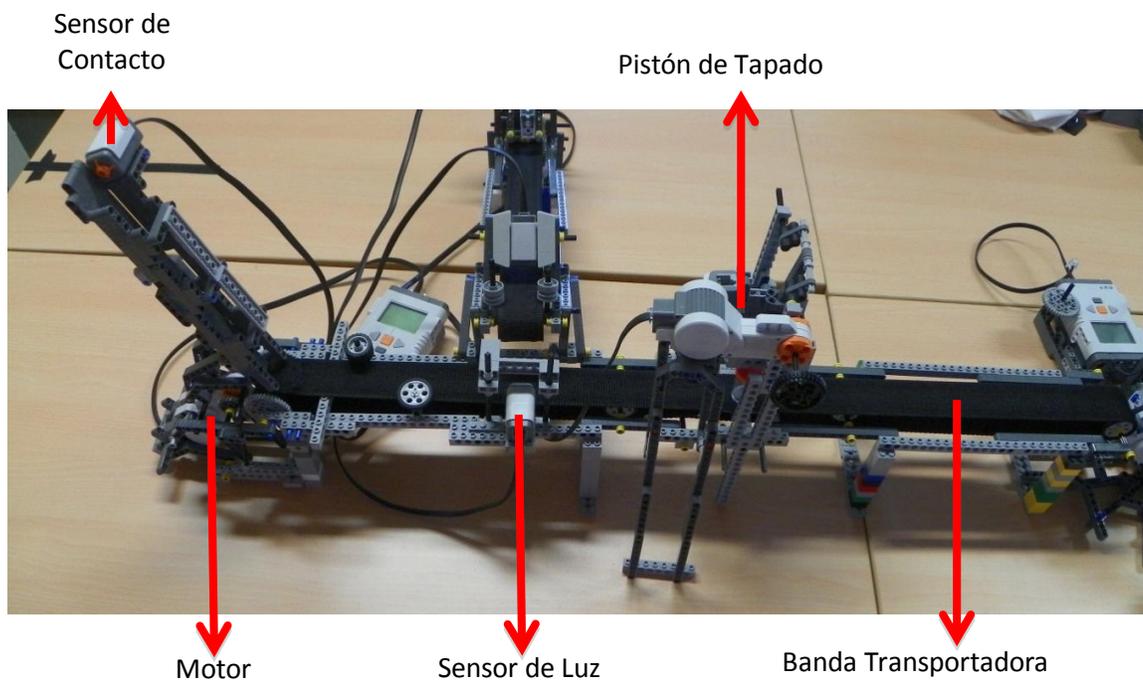
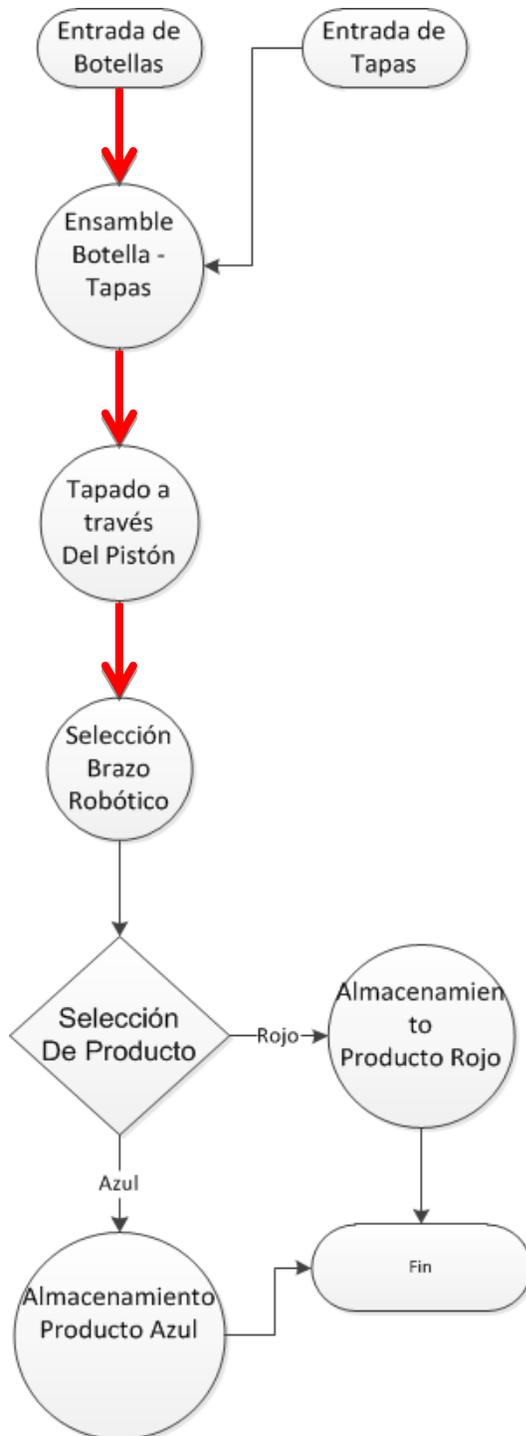


Figura 28. Diagrama de procesos (Posición Banda Transportadora)



#### 7.4.2 BANDA TRANSPORTADORA (TAPAS).

La Banda Transportadora de tapas cuenta con dos sensores (ver Figura 29) uno de luz y el otro de contacto además integra un motor (ver Figura 30), el cual está encargado de generar la rotación a los piñones (ver Figura 30) encargados de darle el movimiento a la banda transportadora cuyo material es el nylon de diámetro 40 cm (ver Figura 31) delegada de llevar las tapas hasta un sensor de luz que tiene como fin medir la intensidad de luz, cuando pasa la tapa la lectura de la intensidad de luz disminuye y le permite a la Banda Transportadora disminuir su velocidad para que al caer encaje bien sobre la botella (ver Figura 15).

Figura 29. Sensores Banda Transportadora

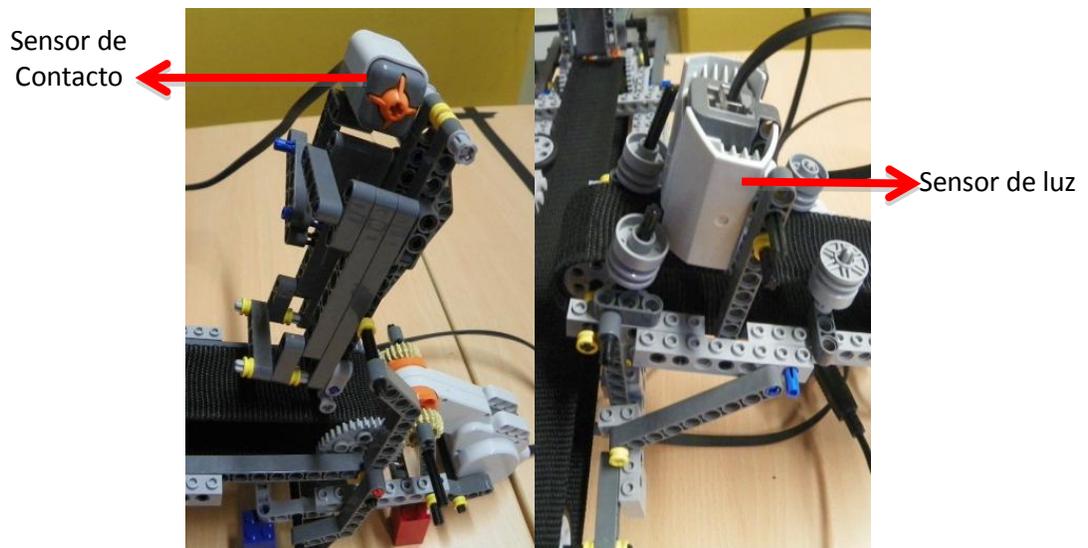
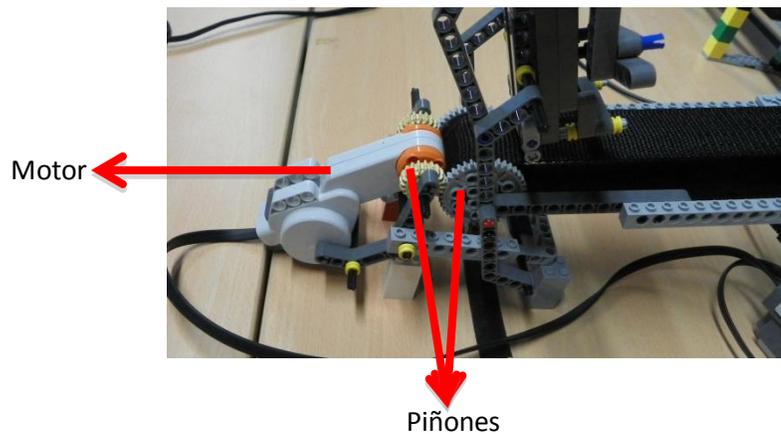


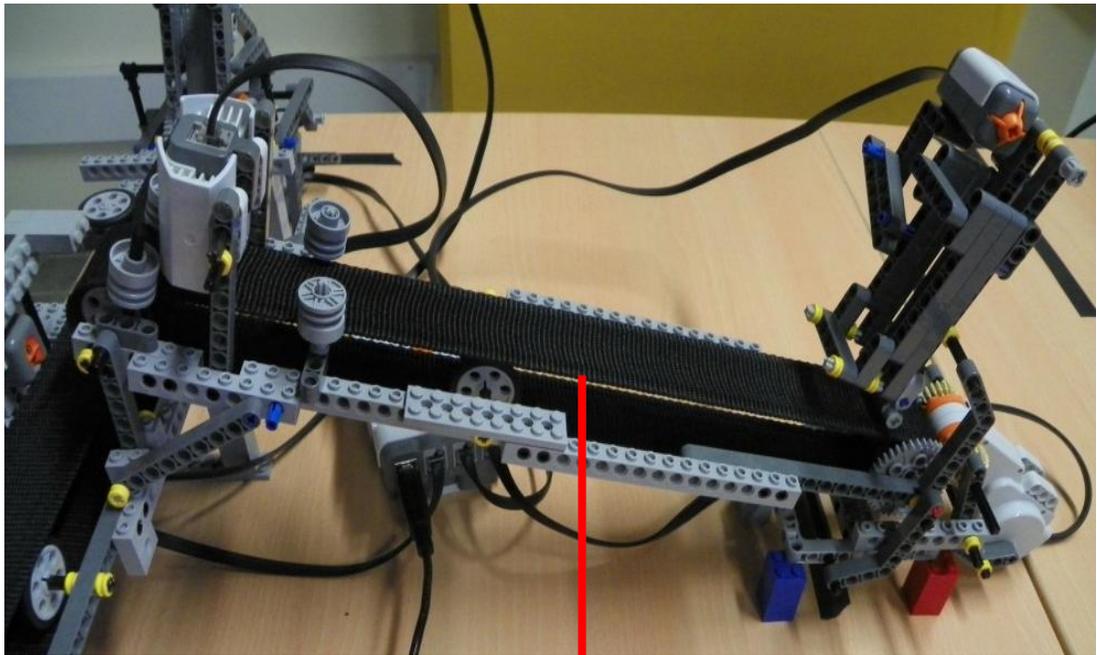
Figura 30. Motor Banda Transportadora



El sensor de contacto se encarga de llevar el control de la entrada de tapas al sistema. Al ingresar la tapa esta presiona el sensor para conocer la cantidad de tapas totales.

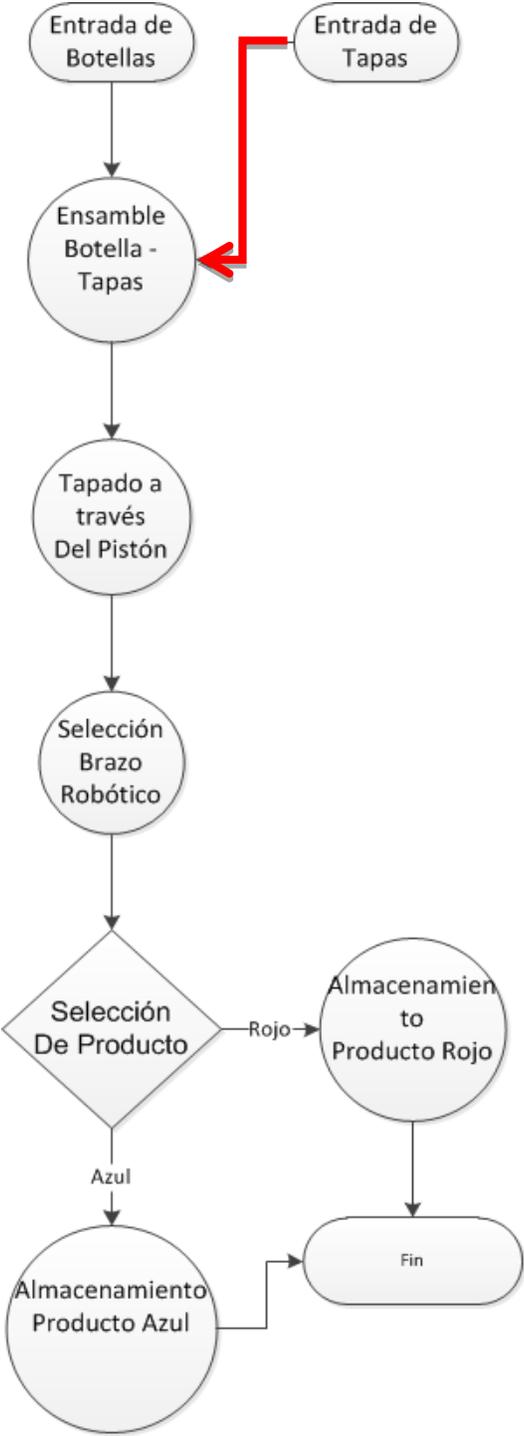
Los dos sensores y el motor están conectados a un NXT que cuenta con la programación de la banda y el pistón de tapado.

Figura 31. Banda Transportadora (Tapas)



Banda Transportadora Nylon

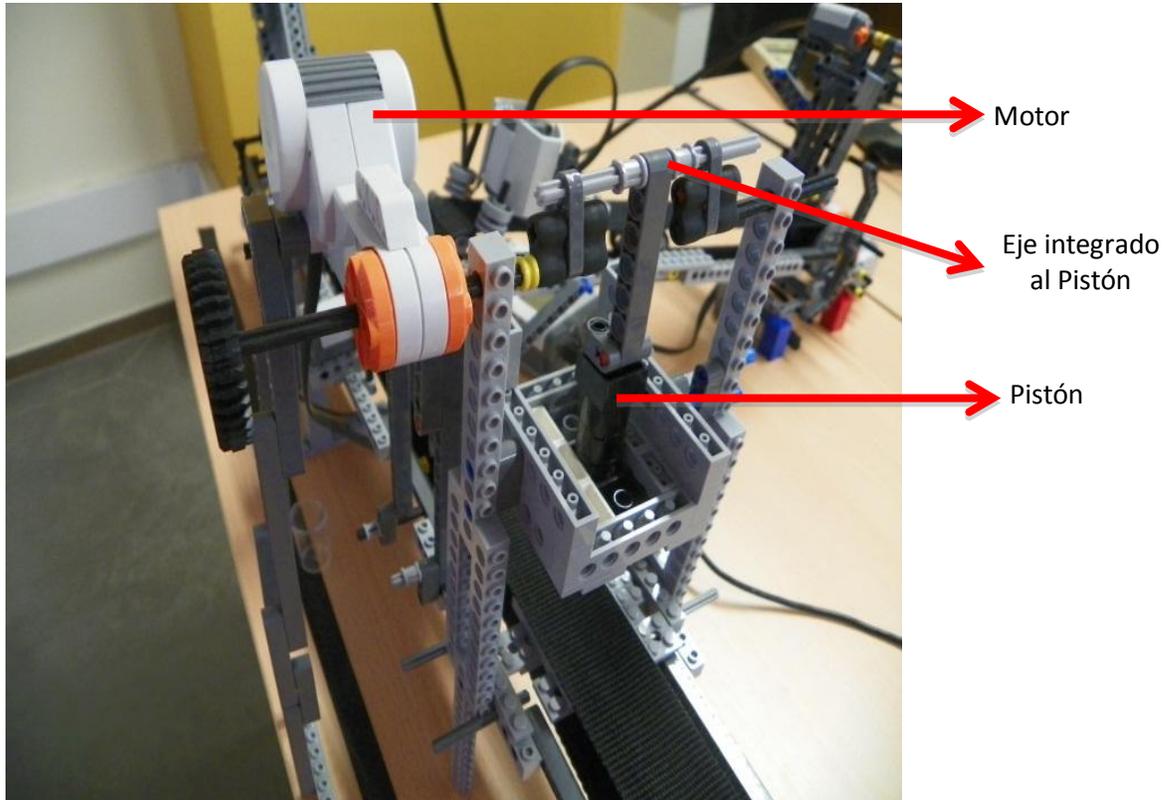
Figura 32. Diagrama de procesos (Posición Banda Transportadora Tapas)



### 7.4.3 PISTÓN DE TAPADO.

El pistón de tapado cuenta con un motor (ver Figura 33) el cual está encargado de ejercer fuerza sobre la tapa por medio de varias repeticiones y a través de un eje el cual está integrado al pistón de lego (ver Figura 33) por medio de un armazón de piezas que se encuentran sobre la banda transportadora que ubica la botella debajo del pistón para que este la tape (ver Figura 34).

Figura 33. Motor de Tapado



El pistón de tapado está unido al NXT el cual está programado para hacer funcionar la banda transportadora (tapas), el pistón y un sensor ultrasónico que se encarga de medir por medio de ondas de sonido. Cuando la botella se encuentra debajo del sensor éste manda la señal para que el pistón empiece a funcionar (ver Figura 34).

Figura 34. Pistón de Tapado

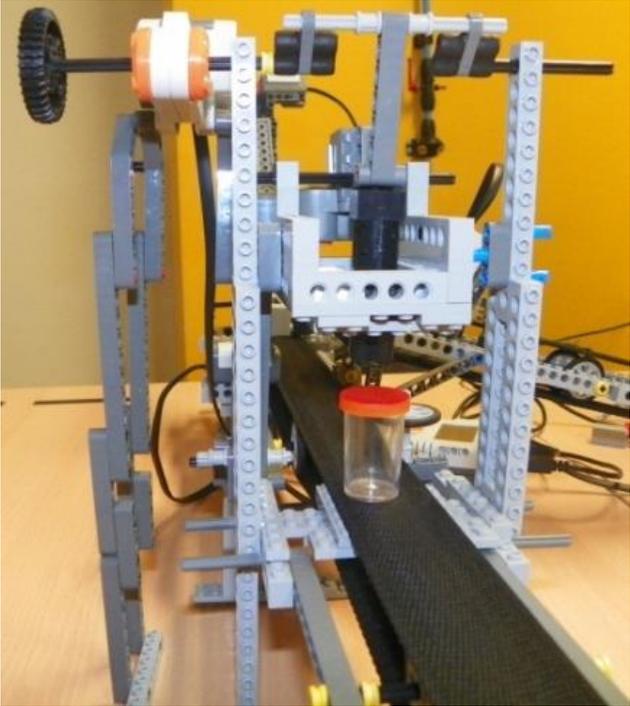
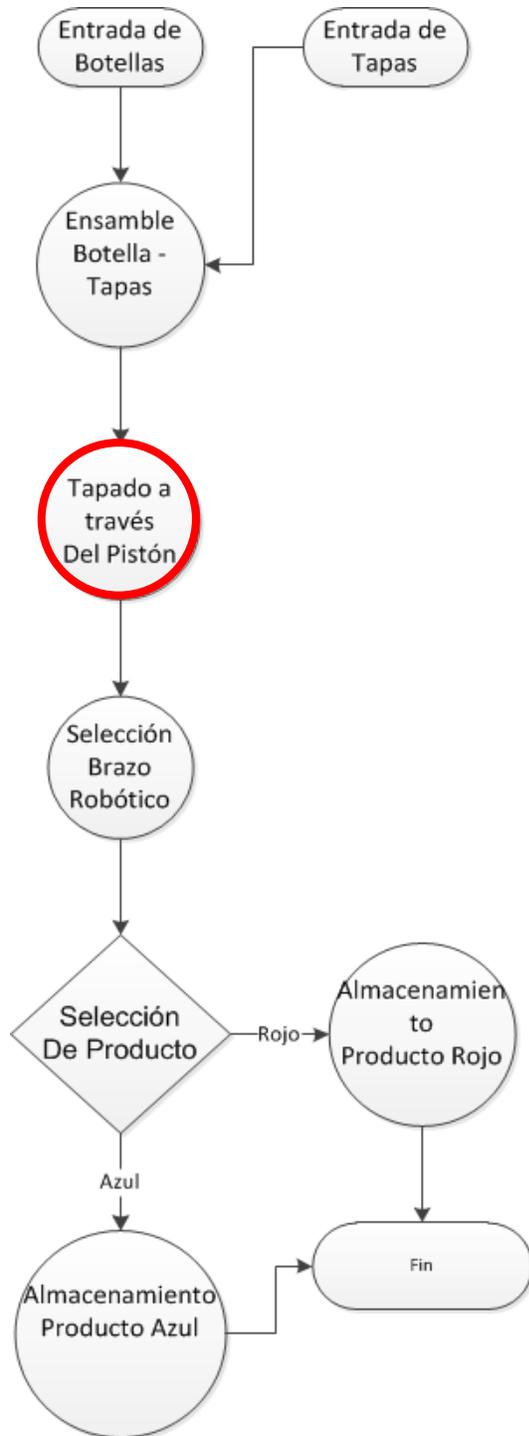


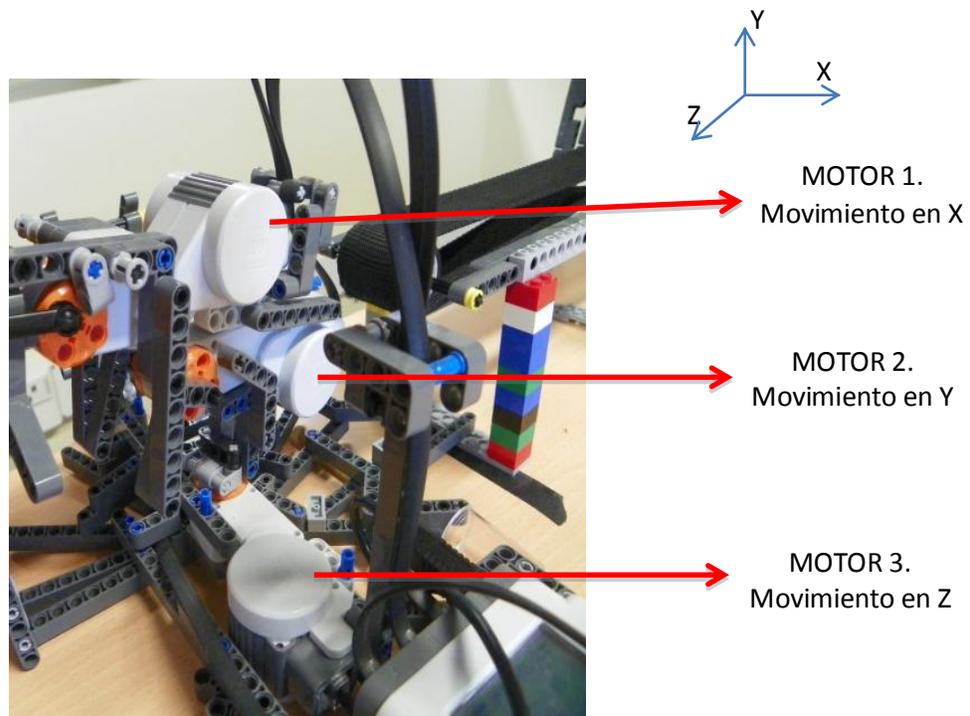
Figura 35. Diagrama de Procesos (Posición Pistón de Tapado)



#### 7.4.4 BRAZO ROBÓTICO SELECCIONADOR DE COLOR

El brazo robótico diseñado cuenta con tres motores que le dan movimiento en X, Y y Z (ver Figura 36) para facilitar las posiciones de agarre sobre las botellas (ver Figura 37) permitiéndole la ubicación sobre las cajas, además de los tres motores también incluye un sensor de color (ver Figura 37) el cual está ubicado en un soporte al lado del brazo para ser apoyado y luego identificado el tipo de producto para su selección.

Figura 36. Motores Brazo Robótico



Los motores y el sensor están unidos a un NXT (ver Figura 38) el cual está programado para que los motores y sensor hagan los movimientos coordinados de selección. Las fichas de lego se unen de forma que le den firmeza al brazo y eviten que pierda estabilidad y cause problemas dentro de la producción. (Ver figura 37).

Figura 37. Brazo Robótico Selección de Color

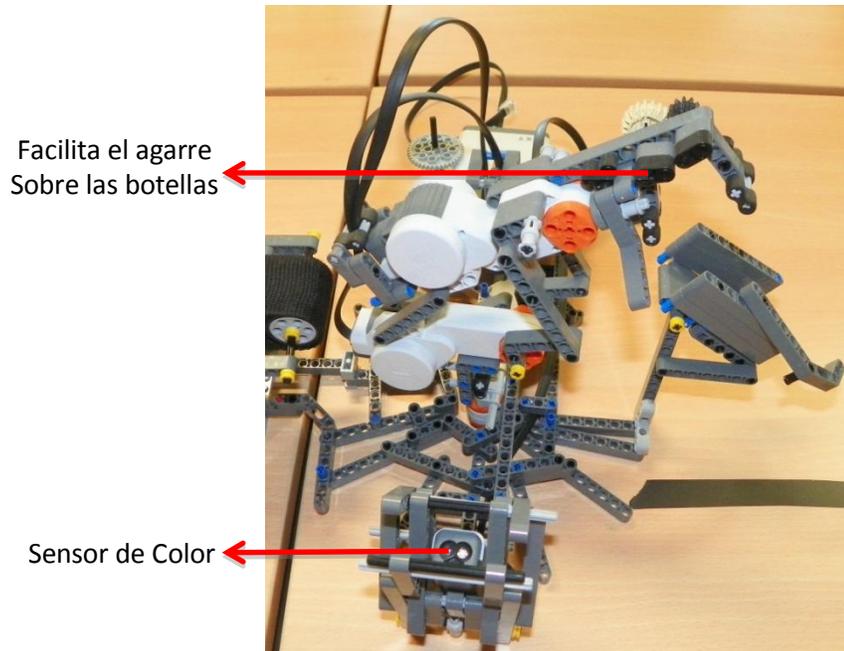


Figura 38. Brazo Robótico unido a un NXT

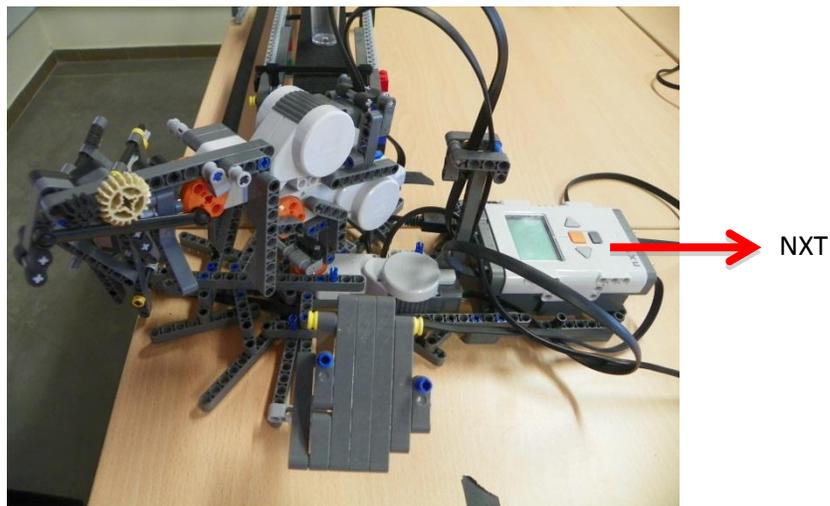
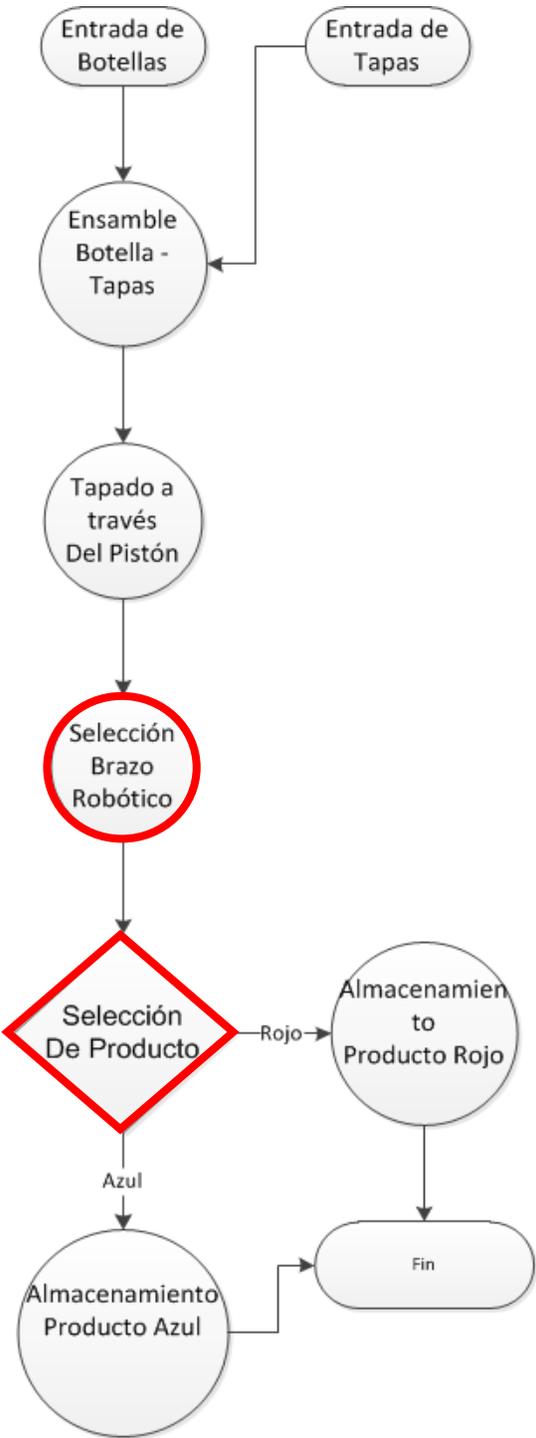
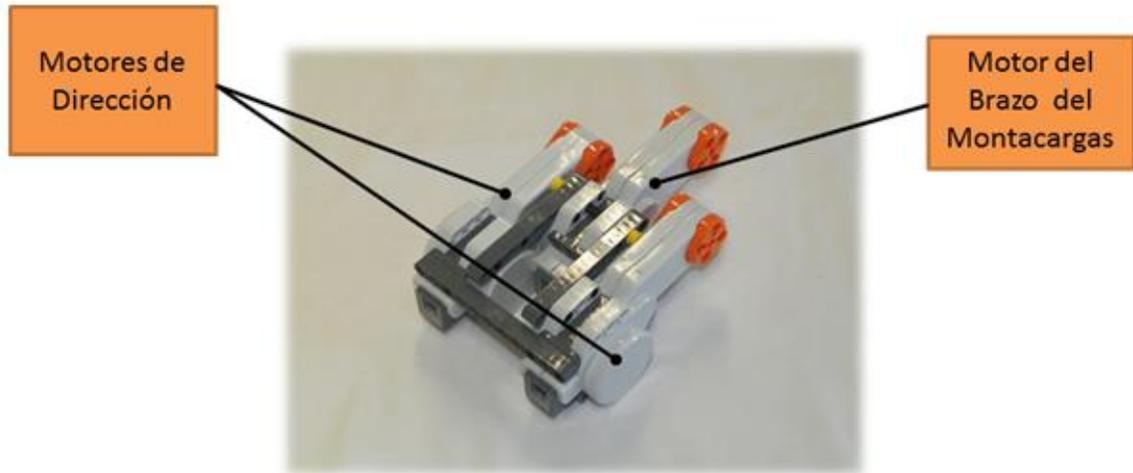


Figura 39. Diagrama de Procesos (Posición Brazo Selector)



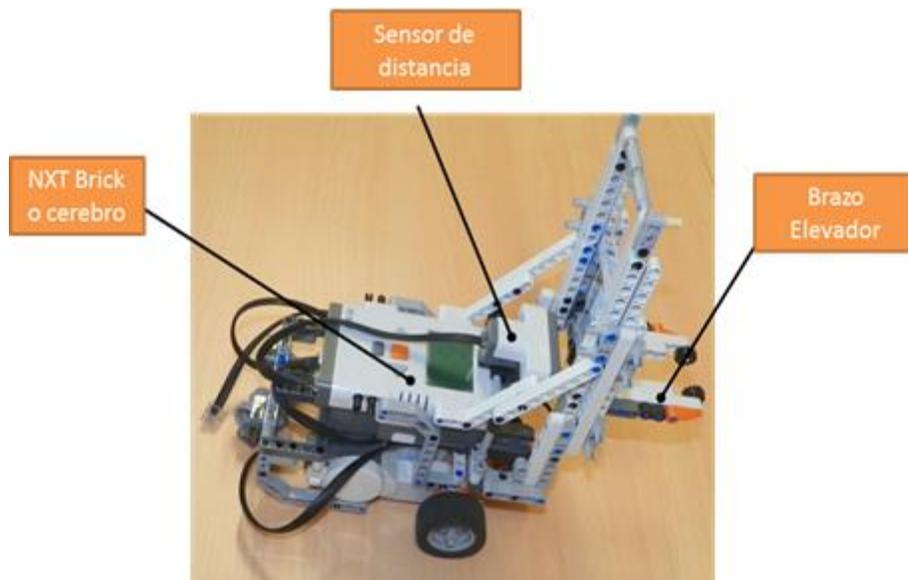
### 7.4.5 MONTA CARGA.

Figura 40. Distribución de los motores del Monta Carga



Para el montaje del montacargas se utilizaron 3 motores que además de proporcionar el soporte del vehículo fueron los encargados del movimiento, 2 de ellos ubicados a izquierda y derecha respectivamente se encargan de darle movimiento (adelante, atrás, izquierda y derecha) y el motor central tenía la función de darle la fuerza a la palanca para subirla o bajarla según sea necesario (ver Figura 40).

Figura 41. Componentes del Monta Cargas



La distribución de componentes del montacargas se muestra en la Figura 41, consta de un NXT Brick o cerebro en el cual se programó el manejo del vehículo. El sensor ultrasónico ubicado en la parte superior fue el encargado de que los actuadores en este caso los motores controlaran la máquina, se estableció un recorrido predeterminado para el montacargas (Figura42) y en el momento que el sensor ultrasónico envía una señal al NXT menor de 15 cm se realiza el procedimiento de recoger o descargar el producto (ver Figura 42).

Figura 42. Recorrido Monta Carga

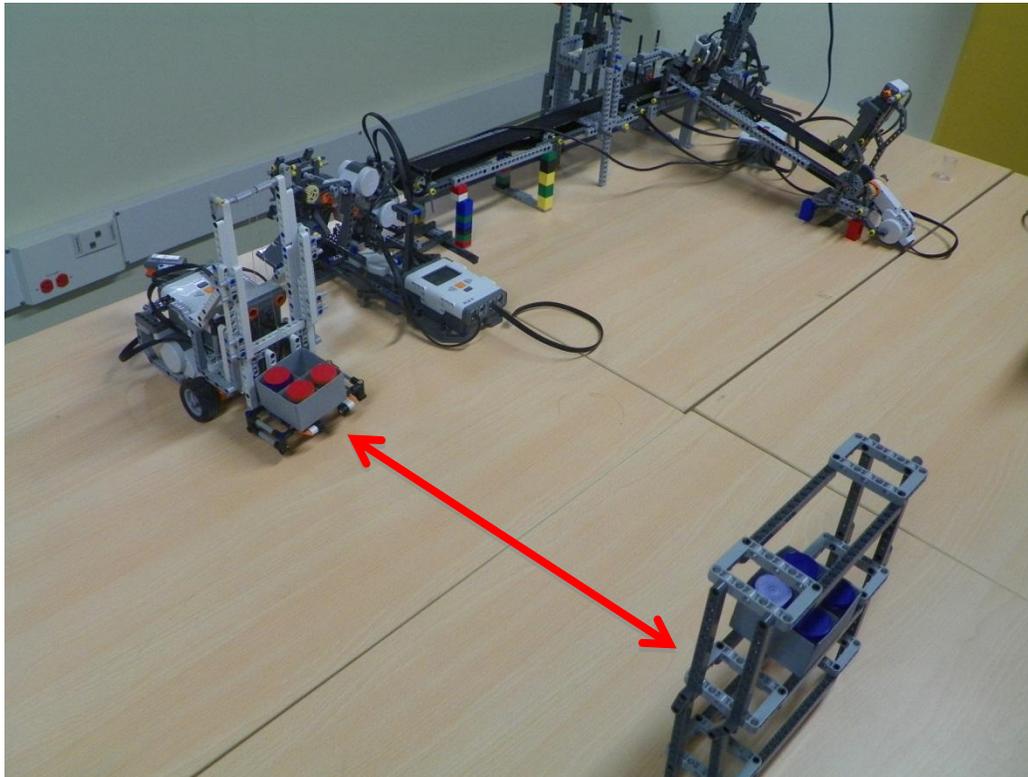
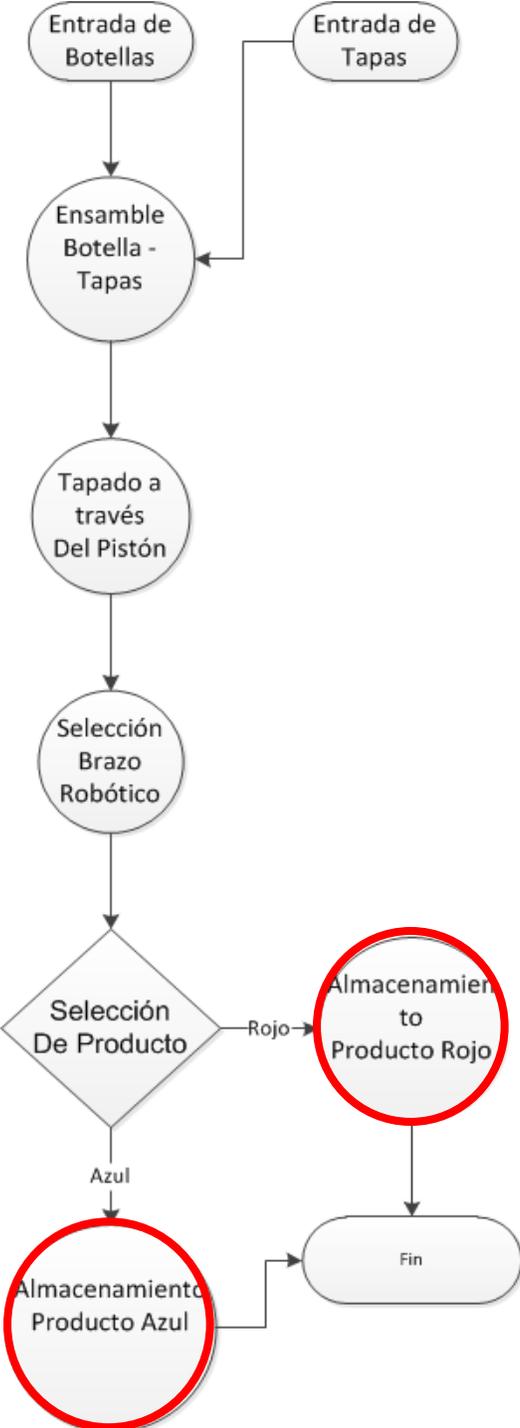


Figura 43. Diagrama de procesos (Posición Monta Carga)



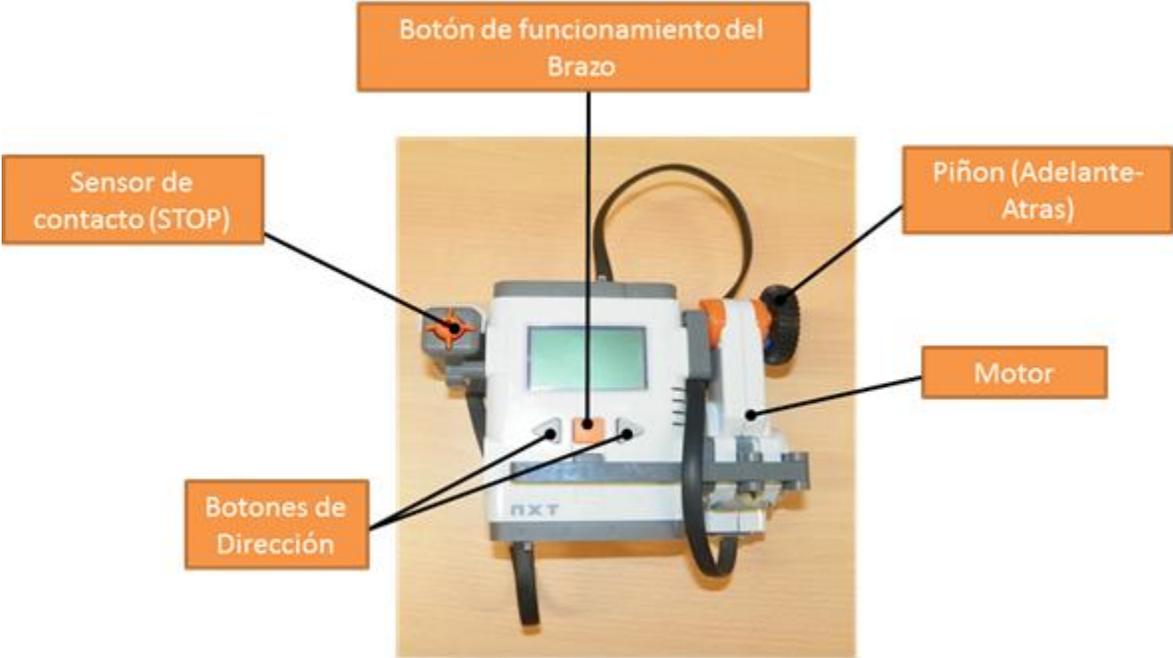
#### 7.4.6 MONTA CARGA A CONTROL REMOTO

Figura 44. Monta Carga a Control Remoto



El funcionamiento de este montacargas es muy similar al anteriormente nombrado y que se puede observar en la Figura 41, en este caso no depende de la señal del sensor ultrasónico ubicado en la parte superior del vehículo, esta vez es controlado directamente por el operario por medio de un control remoto. Este control remoto fue diseñado con otro NXT (ver figura 45), en él se integró un sensor de contacto que tiene la función de parar el monta carga en caso de emergencia, esto ocurre si el sensor esta activo. El motor está ensamblado con un piñón para permitir el movimiento adelante y atrás del monta carga. La dirección se da con las flechas de mando del NXT y el botón naranja está encargado junto con el piñón de darle el movimiento desde el control a la palanca de carga.

Figura 45. Control Remoto del Monta Carga

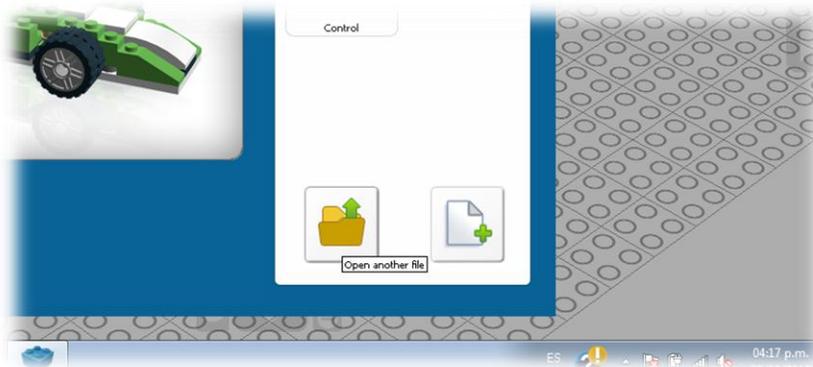


## 8 GUÍAS DE ARMADO DE LA PLANTA EMBOTELLADORA.

En el archivo anexo a este libro se tendrán las guías completas de armado de la planta embotelladora hechas en LEGO DIGITAL DESIGNER además del proceso de instalación del software y de cómo utilizarlo para lograr un completo el ensamble y construcción de la planta, aquí se mostrará brevemente el proceso de construcción del brazo mecánico.

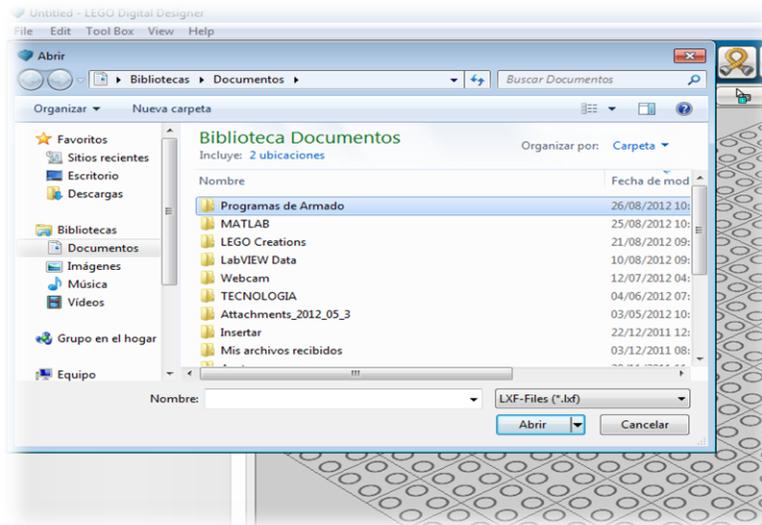
Se hace click en el icono Open another file. Figura 46.

Figura 46. Open Another File



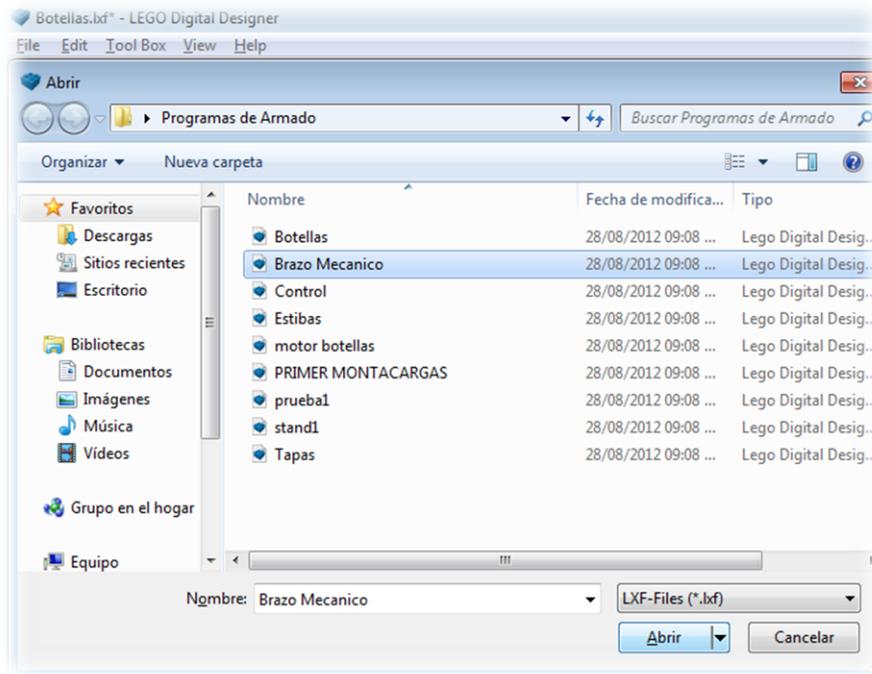
Se busca la carpeta Programas de Armado, allí están todos los programas para armar la planta embotelladora. Figura 47.

Figura 47. Escoger Carpeta Programas de armado



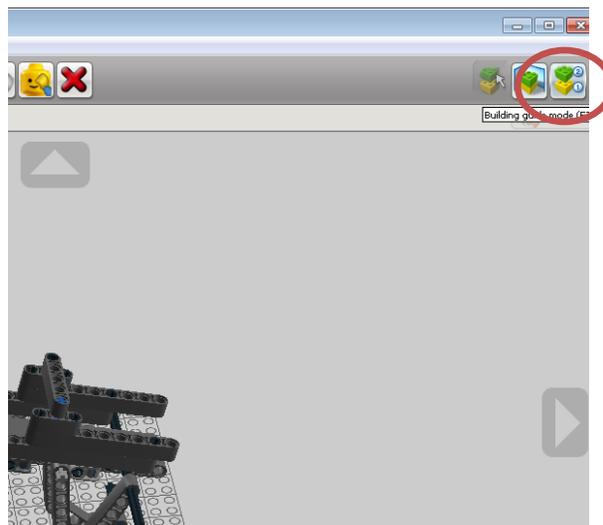
Se escoge el segundo archivo llamado Brazo Mecánico y se hace click en Abrir  
Figura 48

Figura 48. Escoger Archivo Brazo Mecánico



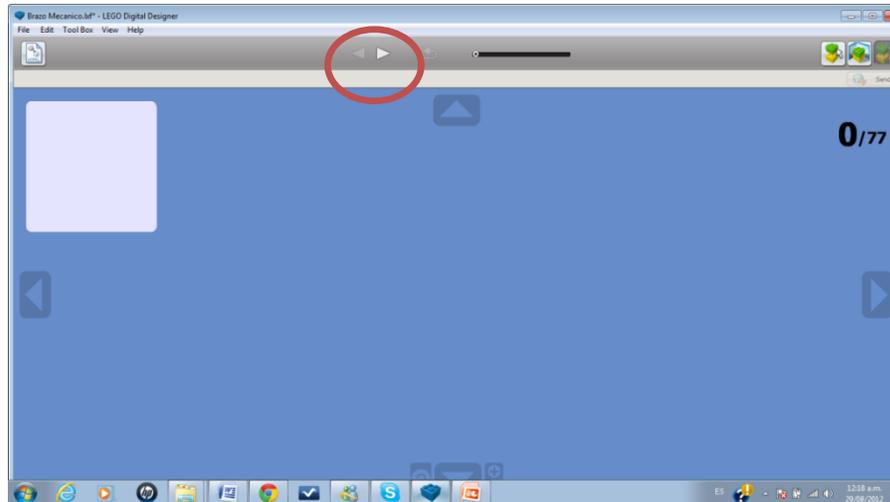
Se hace click en el botón Building guide mode para observar paso a paso el armado del brazo mecánico ubicado en la parte superior derecha de la pantalla  
Figura 49

Figura 49. Hacer Click para Obtener el Paso a Paso



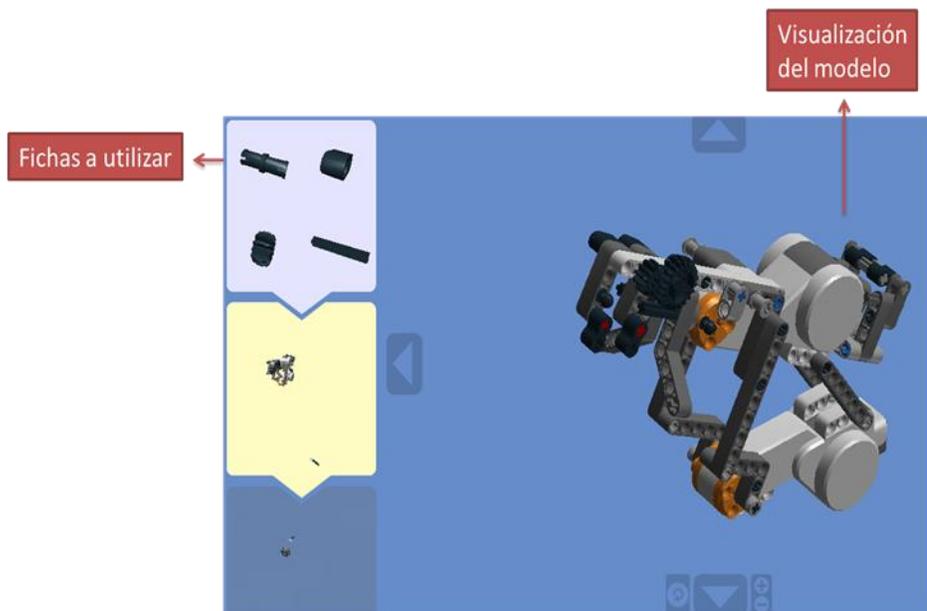
En la pantalla se hace click sobre la flecha mostrada en la Figura 50 y se sigue paso a paso el tutorial de la construcción del brazo mecánico.

Figura 50. Click Flecha para tener el Paso a Paso



En la Figura 51 se observa un paso intermedio de la construcción del brazo robótico, el software de visualización de la construcción de la planta tiene unos gráficos de alta calidad lo que permitirá que el estudiante logre un perfecto armado

Figura 51. Construcción Brazo Robótico con el software LEGO DIGITAL DESIGNER.



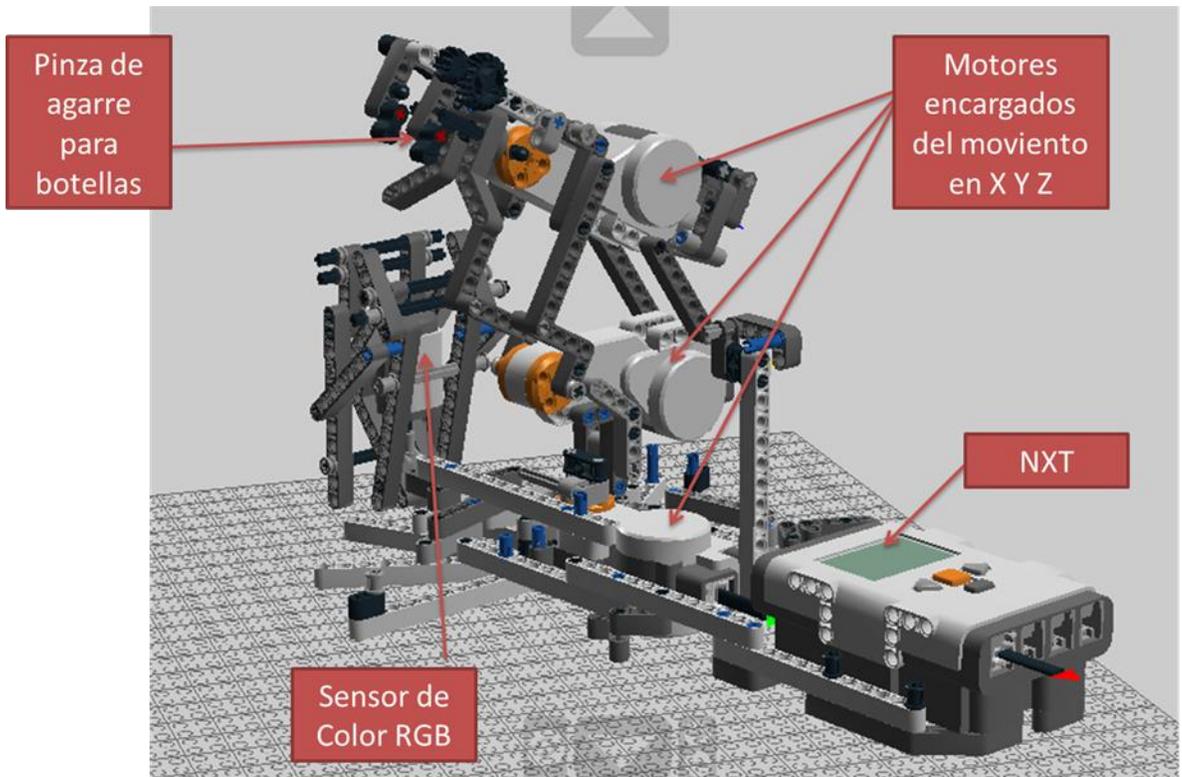
La Figura 52 muestra la construcción de la parte del sensor RGB que posee el brazo robótico para la selección de las botellas.

Figura 52. Sensor RGB hecho en LEGO DIGITAL DESIGNER



El Brazo mecánico se construyó para proveer al estudiante de una herramienta capaz de realizar desplazamientos en el plano X, Y y Z para realizar el proceso de selección de las botellas, consta de 3 motores cada uno encargado de un movimiento en los ejes coordenados, el primer motor es el encargado del desplazamiento desde la banda transportadora hacia los montacargas, el segundo es el encargado de subir o bajar el brazo y el tercero se encarga de mover una pinza que está ubicada en el extremo del brazo encargada de recoger las botellas. Este brazo posee un sensor de color RGB utilizado para realizar la selección de las botellas por su color, dependiendo de la señal que envíe este sensor al NXT el brazo toma la decisión de dejar la botella en una posición específica. Figura 53

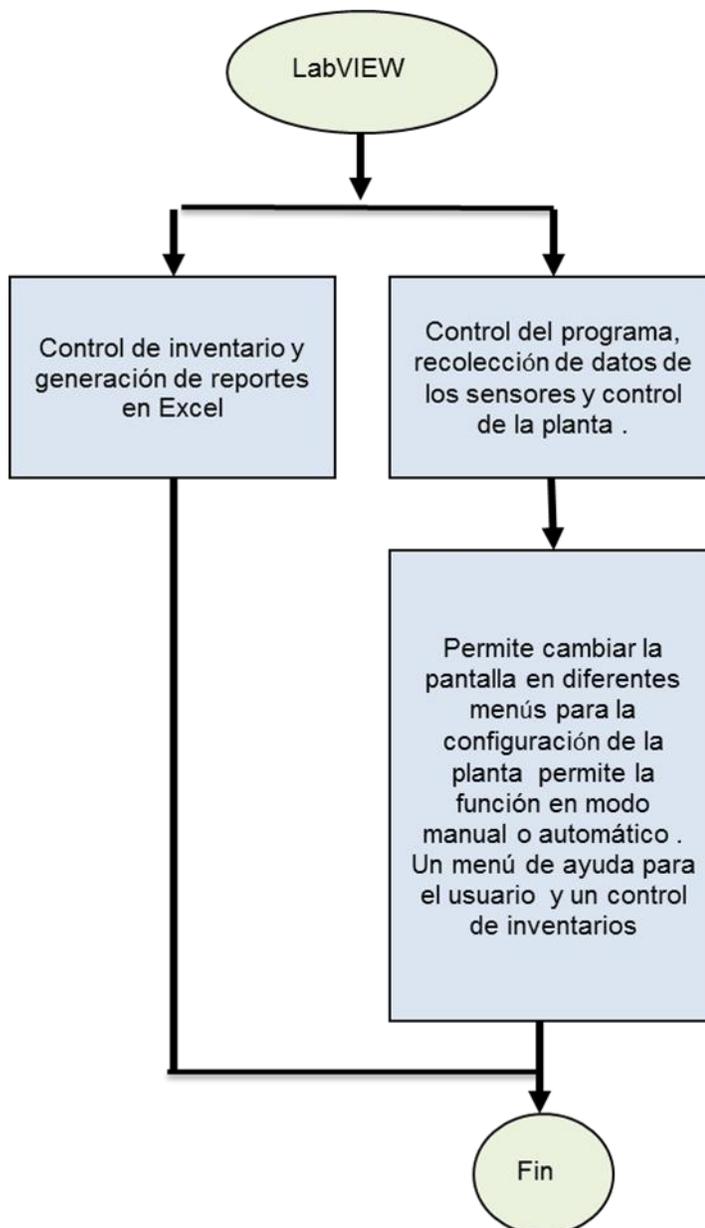
Figura 53. Modelo Terminado Brazo Robótico hecho en LEGO DIGITAL DESIGNER



## 9 LABVIEW

Se utilizó LabVIEW 2010 para el diseño del sistema de adquisición de datos y control desde el computador por medio de la interfaz creada. El programa se describe de forma general en el diagrama de la Figura 54.

Figura 54. Diagrama de flujo general del programa desarrollado en LabVIEW\_2009

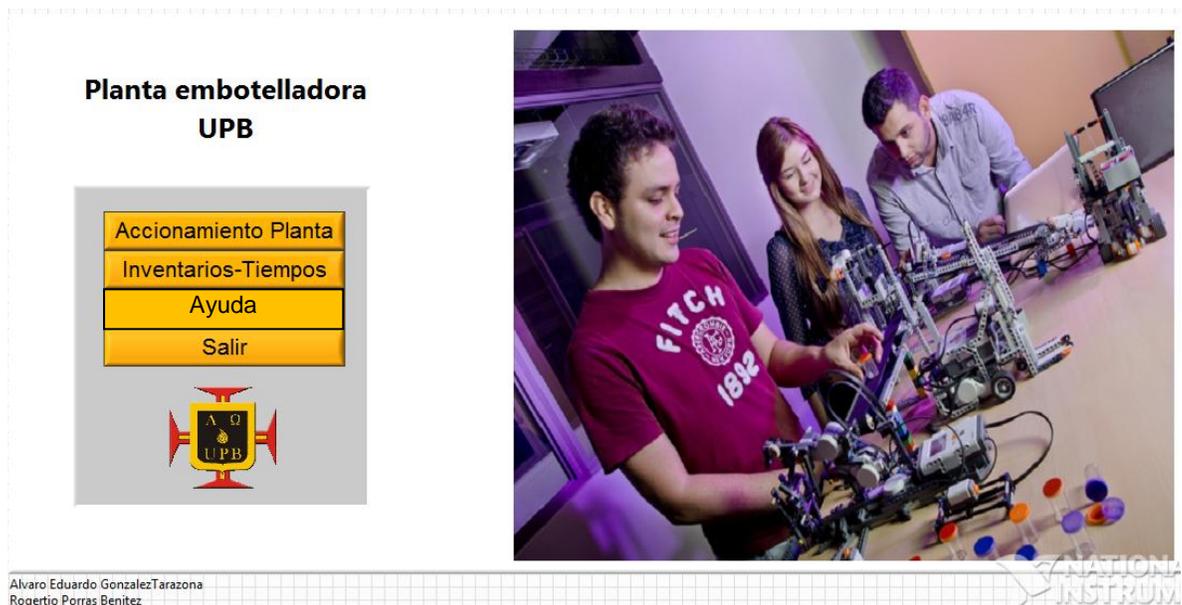


## 9.1 RECOLECCIÓN DE DATOS Y CONTROL DEL SIMULADOR

### 9.1.1 Control general del programa

Este control se hace desde el menú principal que se observa en la Figura 55. Desde este se puede acceder a los sub menús accionamiento de planta, Inventarios-Tiempos y a la ayuda provista para el usuario. Desde cualquier punto se puede detener la simulación o dirigirse de regreso al menú principal o a cualquiera de los sub menús.

Figura 55. Menú principal control de la planta

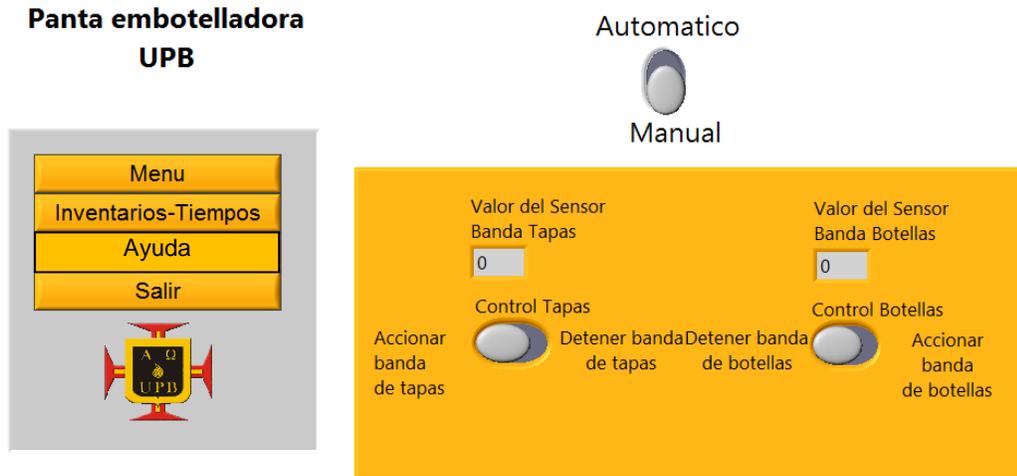


Alvaro Eduardo Gonzalez Tarazona  
Rogetio Porras Benitez

En el menú Accionamiento Planta que se observa en la Figura 56, se puede realizar el control total de la planta ya sea en su funcionamiento manual o automático.

En el modo manual se pueden detener y accionar los dos motores de las bandas para tener control sobre los tiempos de producción del proceso, en el modo automático Figura 57 no se puede intervenir en ninguna acción de la planta y esta funcionara con los valores predeterminados, si se quiere detener el proceso se hace click en salir y si se necesita ayuda en el respectivo botón ayuda.

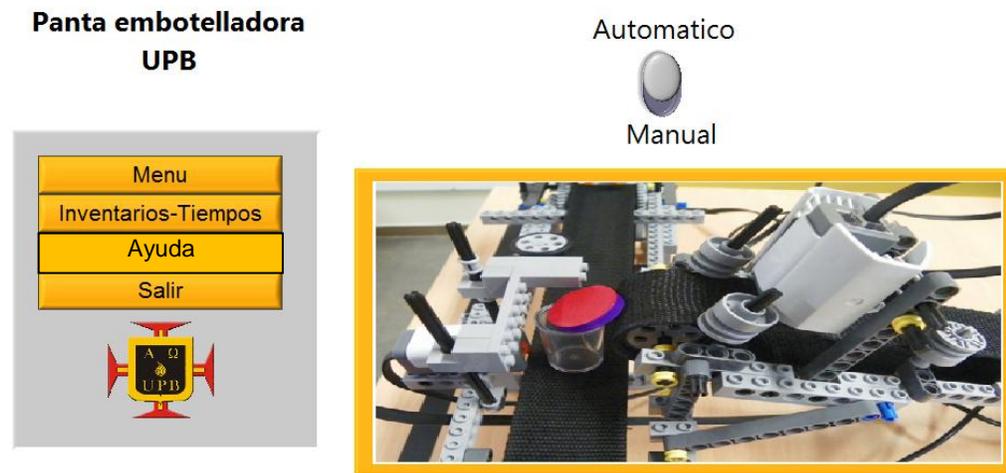
Figura 56. Funcionamiento manual de la planta embotelladora



Alvaro Eduardo GonzalezTarazona  
Rogerio Porras Benitez



Figura 57. Funcionamiento automático de la planta embotelladora

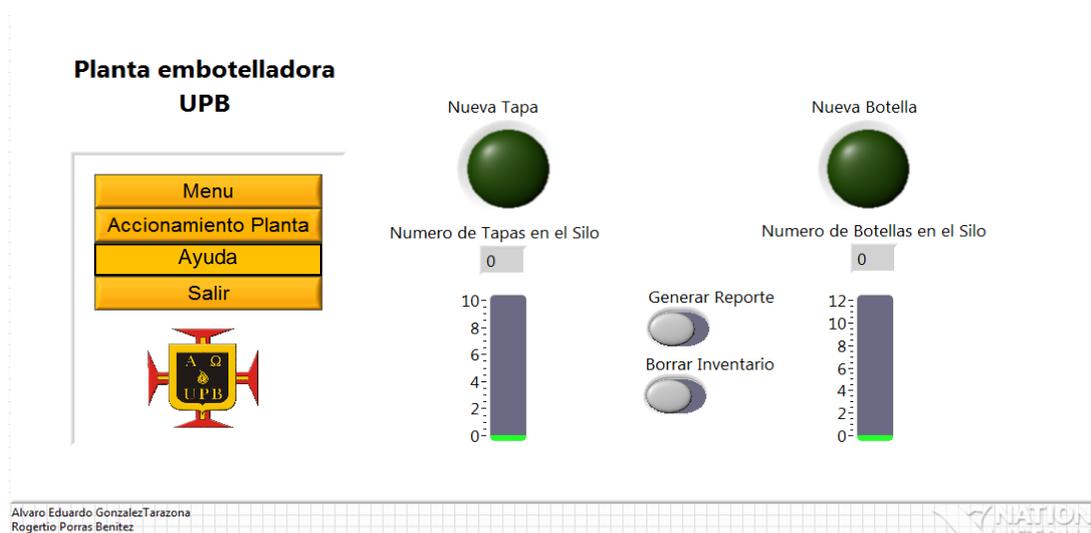


Alvaro Eduardo GonzalezTarazona  
Rogerio Porras Benitez



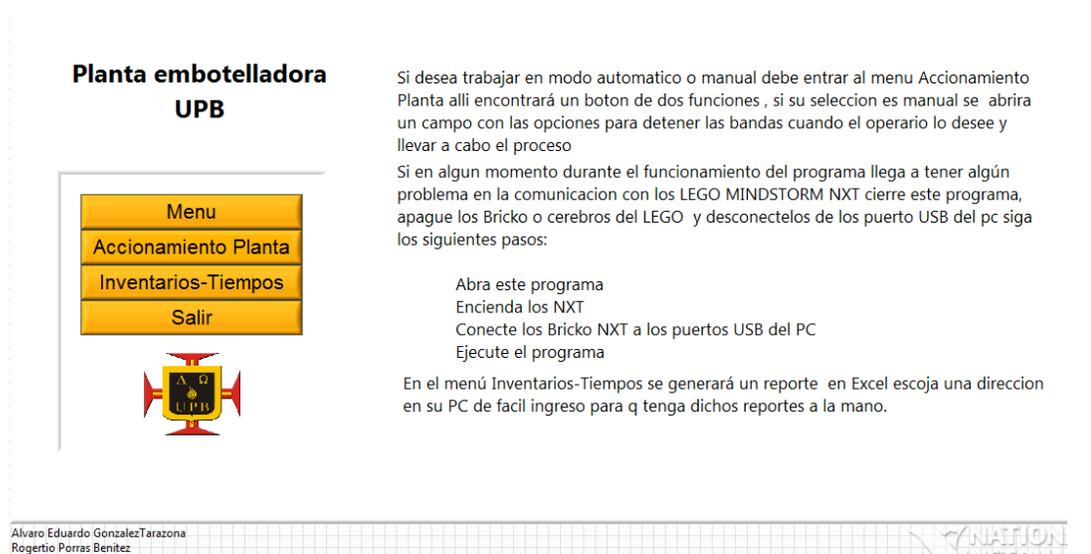
En el menú inventarios tiempos que se observa en la Figura 58 se observa cuánta y qué cantidad de material está en el proceso aquí mismo, se genera un reporte en Excel del inventario de la planta y del tiempo que duro el proceso y se puede borrar el inventario de la planta utilizando el botón incluido en este menú.

Figura 58 Menú Inventario Tiempos



En el menú de ayuda al usuario que se muestra en la Figura 59 se hace una explicación del funcionamiento del programa, instrucciones para realizar una buena conexión de la planta con el PC y algunos pasos que se deben seguir para realizar una buena práctica.

Figura 59 Menú de ayuda para el usuario

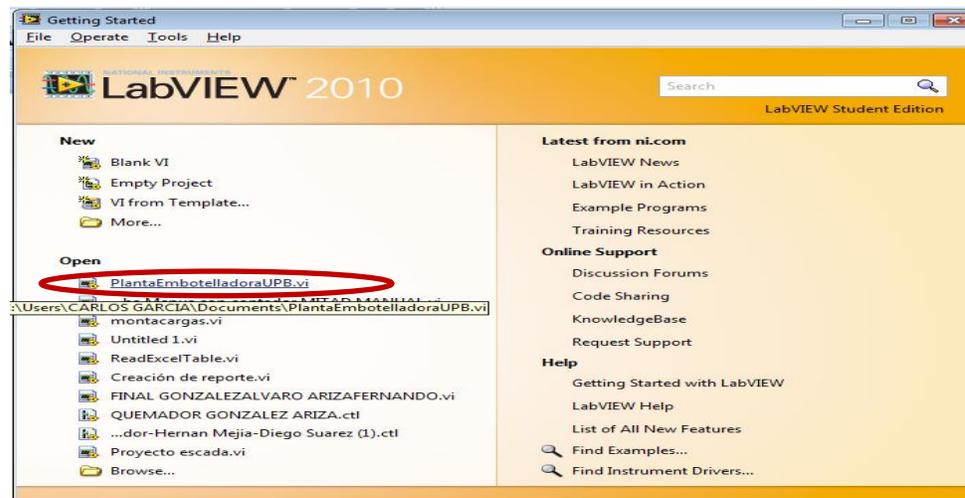


### 9.1.2 Conexiones para el funcionamiento.

Gracias a Labview y a la toolkit de NXT la conexión y la puesta en marcha del software es muy sencilla hay que seguir estos pasos.

- Abrir el programa llamado PlantaEmbotelladoraUPB.vi (.VI es la extensión de los programas hechos en labVIEW). Figura 60

Figura 60 Abrir programa en Labview



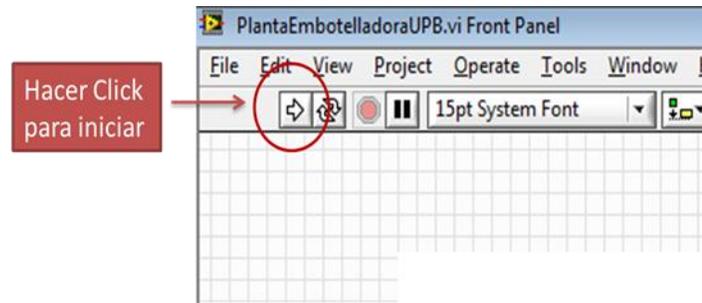
- Encender los brick de los legos NXT manteniendo oprimido el botón naranja Figura 61

Figura 61 Encender módulo Brick



- Conectar los cables USB de los brick's al PC
- Hacer click en el botón run del programa de LabVIEW previamente abierto.  
Figura 62

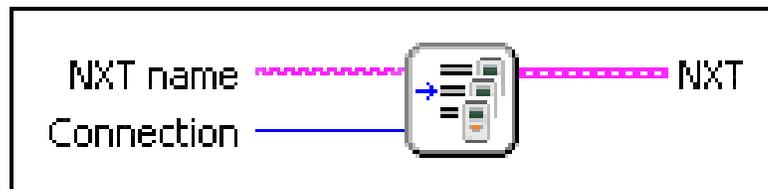
Figura 62 Correr el programa de LabVIEW



### 9.1.3 Recoleccion de datos de los sensores

La comunicación con Labview desde los NXT se realizó utilizando una herramienta de la toolkit NXT llamada SPECIFY NXT, se configura como muestra la Figura 63 y se usa para poder utilizar varios NXT conectados por USB al mismo PC y poder controlarlos al tiempo.

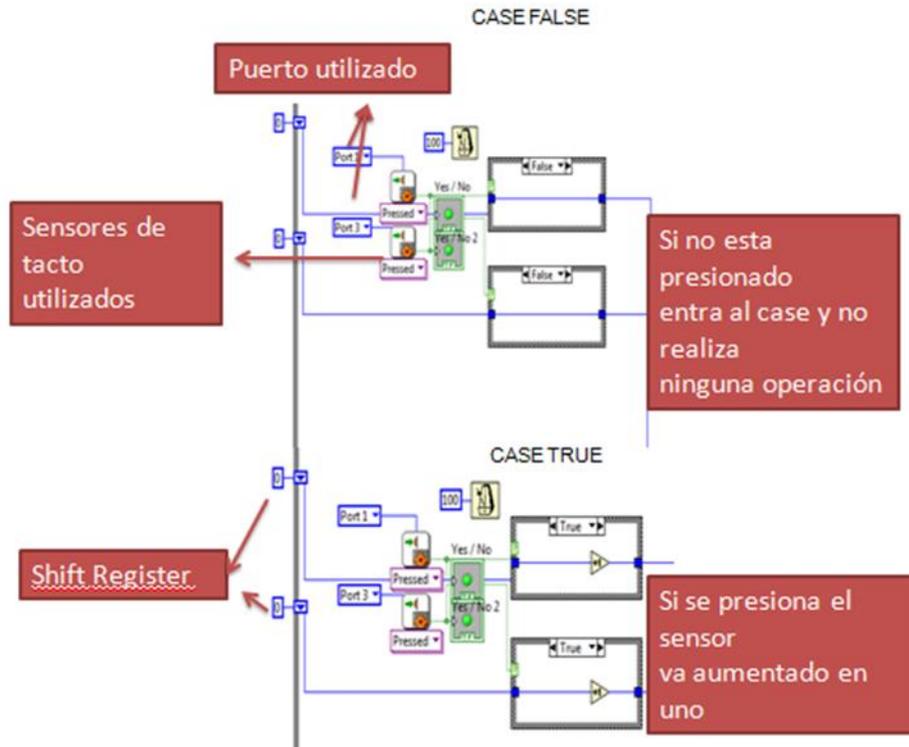
Figura 63 SPECIFY NXT <sup>33</sup>



En la Figura 64 se muestra como se obtuvieron los datos del sensor de tacto para llevar a cabo la operación de los inventarios, en el case dependiendo si está activo o no el sensor va sumando uno al valor que se tenía anteriormente, dicho valor se guarda gracias al shift register, si no está presionado el sensor de tacto el case no tiene ninguna operación que realizar Figura 64.

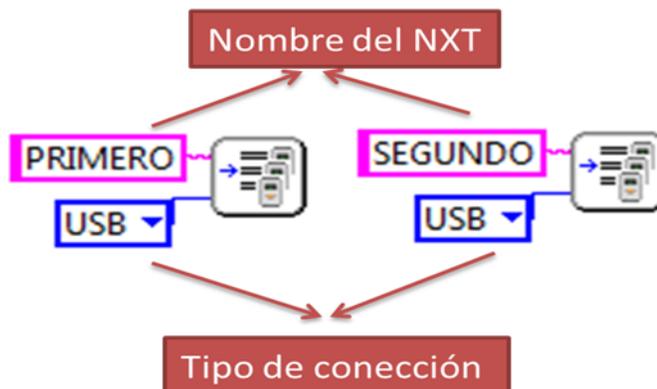
<sup>33</sup>Ayuda LabVIEW2010- Ayuda

Figura 64 Programa Utilizado para la toma de datos del sensor de tacto para llevar el inventario a) CASE FALSE b) CASE TRUE



En la Figura 65 se muestra la configuración SPECIFIC NXT para poder controlar la cantidad de NXT necesarios desde el mismo PC logrando una perfecta sincronización.

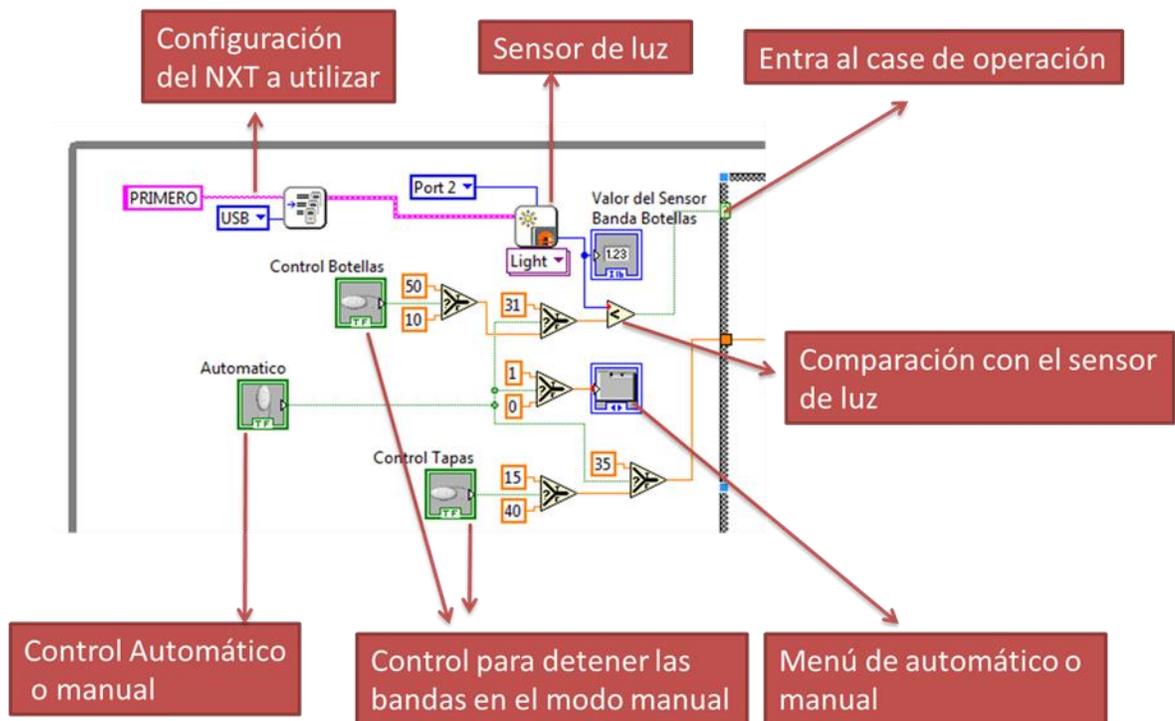
Figura 65 Configuración del SPECIFIC NXT para el control de la planta.



## 9.2 Programación de la planta embotelladora.

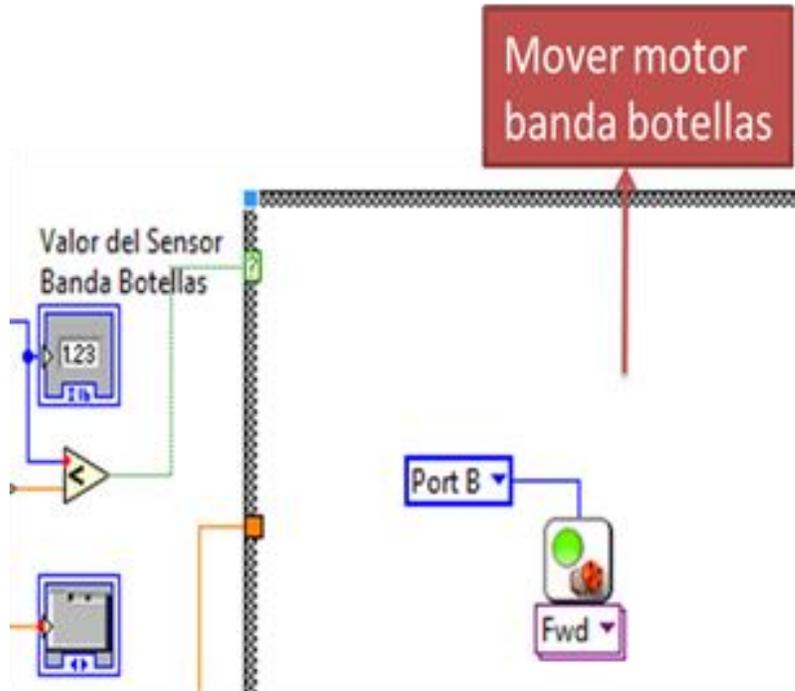
Para la programación de la planta embotelladora se configura el primer NXT con el módulo SPECIF NXT y se pregunta por el valor del sensor de luz de la banda transportadora de botellas esta comparación que se realiza genera un dato booleano (1 ó 0) y esto abre las dos opciones del case (TRUE O FALSE). Los diferentes botones son para tener el control de la planta, el botón automático nos da la opción de que la planta realice su proceso con datos específicos del programa, en la parte manual se tiene un control en los motores de las bandas para realizar paradas cuando el operario lo desee. Figura 66

Figura 66 Programación del sensor de la banda de tapas y los botones de automático o manual



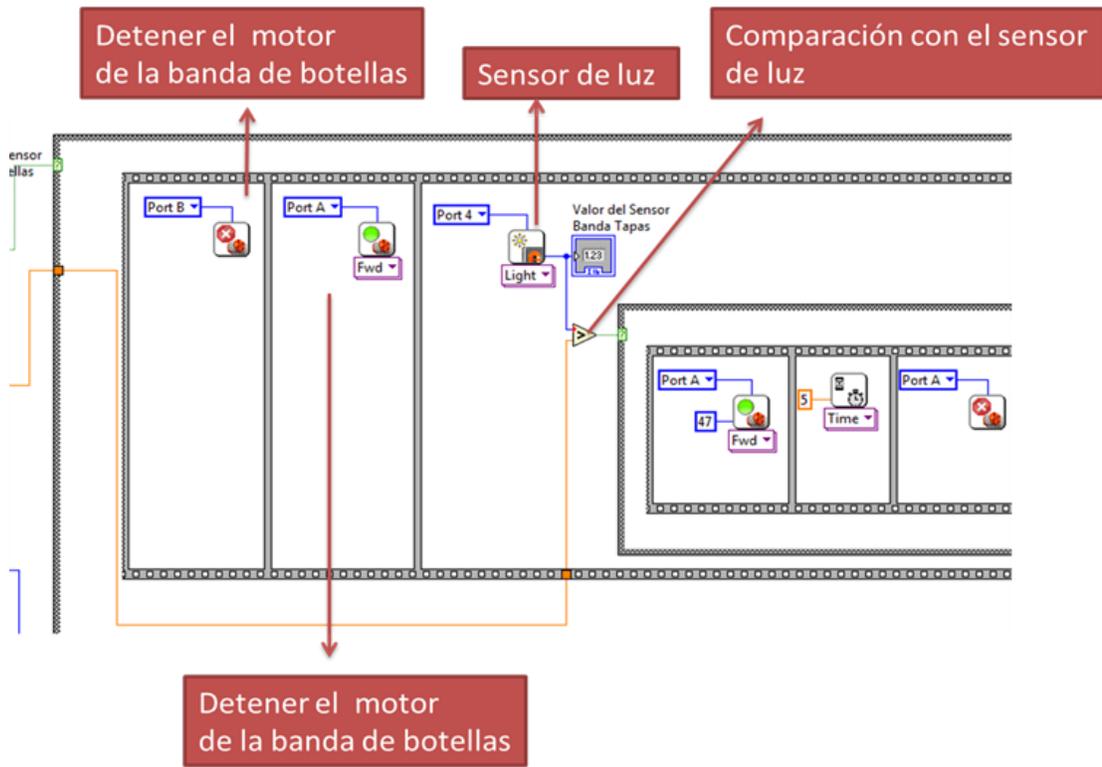
Si la comparación de l sensor de luz con el valor deseado es verdadera, es decir, que el valor del sensor es menor que el deseado entra al case y enciende el motor de la banda transportadora de botellas y se queda en esta instrucción Figura 67

Figura 67 Control de los motores de la banda transportadora (Motor banda botellas)



En el caso que el valor del sensor sea mayor que el valor predeterminado el comparador genera un cero (0) y detiene la banda transportadora de botellas y enciende la banda transportadora de tapas, allí empieza a preguntar por el valor del sensor de luz ubicado sobre la banda de tapas, dicho sensor tiene la misma programación del sensor de luz ubicado en la banda transportadora de botellas. Se compara su valor con un valor predeterminado y dependiendo de la salida del comparador (1 ó 0) se ingresa al case para realizar la operación necesaria. Figura 68.

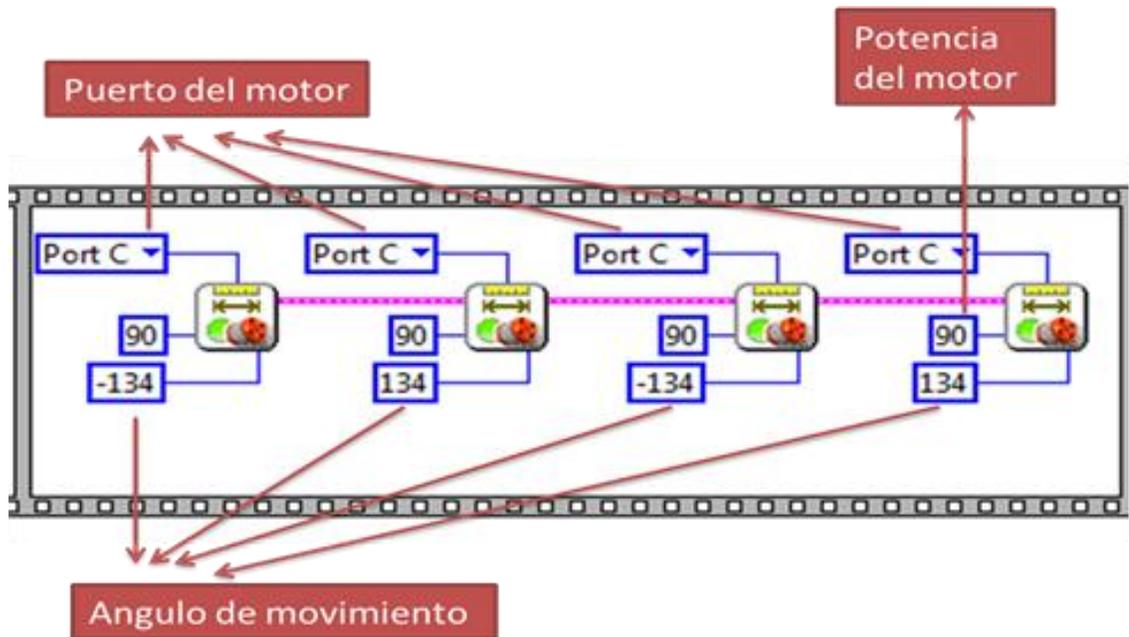
Figura 68 Programación del sensor de la banda transportadora de tapas



### 9.3 Programación del pistón de tapado.

En la Figura 69 se observa la programación del pistón en donde lo que se hace es mover el motor ubicado en el puerto C y darle un valor determinado de ángulo de giro tanto positivo como negativo, para q el pistón realice un movimiento vertical, este movimiento se hace dos veces para garantizar el tapado de la botella, además en la figura se observa que la potencia del motor también fue modificada para lograr un tapado confiable.

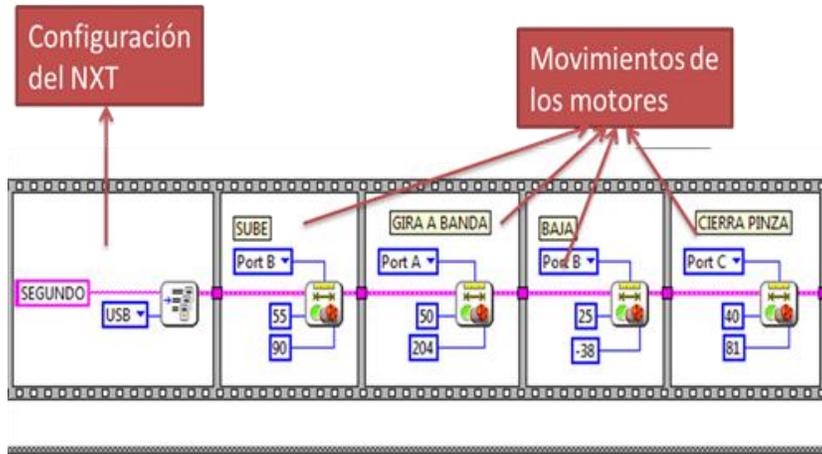
Figura 69 Programación del pistón de tapado.



#### 9.4 Programación del brazo robótico

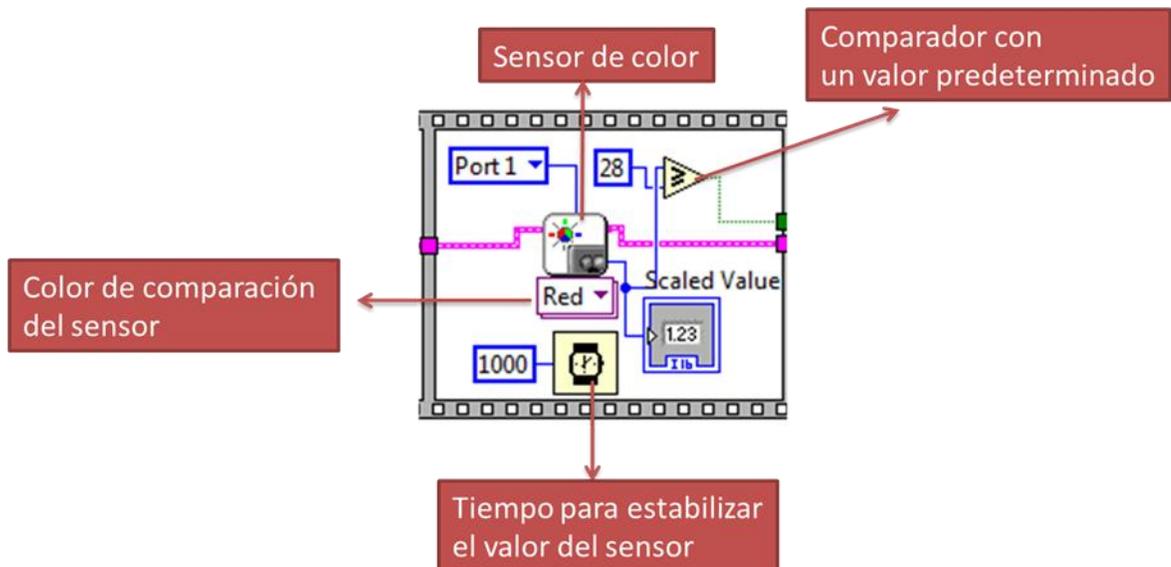
Como el brazo robótico fue construido con otro NXT hay que realizar la configuración de un nuevo NXT con conexión USB como se hizo anteriormente, después de la configuración del nuevo NXT, se realizaron instrucciones de movimiento de los motores variando su ángulo de giro, dirección y su potencia para adquirir el movimiento necesario para el proceso de selección de las botellas Figura 70

Figura 70 Programación del brazo robótico



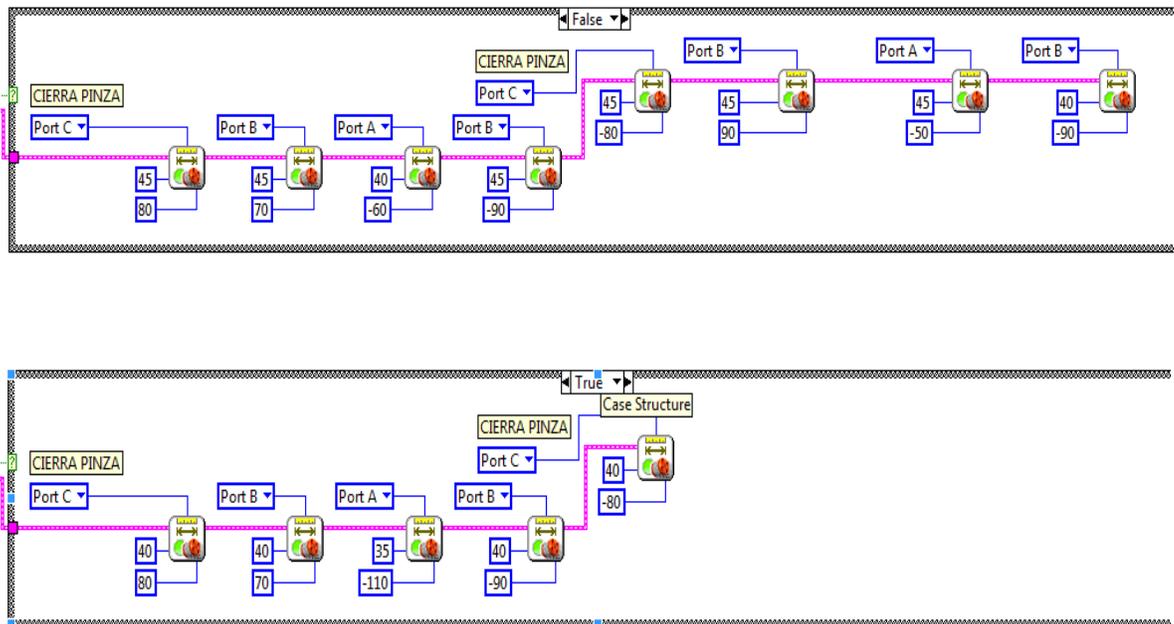
Después de realizar los movimientos necesarios con los motores para que el brazo robótico siga la rutina específica programada, se realiza la pregunta con el valor del sensor RGB para ver a qué posición debe ser llevada la botella, el sensor es comparado con un valor predeterminado y se contrasta contra el valor que el sensor genera con el color rojo, ya que el sensor puede tomar cualquiera de estos colores (rojo verde y azul), la salida del comparador es un dato booleano así que después de la pregunta el brazo toma cualquiera de las dos rutas de acción dependiendo de del color que vea el sensor. Figura 71

Figura 71 Configuración del sensor RGB



En la Figura 72 se muestra los dos posibles tipos de movimientos que puede realizar el brazo robótico después de saber de q color es la botella así llevando a cabo el proceso de selección. Esto lo decide el comparador booleano que muestra la Figura 71

Figura 72 Las dos rutas posibles del brazo robótico



## 9.5 Almacenamiento de los datos

El almacenamiento de los datos se realizó en Excel, con la rutina que se muestra en la Figura 73 se envían los datos tomados en el menú Inventarios-Tiempos a un reporte en Excel para su posterior análisis.

Figura 73 Reporte de datos en Excel

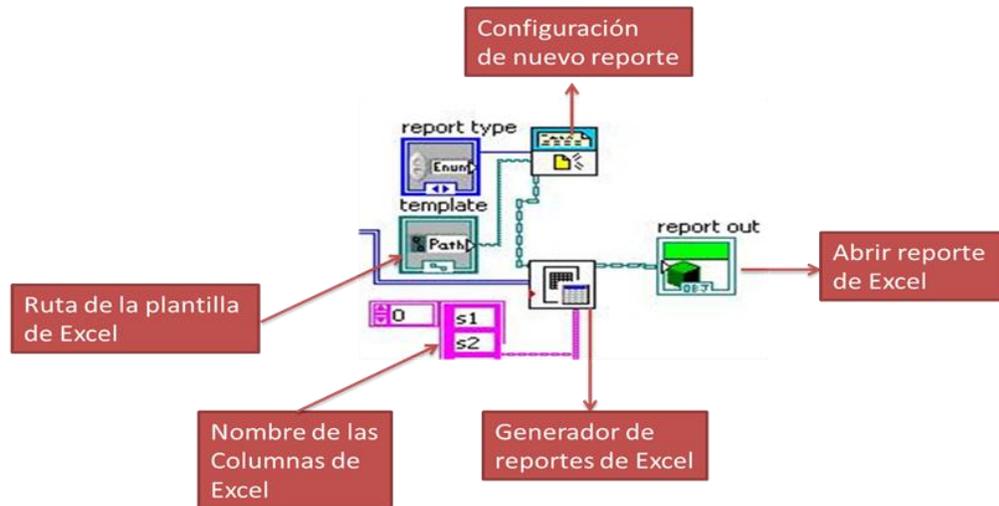
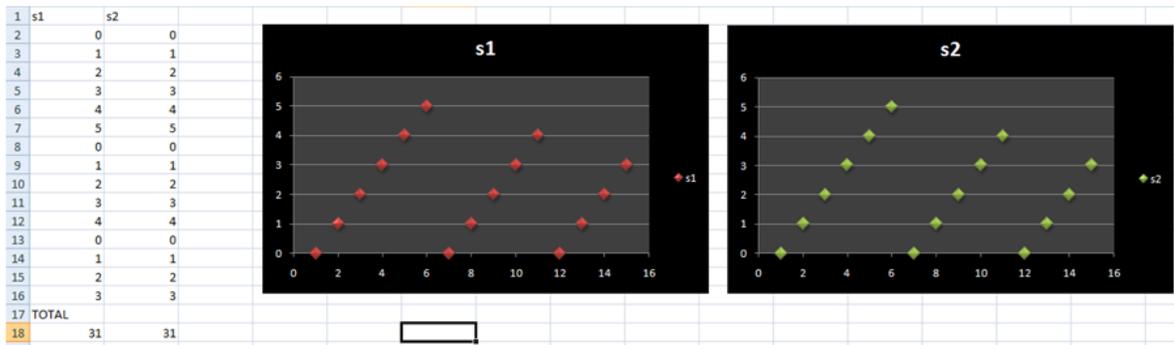


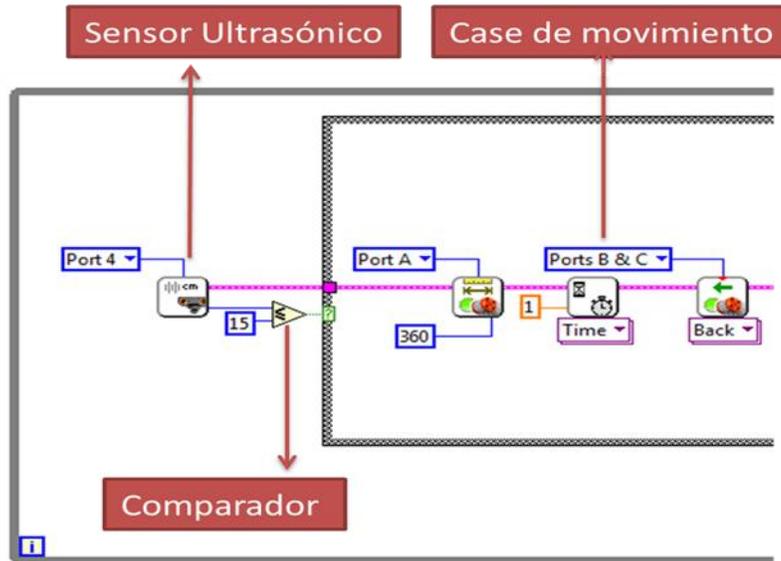
Figura 74. Tabla Excel



## 9.6 Programación de los montacargas

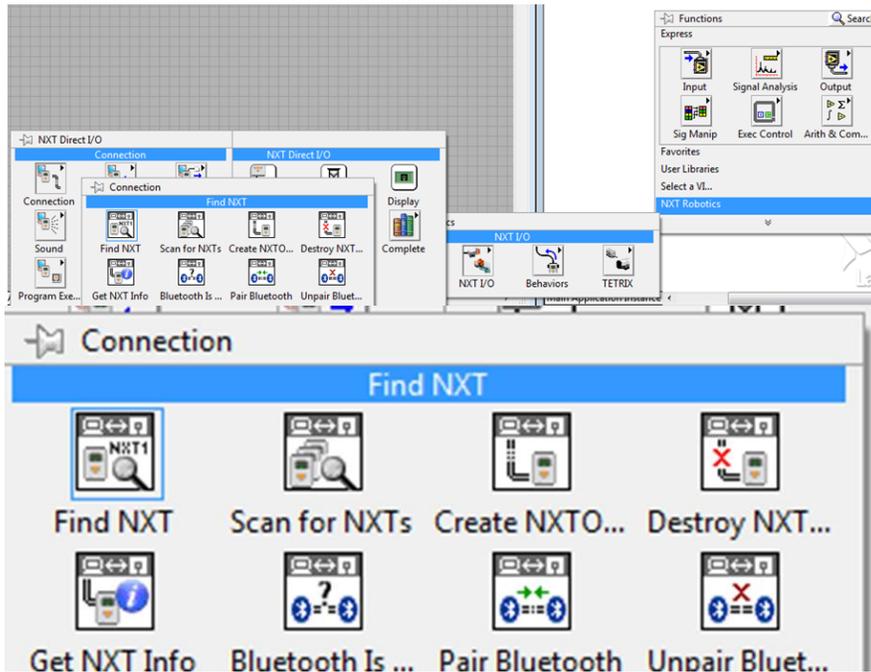
Los montacargas son los encargados de la distribución del producto hacia la estantería, el sensor Ultrasónico es el encargado de darle inicio al funcionamiento del montacargas ya que se compara si el valor que arroja el sensor es menor o igual a 15 cm, el comparador nos entrega un dato booleano (1 ó 0) que se encarga de controlar un case. Figura 75. Si es uno se activa el motor de la pinza del montacargas, un segundo después activa los motores que le dan movimiento al vehículo y por medio de instrucciones de movimiento de los motores el producto es llevado a la estantería, y regresa nuevamente a su posición de arranque para repetir el proceso, si es 0 el montacargas permanece quieto en su posición de inicio.

Figura 75. Programación del montacargas



Para el montacargas manejado a control remoto se hace necesario utilizar las herramientas que se muestran en la Figura 76 para la conexión y reconocimiento del dispositivo Bluetooth.

Figura 76. Herramientas utilizadas para la conexión Bluetooth



Después de conectados los dos legos entre si cargan los programa de cada uno en los NXT por separado.

## 10 CONCLUSIONES

- La plataforma LEGO MINDSTORM permite diseñar y construir diferentes tipos de estructuras para simular el comportamiento de procesos industriales. En este proyecto se implementó por medio de esta herramienta una planta embotelladora que consta de tres procesos: distribución de materia prima, ensamble y almacenamiento con una distribución por producto de acuerdo con los requerimientos del proceso, para los cuales este se debe ejecutar de forma secuencial.
- Por medio del software de programación LabVIEW se realizó el control lógico de cada uno de los procesos asociados a la planta embotelladora, adicionalmente se creó una interface de usuario que le permite al operario (docente o estudiante) el manejo transparente de cada uno de los dispositivos que conforman la Planta Embotelladora a través de reportes que pueden ser analizados posteriormente en Excel.
- Se desarrollaron guías de armado de la planta embotelladora para que sean implementadas en laboratorios de las distintas areas como Localización y distribución de planta, Planeación y control de la producción y Logística de distribución al igual que en áreas relacionadas con la automatización de procesos en ingeniería industrial e ingeniería electrónica y una interface de usuario para la construcción y manejo de la planta embotelladora, útiles para el cumplimiento de los objetivos del contenido educativo de las materias.

## 11 BIBLIOGRAFIA

- Ballou, Ronald H. Administración de la Cadena de Suministros. 5ª. ed. Otros factores que afectan el tiempo de procesamiento del pedido. México: Pearson Education, 2004. pp. 145 – 146.
- Barnes, Raph M. “Estudio de movimientos y tiempos” Quinta edición.
- Benjamin, Nivel. Freivalds, Andris. Ingeniería Industrial: Métodos, estándares y Diseño del Trabajo. Decima Edición. Alfa Omega [pag. 340].
- Meyers, Fred. Estudio de métodos y tiempos para la manufactura. Segunda edición.
- Shannon, Robert; Johannes, James D. (1976). «Systems simulation: the art and science». *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 6(10). pp. 723-724.
- Sippper, Daniel; Bulfin, Robert L. Planeación y Control de la Producción. México: McGraw-Hill, c1998. pp. 145 – 205.
- NIEVES MOLINA, G. Estudio de las posibilidades didácticas en ingeniería de control del LEGO MindstormsNXT. Cartagena, 2008. Trabajo de grado (Ingeniero Industrial). Universidad Politécnica de Cartagena, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial.
- S. Moor, P. R. Piergiovanni, M. Metzger Process Control Kits: A Hardware and Software Resource., 35<sup>th</sup> ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference, October 19-22, 2005, Indianapolis, IN .
- SUARES SIERRA, Oscar. Diseño e implementación de aulas virtuales en entorno IG para control industrial en la universidad de pamplona .Bucaramanga, 2011, 8 h. Trabajo de Grado (Ingeniero Electrónico). Universidad Pontificia Bolivariana. Facultad de Ingeniería Electrónica.
- En línea <<http://www.eltiradero.net/incendio-de-plataforma-petrolera-transocean-golfo-de-mexico-2456/>> [Consulta 3-11-11].

- [En línea] <<http://www.generationrobots.com/lego-mindstorms-nxt-intelligent-brick,us,4,9841.cfm>> [Consulta 21-8-12]
- En Línea<[http://www.itscz.net/software/solidedge/se\\_fr.html](http://www.itscz.net/software/solidedge/se_fr.html) > [Consulta 3-11-11].  
  
En línea< <http://www.scielo.cl/pdf/ric/v23n2/art01.pdf>> [Consulta 13 de junio de 2012].
- [En línea] <<http://www.shop.lego.com/en-US/Ultrasonic-Sensor-9846>> [Consulta 21-8-12].
- En Línea <<http://www.physics.ubc.ca/kevinmcl~/projects/lego/APRIL/>> [Consulta 3-11-11].
- Sistema de bibliotecas. SOFTWARE DE SIMULACIÓN[En Línea] <[http://www.itscz.net/software/solidedge/se\\_fr.html](http://www.itscz.net/software/solidedge/se_fr.html)> [Consulta 3-11-11].
- En línea < [http://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo\\_de\\_Montecarlo](http://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo_de_Montecarlo) /> [Consulta 13 de junio de 2012].
- En línea < [http://es.wikipedia.org/wiki/Simulaci%C3%B3n\\_por\\_computadora](http://es.wikipedia.org/wiki/Simulaci%C3%B3n_por_computadora) /> [Consulta 13 de junio de 2012].

