

**TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**  
**Escuela de Ingeniería Electrónica**



**Modernización báscula cascarilla de arroz para controlar el rendimiento  
peso/tiempo utilizando combustible alternativo en la Plata CEMEX Colorado  
Abangares.**

**Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en  
Electrónica con el grado académico de Licenciatura.**

Luis Yeri Suárez Cruz  
Carné: 200600784

**Cartago, 2013**

**INSTITUTO TECNOLOGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRONICA**

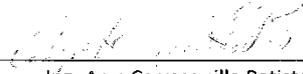
**PROYECTO DE GRADUACIÓN**

**TRIBUNAL EVALUADOR**

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

**Miembros del Tribunal**

  
\_\_\_\_\_  
Ing. Eduardo Interiano Salguero  
Profesor asesor

  
\_\_\_\_\_  
Ing. Arys Carrasquilla Batista  
Profesor lector

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica

Cartago, 27 de Junio del 2013

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, 27 de Junio del 2013

: 6 360 444

Luis Yeri Suárez Cruz

Céd: 6-0360-0444

## **Resumen**

La planta de CEMEX Colorado de Abangares, es una de la principales promotoras en la producción de cemento del país, además de ser una empresa internacional fundada en México en el año 1906, tiene relaciones con más de 100 países a nivel mundial.

Debido a la aprobación del Proyecto NEEDS National Economic, Environment and Development Study for Climate Change (Opciones de Mitigación de Emisiones de Gases de Efecto invernadero en Costa Rica: Hacia la Carbono Neutralidad en el 2021), CEMEX se ve obligado a emplear sistema de coprocesamiento de combustibles fósiles alternativos más efectivos y seguro del país, tanto en tecnología como en protección del ambiente.

Actualmente la planta cuenta con un sistema de dosificación, pero no cumple con la precisión y el rendimiento de producción a la cual tiene que trabajar.

Por ello se propone el proyecto de modernización de la báscula de cascarilla de arroz en dicha planta, ya que es la única que no se ha actualizado su sistema de control de dosificación, para que pueda trabajar entre 1 a 10 t/h según especificaciones de la planta. Cabe mencionar que el control a modernizar es un sistema secundario, que debe estar enfocado en seguir el rendimiento de entrada establecido por el operario de sala.

Se debe realizar la investigación necesaria de los modos de conexión de los equipos a utilizar, celda de pesaje, tacómetro, motor AC, INTECONT PLUS, PowerFLex70, Multidos, PLC. Además la comunicación entre los dispositivos es por medio de DeviceNet.

**Palabras clave:** PLC, INTECONT PLUS, dosificación, DeviceNet.

## **Abstract**

CEMEX plant Abangares Colorado is one of the leading developers in the country's cement production, as well as being an international company founded in Mexico in 1906, has relationships with more than 100 countries worldwide.

Due to the adoption of the Draft National Economic NEEDS, Environment and Development Study for Climate Change (Emissions Mitigation Options of Greenhouse gases in Costa Rica: Towards Carbon Neutrality in 2021), CEMEX is forced to employ co-processing system fossil fuels more effective and safe alternative in the country, both in technology and in environmental protection.

Currently the plant has a metering system, but does not meet the accuracy and performance of production which has to work.

We therefore propose the modernization project of the scale of rice husk in that silver because it is the only one not now dosing control system, so you can work between 1 a 10 t/h according to specifications plant. It is noteworthy that the control is a secondary system upgrade, which should be focused on track performance input specified by the operator room.

They must perform the research necessary connection modes of equipment to use, load cell, tachometer, AC motor, INTECONT PLUS, PowerFlex70, MULTIDOS, PLC. Furthermore, communication between devices is via DeviceNet.

**Keywords:** PLC, INTECONT PLUS, dosage, DeviceNet.

## **Dedicatoria**

A mis padres y hermana, por siempre estar a mi lado, en todos los momentos adversos de mi vida, a ellos, por ser la inspiración de motivación día con día, a ellos, por mostrarme el valor de una familia y por reglarme todo su amor.

Gracias, por todo se la dedico a ustedes.

## **Agradecimiento**

Al más importante, a Dios, por brindarme su fortaleza de nunca rendirme, por orientarme en el transcurso de mi vida y por enseñarme que lo que cuesta es lo que más se disfruta.

A mis padres y hermana, por su confianza, su paciencia y por todos los esfuerzos brindados.

En especial a la familia Chavarría Zamora, por brindar toda su ayuda cuando la he necesitado.

A Suancy, por ser parte de mi vida.

A la gente de CEMEX Colorado, Abangares Costa Rica, por brindarme la oportunidad de desarrollar el proyecto, y superarme como profesional. Gracias a mi profesor asesor el Ingeniero Eduardo Interiano Salguero, a todos los que conforman el parte del Departamento de Instrumentación Eléctrico, en especial al Supervisor Rafael Martin Alpizar Loria.

## INDICE GENERAL

Capítulo 1: Introducción.....	13
1.1    Problemas existentes e importantes de solución .....	13
1.2    Solución seleccionada.....	14
Capítulo 2: Metas y objetivos.....	16
2.1    Meta.....	16
2.2    Objetivo general .....	16
2.3    Objetivos específicos .....	16
Capítulo 3: Marco Teórico .....	17
3.1    Descripción del sistema o proceso a mejorar .....	17
3.2    Antecedentes Bibliográficos .....	18
3.2.1    Dosificador .....	18
3.2.2    Básculas dosificadoras de cinta y célula de pesaje. ....	19
3.2.3    INTECONT PLUS .....	21
3.2.4    Variador de frecuencia Power Flex 70 .....	24
3.2.5    Motor de inducción .....	26
3.2.6    Descripción del PLC SLC 500 de Allen Bradley .....	30
3.3    Descripción de los principios físicos y/o eléctricos relacionados con la solución del problema .....	32
3.3.1    Especificaciones en el dominio del tiempo para una señal escalón.....	32
Capítulo 4: Procedimiento y metodología.....	35
4.1    Reconocimiento y definición del problema .....	35
4.2    Obtención y análisis de información .....	35
4.3    Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución .....	36
4.4    Implementación de la solución.....	36
Capítulo 5: Descripción detallada de la solución (Explicación del diseño).....	39
5.1    Análisis de soluciones y selección final.....	39
5.2    Descripción de hardware.....	39
5.3    Descripción del software .....	41
Capítulo 6: Análisis de Resultados.....	46
6.1    Resultados .....	46
6.1.1    Características del Motor de Inducción .....	46
6.1.2    Circuito Equivalente del motor.....	46
6.1.2.1    Prueba de resistencia en corriente directa .....	46
6.1.2.2    Prueba en vacío .....	46
6.1.2.3    Prueba de rotor bloqueado .....	47
6.1.3    Curva del Par –Velocidad del motor .....	47
6.1.4    Función de transferencia en velocidad de un motor inducción.....	48

6.1.5	Variables de la función de transferencia .....	49
6.1.6	Control en velocidad.....	50
6.1.6.1	Análisis en lazo abierto .....	51
6.1.6.2	Análisis en lazo cerrado .....	52
6.1.7	Diseño del sistema de control en Matlab. ....	56
6.1.7.1	Método de ubicación de polos .....	56
6.1.7.2	Parámetros de un controlador PI por ubicación de polos .....	56
6.1.7.3	Sistema de control PI a implementar .....	58
6.1.8	Instalación de los dispositivos .....	58
6.1.9	Interfaz Gráfica .....	63
6.2	Análisis .....	64
Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones .....		66
7.1	Conclusiones.....	66
7.2	Recomendaciones .....	66
Bibliografía .....		67
Anexos.....		69
Anexo A.1 .....		69
A.4	Información sobre la planta .....	69
A.4.1	Descripción de la empresa .....	69
A.4.2	Descripción del departamento de Instrumentación Eléctrica. ....	69
Anexo B.1 .....		69

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b>	Diagrama de bloques representativo al sistema.....	15
<b>Figura 3.1</b>	Diagrama general del sistema por controlar.....	18
<b>Figura 3.2</b>	Dosificador por gravedad.....	19
<b>Figura 3.3</b>	Partes de la báscula dosificadora .....	20
<b>Figura 3.4</b>	Estructura y función de la pieza de pesaje.....	20
<b>Figura 3.5</b>	Rodillo medidor y muñón.....	21
<b>Figura 3.6</b>	INTECONT PLUS marca SCHENCK.....	22
<b>Figura 3.7</b>	Esquema de funcionamiento muestra todas las I/O.....	23
<b>Figura 3.8</b>	Variador de frecuencia PowerFlex70.....	25
<b>Figura 3.9</b>	Conexión típica a tierra.....	26
<b>Figura 3.10</b>	Vista interior de un motor de inducción.....	26
<b>Figura 3.11</b>	Circuito Equivalente por fase de un motor de inducción.....	29
<b>Figura 3.12</b>	Función de transferencia para motor de inducción.....	30
<b>Figura 3.13</b>	Respuesta típica de un sistema de control ante una entrada escalón unitario.....	34
<b>Figura 3.14</b>	Sistema de control prototipo de segundo orden.....	34
<b>Figura 4.1</b>	Diagrama de bloques del sistema de control a diseñar (Matlab).....	38
<b>Figura 5.1</b>	Carga del material a granel (Multidos).....	40
<b>Figura 5.2</b>	Diagrama de conexión de equipos en general.....	41
<b>Figura 5.3</b>	Pantalla principal del RSLogix 500.....	42
<b>Figura 5.4</b>	Pantalla principal del RSLinx, configurado para la comunicación entre la PC y el PLC.....	43
<b>Figura 5.5</b>	Presentación de los parámetros en la pantalla del HIM.....	44
<b>Figura 6.1</b>	Circuito equivalente motor de inducción.....	47
<b>Figura 6.2</b>	Curva Par vs Velocidad del motor.....	48
<b>Figura 6.3</b>	Respuesta a lazo abierto antes entrada escalón.....	50
<b>Figura 6.4</b>	Esquema en lazo abierto ante entrada escalón.....	51

<b>Figura 6.5</b>	Respuesta a lazo abierto ante entrada escalón.....	52
<b>Figura 6.6</b>	Esquema en lazo cerrado ante entrada escalón.....	53
<b>Figura 6.7</b>	Respuesta a lazo cerrado ante entrada escalón.....	54
<b>Figura 6.8</b>	Error estado estacionario a lazo cerrado.....	55
<b>Figura 6.9</b>	Diagrama de bloques de sistema.....	56
<b>Figura 6.10</b>	Boquilla de salida Tolva báscula de cascarilla de arroz.....	59
<b>Figura 6.11</b>	Servomotor de accionamiento de la cinta.....	59
<b>Figura 6.12</b>	Rodillo de pesaje.....	60
<b>Figura 6.13</b>	Panel de control de la báscula en el cuarto de control.....	61
<b>Figura 6.14</b>	INTECONT PLUS en el panel de control.....	61
<b>Figura 6.15</b>	Vista interna del panel de control instalado.....	62
<b>Figura 6.16</b>	Conexión de entradas y salidas del INTCONT PLUS.....	63
<b>Figura 6.17</b>	Interfaz gráfica de la báscula dosificadora en la sala de control.....	63

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 5.1</b>	Descripción de la instrucciones más comunes de RSLogix 500.....	42
<b>Tabla 5.2</b>	Algunos parámetros programados en el variador.....	44
<b>Tabla 6.1</b>	Valores nominales del motor Sew Vietnam $\frac{3}{4}$ HP.....	46
<b>Tabla 6.2</b>	Valores obtenidos de prueba en vacío.....	46
<b>Tabla 6.3</b>	Valores obtenidos de prueba en rotor bloqueado.....	47
<b>Tabla 6.4</b>	Variables de la función de transferencia.....	49

## **Capítulo 1: Introducción**

Se pretende en este capítulo, explicar o justificar el proyecto especificando aspectos como el origen del problema a resolver y la importancia de la solución a implementar. Por otra parte, se hará breve referencia, a la temática utilizada para la solución del problema.

### **1.1 Problemas existentes e importantes de solución**

Con la aprobación del Proyecto NEEDS National Economic, Environment and Development Study for Climate Change (Opciones de Mitigación de Emisiones de Gases de Efecto invernadero en Costa Rica: Hacia la Carbono Neutralidad en el 2021), debido a esto, CEMEX emplea el sistema de coprocesamiento de combustibles alternativos más efectivo y seguro del país, tanto en tecnología como en protección del ambiente.

Este programa es una iniciativa de aumentar el uso de residuos biomásicos, generados principalmente en la provincia de Guanacaste, con el fin, de la sustitución de fuentes energéticas tradicionales por alternativas de carácter renovable. Esto debido al problema de la contaminación por derivados del petróleo como los aceites, hidrocarburos, plásticos, telas, cauchos y otros, puede minimizarse a través de sistemas de combustión completa, de alta tecnología y control.

Dicho sistema de coprocesamiento está instalado en la planta de Colorado de Abangares, con el propósito de reducir las emisiones antropogénicas de CO<sub>2</sub> en el proceso de la fabricación de cemento a través de la sustitución parcial de combustibles fósiles por combustibles alternativos de biomasa como son los subproductos agrícolas (cascarilla de arroz), residuos de aserrín y de maíz. La sustitución parcial de los combustibles fósiles utilizados en el horno del clinker por los combustibles alternos resultará en reducción significativa de las emisiones de CO<sub>2</sub> por la combustión de combustibles fósiles.

Para lograr el desarrollo de la actividad del proyecto de sustitución parcial de combustibles fósiles por combustibles alternos de biomasa en la producción de la plata de cemento, se debe construir un sistema completo de recepción, almacenamiento y alimentación para los combustibles alternos.

Actualmente la planta de Colorado de Abangares ya cuenta con una báscula dosificadora la cual no mide con precisión el caudal masivo de la cascarilla de arroz. En la mayoría de los casos la báscula cuenta con una compuerta mecánica integrada ajusta la altura de capa dependiendo de su tamaño, la regulación del caudal se

obtiene variando la velocidad de la cinta. En algunos casos la velocidad de la cinta transportadora se mantiene constante con respecto al caudal controlado por medio de un sistema de pesaje, el cual está formado por un dispositivo de detención de la carga y de velocidad, integración/control, y transporte mecánico. Basándose en las señales de carga y velocidad de la banda, el integrador eléctrico mide el aumento gradual del peso/tiempo y posteriormente calcula el caudal. El valor obtenido de caudal se compara con el caudal nominal. El ajuste de la velocidad de la cinta transportadora se obtiene con el controlador integrador PID.

Pero esta báscula presenta un problema, está diseñada para medir pesos de 7 a 70 toneladas de materiales como caliza y arcilla entre otros, la empresa como tal, ha tratado de modificar el control existente de la báscula pero no se alcanzó el ajuste necesario de operación deseado. Por lo que no existe un control eficiente y eficaz del caudal que se transporta al calcinador. Debido a que el peso promedio requerido de trabajo de la tolva debe estar entre 1 a 10 toneladas por hora, por lo que el sistema actual presenta un déficit de precisión y control en el caudal de transporte. Surge la necesidad de diseñar un nuevo sistema de control nuevo que se ajuste a las condiciones de producción.

## **1.2 Solución seleccionada**

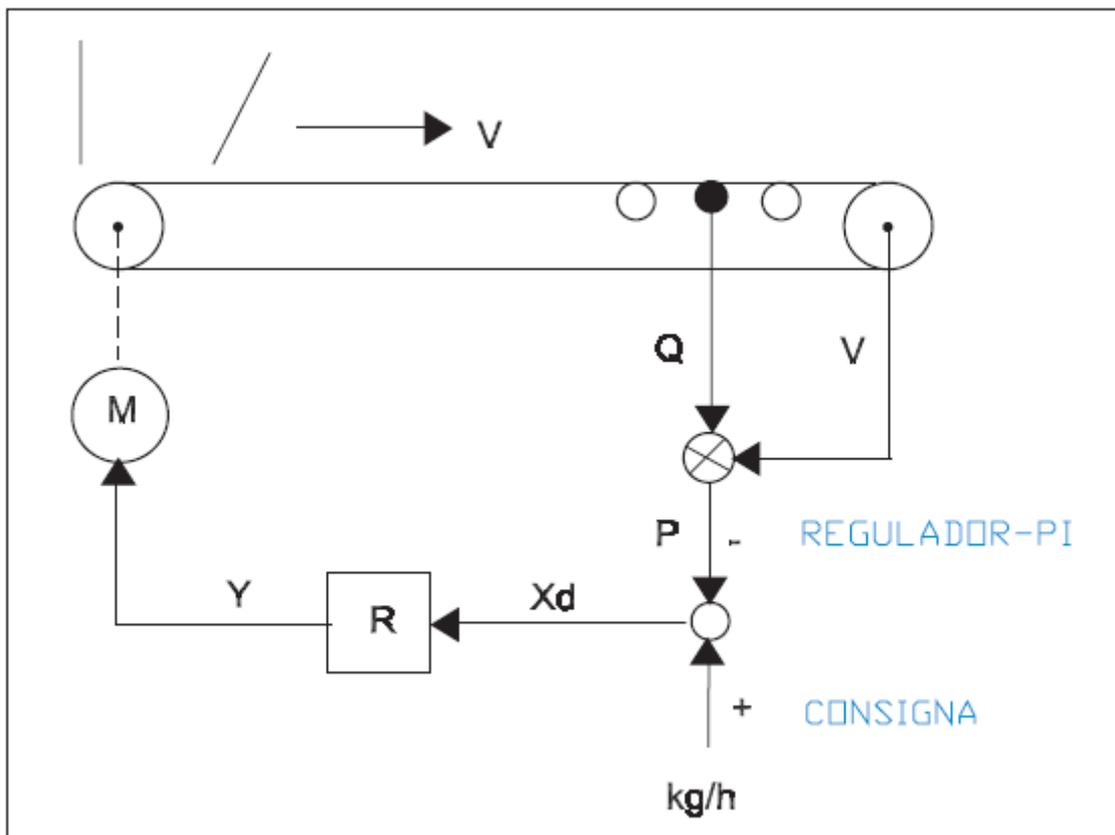
Dentro de las restricciones del proyecto, la plata de CEMEX requiere que el rendimiento de trabajo este comprendido entre 1 a 10 ton/h. Ya que el sistema actual de báscula dosificadora no trabaja correctamente en este rango de operación, por otra parte, debido a las políticas económicas de la empresa, la plata ya tiene en mano el equipo necesario para montar dicho sistema de dosificación, por lo cual se llevara a cabo según condiciones de la empresa.

Lo que se pretende es desarrollar un sistema de control para la modernización automática de la báscula dosificadora de cascarilla de arroz en la plata CEMEX, para lo que hace necesario realizar un modelo del sistema, ya que se analizaran las características que deben satisfacer la banda transportadora de cinta, el sistema de accionamiento de la cinta, la comunicación entre dispositivos, entre otros; así como establecer todos los parámetros que influyen en dicho sistema para orientar el diseño del control automático electrónico, recurriendo al equipo existente en la plata y la utilización de un PLC como elemento de enlace entre el operario y el sistema a implementar, el cual se describirá con mayor detenimiento en el capítulo 5 de este informe.

Como se puede observar en la figura 1.1, se representa el diagrama de bloques del sistema que se pretende modernizar. Además, se visualiza la implementación de dos

sensores, un tacómetro para medir la velocidad de la cinta transportadora y un celda de pesaje encargada de medir el peso del material transportado. Por otra parte para accionar la cinta transportadora se utilizará un motor AC trifásico de inducción.

En otras palabras el sistema tiene como función seguir consigna de entrada a la cual se requiere trabajar el rendimiento de la báscula. Para ello se utilizará un PLC y un INTECONT PLUS; además de un variador de frecuencia que controlara la velocidad del motor. Se deberá diseñar un controlador PI capaz de manejar la diferencia del rendimiento actual y el rendimiento consigna, junto a esto se deberá establecer una comunicación entre los equipos, debido a que todos los datos son manejados en la sala de operación de la empresa.



**Figura 1.1** Diagrama de bloques representativo al sistema a controlar.

## **Capítulo 2: Metas y objetivos**

### **2.1 Meta**

Brindar a la empresa CEMEX Colorado de Abangares un sistema de control de la báscula dosificadora cascarilla de arroz con el fin de obtener la relación del rendimiento para utilizarse como combustible alternativo.

### **2.2 Objetivo general**

Elaborar un sistema de control de una báscula dosificadora cinta que permita controlar el rendimiento peso/tiempo con la mayor precisión posible y dentro del rango de peso establecido.

### **2.3 Objetivos específicos**

- Diseñar el sistema de control de la báscula para manejar la relación peso/tiempo del caudal de transporte al calcinador.
- Elaborar una investigación de equipos existentes para controlar la velocidad de la cinta transportadora según especificaciones de la empresa.
- Implementar la comunicación entre el sistema de control para visualización de los datos obtenidos.

## **Capítulo 3: Marco Teórico**

En esta sección se hace una descripción general del sistema de control, además se presentara la teoría en la cual se fomentó la propuesta de solución del problema; por otra parte, se explicaran los conceptos y las relaciones matemáticas que se implementaron en el diseño del sistema.

### **3.1 Descripción del sistema o proceso a mejorar**

Para solventar la falta de precisión del sistema actual de la báscula dosificadora de cascarilla, se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones: como la densidad aparente de la cascarilla de arroz, el grosor de la cinta, la ubicación y escogencia de las celdas de carga. El área transversal de la boquilla de salida de la tolva, es un parámetro muy importante que hay que tomar en cuenta al momento del diseño de sistema de control.

En la figura 3.1 se puede observar las diferentes partes del sistema por controlar, como los sensores de velocidad y peso de la báscula, un motor AC trifásico de inducción, INTECONT PLUS que es un dispositivo de medición y evaluación para basculas dosificadoras de cinta de transportes, un regulador PI que se implementara con un PLC Allen Bradley orientado a seguir el punto de consigna deseado según el operario de sala, un variador de frecuencia ajustable de CA (PowerFlex 70) que tiene como fin controlar la velocidad del motor de inducción según le especifique del regulador PI, además de algunos circuitos de acondicionamiento de señales; convertidores de A/D y viceversa, entre otros.

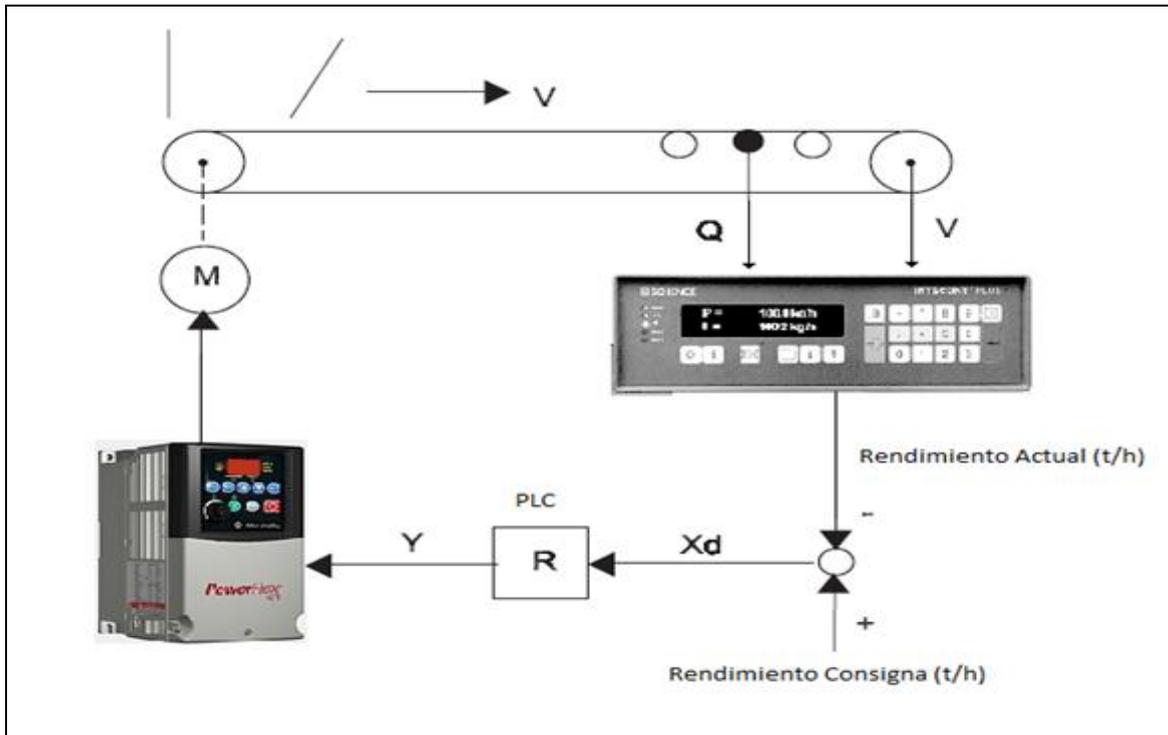


Figura 3.1 Diagrama general del sistema por controlar.

### 3.2 Antecedentes Bibliográficos

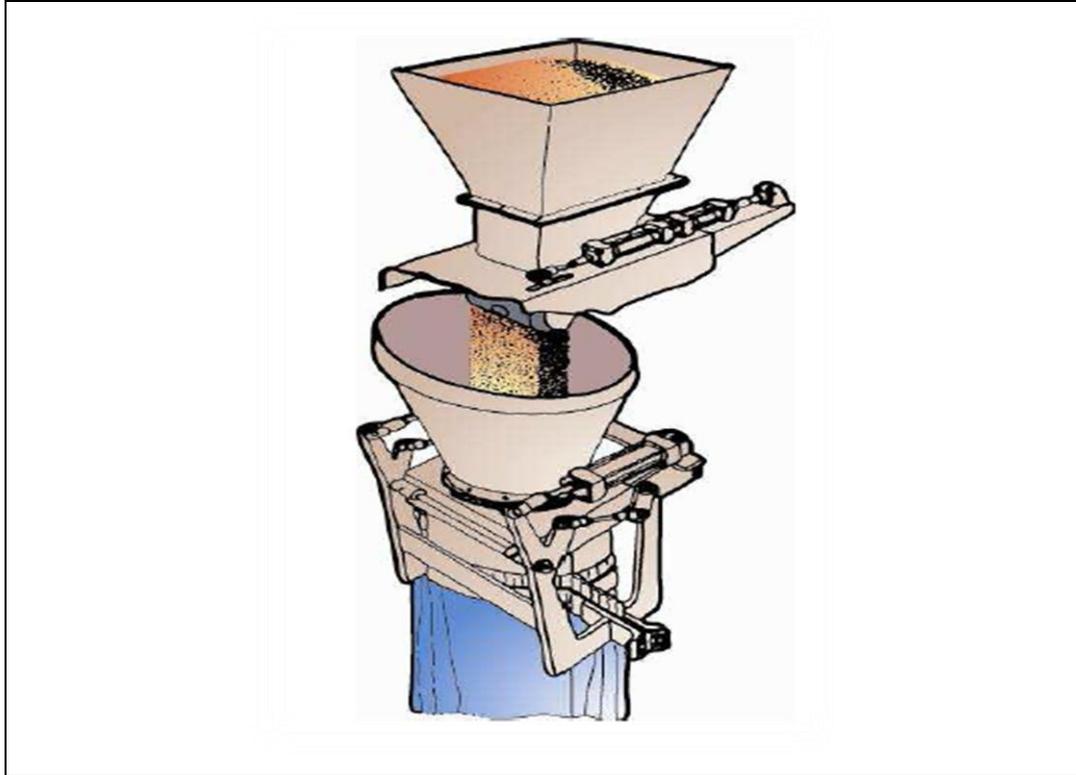
En esta sección se presentaran el estado del arte investigativo, donde se pretende conocer las diferentes partes del proyecto a implementar, así como su funcionamiento y lo que actualmente ofrece el mercado en tecnología, para buscar la mejor solución del problema a resolver. Además hay que tomar en cuenta que este proyecto consta de dos partes, una investigativa que se enfoca en teoría de control automático actual y la otra, la cual es la que la empresa desea implementar, según la tecnología que ellos manejan (en hardware y software).

#### 3.2.1 Dosificador

La dosificación en los últimos años ha presentado un crecimiento acelerado dentro de la industria, como son: alimenticia, farmacéutica, de perfumería, química, cosméticos, entre otros; en las cuales se trata de optimizar sus procesos de dosificación. Una solución es la implementación de máquinas dosificadoras, que son una alternativa dentro del proceso de dosificación de los productos.

La función del dosificador es fraccionar de forma precisa y autónoma el producto a envasar, el dosificador por gravedad fue el que se implementó para este proyecto, el cual consiste en un tanque donde se ubicara el líquido que normalmente es alimentado por un tanque principal mediante un flotador que tiene en el interior, se

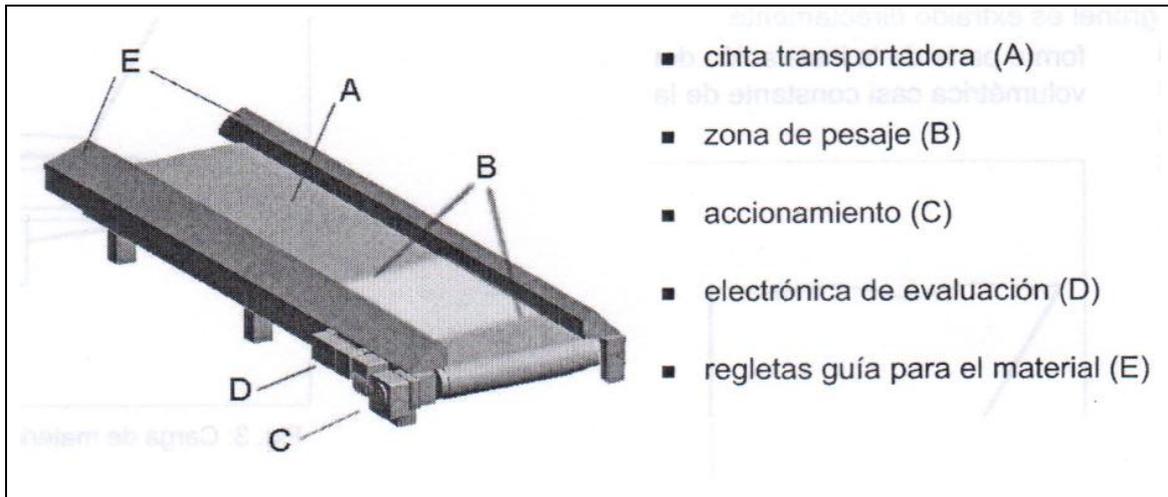
habilita o deshabilita la alimentación del mismo (Figura 3.2). En la parte inferior posee una llave de paso que es controlada por la envasadora, el cual, permite el paso del líquido en el momento preciso. Se utiliza únicamente para productos líquidos como el agua, jugos, salmuera, vinos, etc.



**Figura 3.2** Dosificador por gravedad.

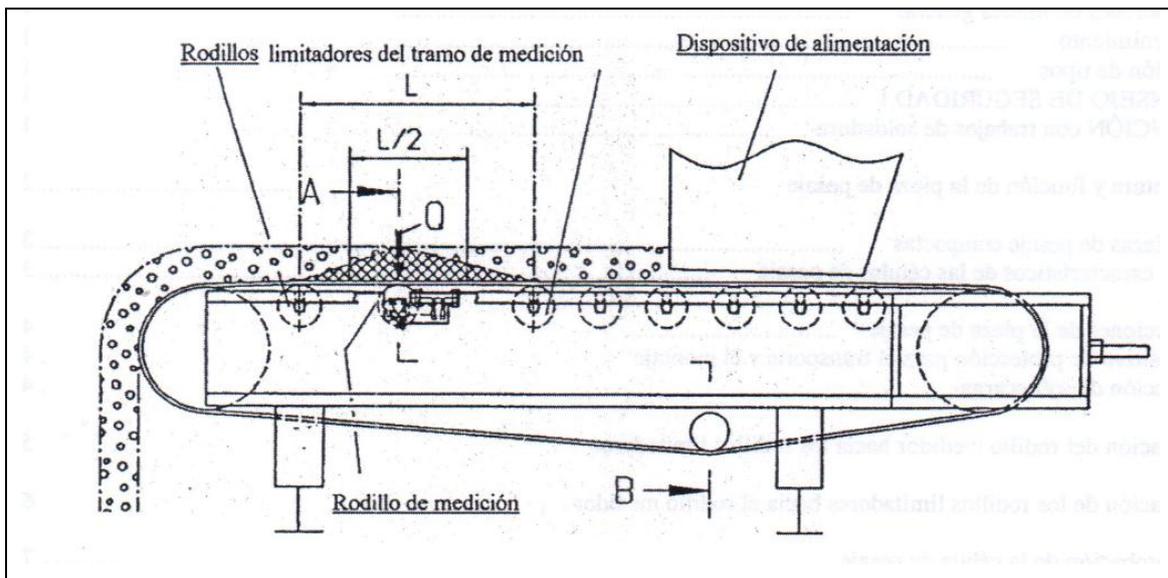
### **3.2.2 Básculas dosificadoras de cinta y célula de pesaje.**

Por otra parte, en la figura 3.3, se puede observar las diferentes partes y componentes de esta. Dichas básculas están destinadas para la dosificación gravimétrica y volumétrica de material a granel; la báscula está adaptada a las características físicas básicas del material a granel a dosificar y no es apta para cualquier material a granel o demás sustancias que difieren de las especificaciones.



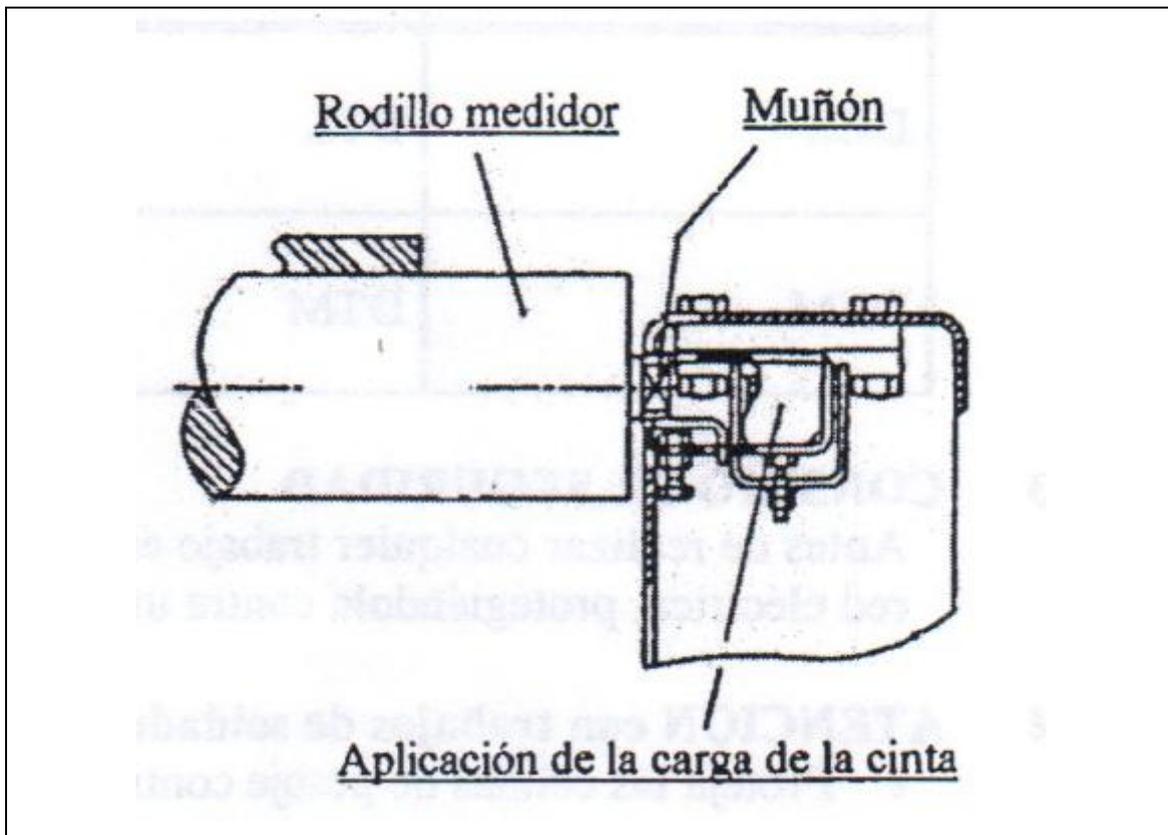
**Figura 3.3** Partes de la báscula dosificadora.

Esta celda de pesaje consta de dos piezas de pesaje compactas y el rodillo medidor. El rodillo medidor está dispuesto entre dos rodillos portadores, que con su medida de distancia "L" limita el tramo de medición. A lo largo del tramo de medición actúa el perfil de carga de la cinta con la carga de medición "Q" y L/2 sobre dos células de pesaje (ver figura 3.4).



**Figura 3.4** Estructura y función de la pieza de pesaje.

Las piezas de pesaje compactas están atornilladas a la izquierda y derecha de la báscula dosificadora. El rodillo medidor junto con su muñón son guías lateralmente en los soportes de la aplicación de la carga de medición. La carga de medición Q fluye desde los muñones, a través de las aplicaciones de medición de carga, hasta ambas células de pesaje de las piezas de pesaje compactas (ver figura 3.5).



**Figura 3.5** Rodillo medidor y muñón.

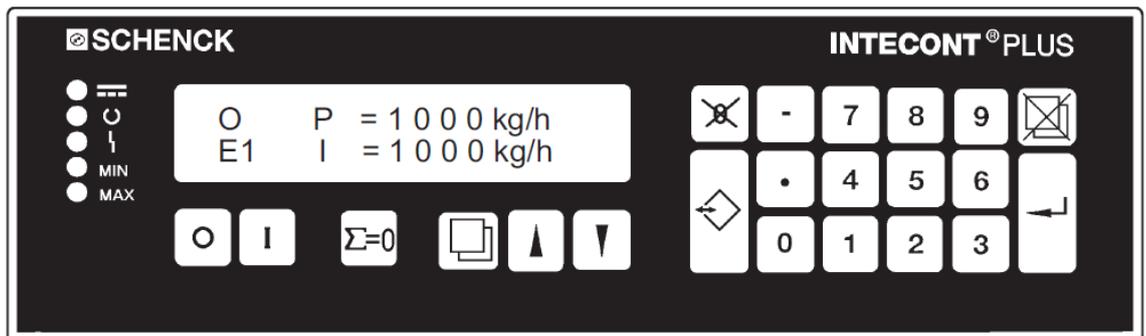
Las celdas de carga son un arreglo de galgas extensiométricas en una configuración de puente de Wheatstone (es un tipo de puente de deflexión que convierte cambios de resistencia, capacitancia e inductancia en variaciones de voltaje) montado en un elemento mecánico alterable. Al aplicarse ya sea fuerza de compresión, tracción o flexión, se generan deformaciones que son transmitidas a la galga, que responde con una variación de su propia resistencia eléctrica. La celda por tanto transforma una fuerza aplicada o peso es una variación de tensión en la salida del puente, este valor de tensión necesita ser tratado posteriormente por un circuito acondicionador amplificador. El plano de apoyo debe ser muy rígido, plano y no variar independientemente de su posición y de la carga.

### 3.2.3 INTECONT PLUS

El INTECONT PLUS es un dispositivo de medición y evaluación para basculas de cinta transportadora, aparatos de medición continua, caudalímetros, aparatos de dosificación para caudales, basculas de cinta dosificadoras y basculas dosificadoras diferenciales. Este aparato se suministra en tres versiones sin tarjeta opcional (estándar), con tarjeta opcional VFE 610V para E/S adicionales e impresoras y con tarjeta opcional para el bus de campo (VSS021V: Modbus/S5, VPB020V: Profibus y

VCB020V: DeviceNet). Este dispositivo es aplicable a sistemas reguladores con cintas transportadoras:

1. Báscula de cinta dosificadora: regulación del rendimiento a través de velocidad en la cinta.
2. Báscula de cinta con dosificador regulado: regulación del rendimiento a través de la carga de la cinta.
3. Báscula de cinta con carga constante: regulación de la carga de cinta a través de la velocidad de la cinta.



**Figura 3.6** INTECONT PLUS marca SCHENCK.

En la figura 3.6, se puede apreciar la forma del INTECONT PLUS, además cabe resaltar algunas definiciones importantes para la comprensión del funcionamiento de este aparato como lo son:

$I$  = rendimiento en kg/h o t/h. Es la cantidad de material descargado por la cinta transportadora por unidad de tiempo.

$P$  = Consigna de rendimiento en kg/h o t/h.

$Z$  = Cantidad transportada en kg o t. Es la cantidad de material transportado igual rendimiento por tiempo de transporte.

$V$  = velocidad de la cinta transportadora en m/s.

$Q$  = Carga de la cinta en kg/m. Peso del material sobre un metro de la cinta.

**Funcionamiento Gravimétrico:** el valor actual del rendimiento se regula a la consigna establecida, la consigna máxima posible es igual al rendimiento nominal; en caso de introducir valores superiores se produce un aviso de alarma.

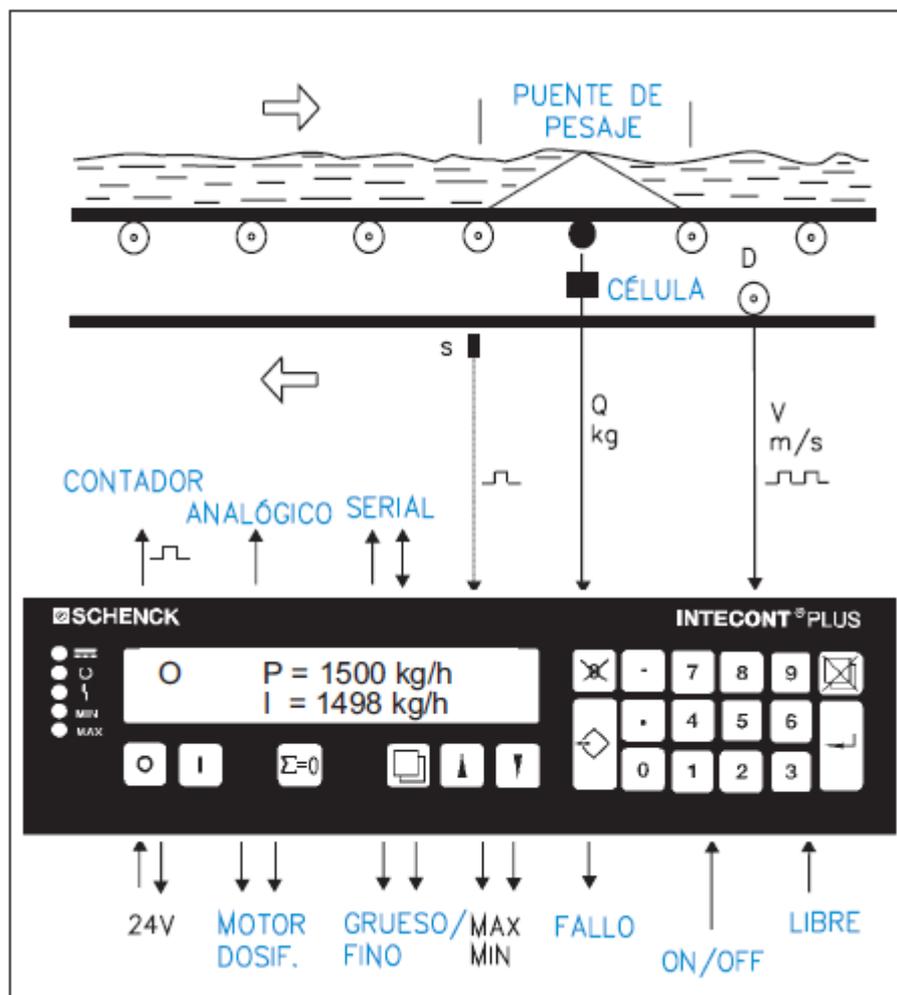
**Funcionamiento Volumétrico:** el motor de accionamiento para la cinta transportadora o el dosificador de material se regula de manera proporcional a la consigna, la carga de cinta no tiene influencia alguna. En condiciones nominales, el rendimiento coincide prácticamente con la consigna establecida, la consigna se limita al triple del rendimiento nominal, además solo es posible

activar los programas de ajuste puesta a cero, tara y vuelta de cinta en funcionamiento volumétrico.

Funcionamiento volumétrico sincrónico: Al contrario que en el funcionamiento volumétrico, para calcular la velocidad teórica actual de la cinta no se recurre a la carga nominal de cinta, sino a la carga de cinta medida antes de la conmutación, de este modo, la conmutación se produce sin sacudidas.

Además este dispositivo posee las siguientes técnicas de medición:

- Amplificador de precisión para tensión alterna con corrección continua del punto cero y rango.
- Convertidor de digital a analógico de alta resolución, mediante el procedimiento integrador se elimina con eficacia la entrada de dispersión de la tensión de red.
- Microcontrolador de 16 bits.
- Memorización ilimitada de estados de contador, definiciones de configuración de ajuste.



**Figura 3.7** Esquema de funcionamiento muestra todas las I/O.

En la figura 3.7, se visualiza el funcionamiento y se muestran todas las entradas y salidas del INTECONT PLUS, la cuales se describen como sigue:

CL= Célula de pesaje para determinar la carga de cinta Q.

D= tacogenerador.

S=Sonda de vueltas de la cinta para compensación automática de la influencia de cinta BIC (no siempre disponible).

M= Motor de accionamiento.

24 V= Alimentación de tensión.

MÍN= Salida de relé para valor límite inferior.

MAX= Salida de relé para valor límite superior.

ALARMA= Salida de relé para ALARMA.

DESV. REGUL= Salida de relé para la anomalía desviación de regulación.

ON/OFF= Conexión y desconexión.

CONFIRMA= Confirmar los avisos de acontecimientos.

CONSIGNA= Consigna analógica.

SERIAL= Impresora y ordenador central.

ON= La báscula está conectada, además se dispone de salidas para controlar la cinta y del dosificador, conexión de un contador de cantidades y para un aparato analógico de indicación.

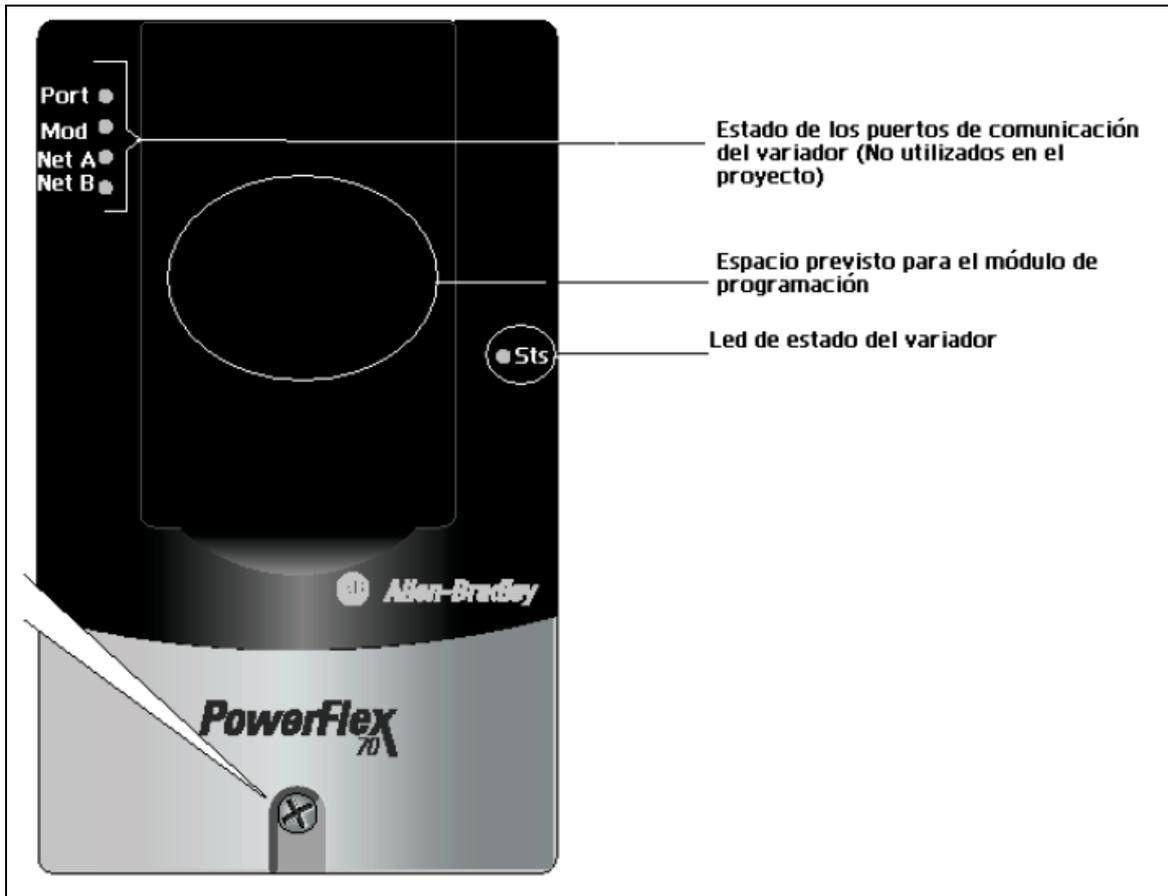
PERMISO= Permiso.

Con respecto a los ajustes no es necesario realizar alguno, lo que se debe hacer es introducir determinados datos constructivos sobre la células de pesaje, transmisor de velocidad, inclinación de la cinta transportadora, etc. A partir de estos datos, el INTECONT calcula todas las normalizaciones requeridas para las indicaciones. Hay dos tipos posibles de control o ajuste posterior:

- a) Control con material: en INTECONT se introduce el resultado de un control de material que sirve para corregir el resultado de medición.
- b) Control con pesa de prueba: Con un programa de control especial puede controlarse la normalización o también corregirse en caso de datos técnicos no conocidos con exactitud (transmisión por palanca, inclinación de la cinta transportada, etc.).

### **3.2.4 Variador de frecuencia Power Flex 70**

En la figura 3.8, se observa el variador de frecuencia PowerFlex70, en donde se especifica las diferentes partes visibles de este.



**Figura 3.8** Variador de frecuencia PowerFlex70 [3].

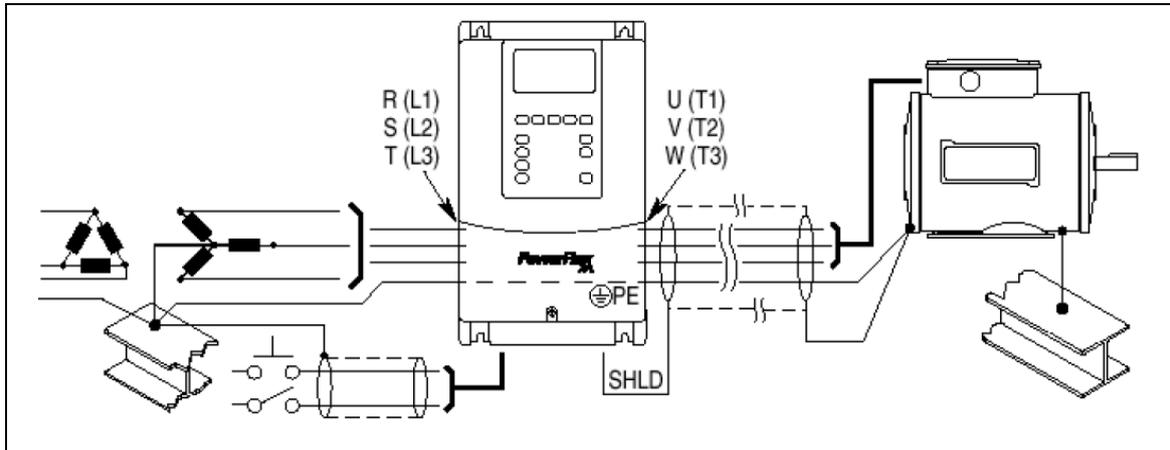
Esta familia de PowerFlex70 permite desarrollar un control flexible en aplicaciones de control de motores en rangos de baja y media tensión. Tiene diferentes redes, interfaces de operador y programación de uso común, contribuyendo a facilitar el uso de la aplicación así como agiliza la puesta en marcha del motor. Estos variadores tienen un rango de 0.37 kW (0.5 HP)-3,000 kW (4,000 HP).

Presenta una interfaz de operador, los módulos de interface de operador (HIM) PowerFlex70 de LCD muestran información sobre el variador en una pantalla de 7 líneas y 21 caracteres y son compatibles con varios idiomas. Este dispositivo además ofrece un HIM de LED opcional económico, brinda una estructura coherente de programación, ubicando parámetros idénticos en lugares idénticos; todos los variadores de la familia usan los mismos nombres y descripciones de parámetros, lo cual simplifica así el tiempo de configuración y facilitando la actualización o sustitución de los variadores en los sistemas ya implementados.

Por otra parte, cuenta con una etapa de potencia y una etapa de control, la etapa de potencia se encuentra aislada de la etapa de control y su interacción se da a través de dispositivos IGBT de altas potencias disparadas por el circuito de control a cierto ángulo. La etapa de control detecta el cruce por cero de cada una de las fases de línea

de potencia y dispara los IGBTs dependiendo de la velocidad que se desea o que haya sido programada.

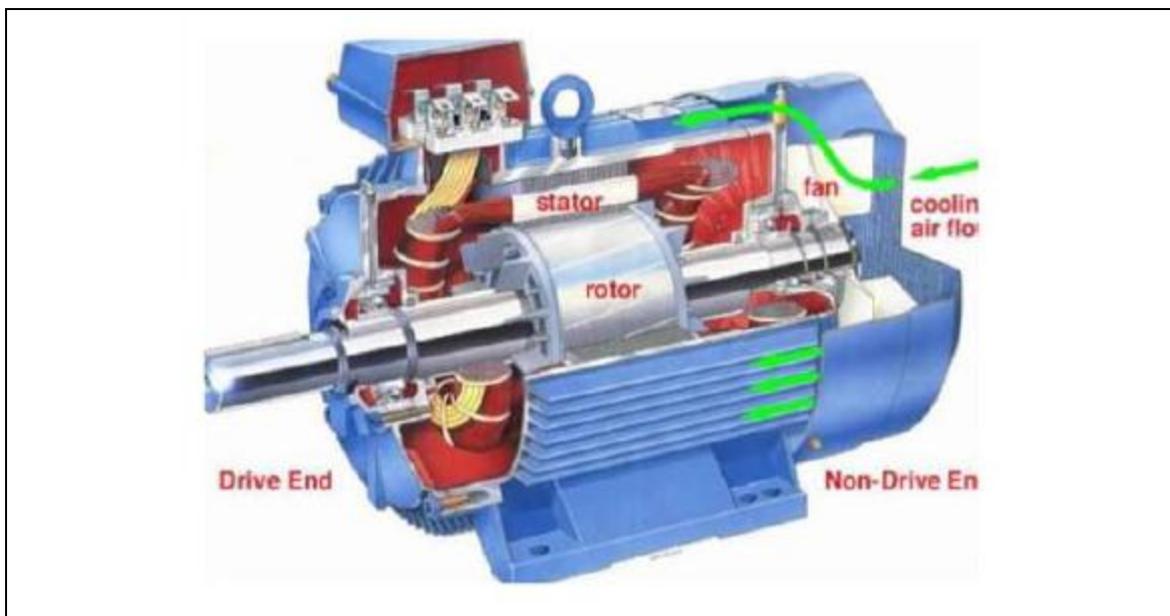
La figura 3.9 se visualiza una conexión típica a tierra del variador.



**Figura 3.9** Conexión típica a tierra [3].

### 3.2.5 Motor de inducción

El motor de inducción es uno de los más empleados en el campo industrial, debido a su simplicidad y robustez, así como a su bajo precio de producción y fácil mantenimiento. Un motor de inducción, según Fitzgerald, Kingsley y Umans (1992), “es un dispositivo en el que se suministra corriente alterna directamente al estator mientras que el rotor la recibe por inducción o acción de transformador desde el estator”. En la figura 3.10 se ilustra la vista interna de un motor de inducción.



**Figura 3.10** Vista interior de un motor de inducción [4].

Su fundamento es la formación de un campo magnético giratorio en el entrehierro, que gira a velocidad sincrónica determinada por el número de polos y la frecuencia del voltaje aplicado en el estator, esta velocidad se puede expresar de la siguiente manera:

$$N_{sinc} = \frac{120 \cdot F_e}{P} \quad (3.1)$$

donde

$N_{sinc}$  = velocidad sincrónica (RPM).

$F_e$  = frecuencia del sistema de alimentación (Hz).

$P$  = número de polos de la máquina.

La tensión en una barra del rotor, de un motor de inducción, depende de la velocidad del rotor con respecto al campo magnético del estator (velocidad relativa). Se utilizan dos términos para definir el movimiento relativo entre el rotor y el campo magnético del estator que gira a la velocidad sincrónica, explicados a continuación:

- a) Velocidad de deslizamiento: Chapman (2000) [2], establece que “la velocidad de deslizamiento es la diferencia entre la velocidad sincrónica y la velocidad del rotor”, la cual viene dada como:

$$N_{des} = N_{sinc} - N_m \quad (3.2)$$

donde

$N_{des}$  = velocidad de deslizamiento de la máquina.

$N_{sinc}$  = velocidad sincrónica.

$N_m$  = velocidad mecánica de eje del motor.

- b) Deslizamiento: es la relación que describe el movimiento relativo campo entre el rotor y el campo magnético giratorio del estator, expresado en porcentaje o por unidad, denotada con la letra  $s$  y dada como sigue:

$$s = \frac{N_{sinc} - N_m}{N_{sinc}} \times 100 \quad (3.3)$$

Cabe destacar que si el rotor gira a la velocidad sincrónica el deslizamiento es igual a cero, mientras que si el rotor está estacionario el deslizamiento es igual a uno.

En una máquina de inducción la frecuencia de la corriente en los devanados del rotor no es necesariamente la misma que la corriente en los devanados del estator. Para cualquier velocidad, la frecuencia en el circuito del rotor es directamente proporcional a la diferencia entre la velocidad del campo magnético generado en el estator y la velocidad mecánica del rotor:

$$F_r = s \cdot F_e \quad (3.4)$$

donde

$F_r$ = frecuencia de la tensión y la corriente sinusoidal que se induce en las barras del rotor a cualquier deslizamiento (Hz).

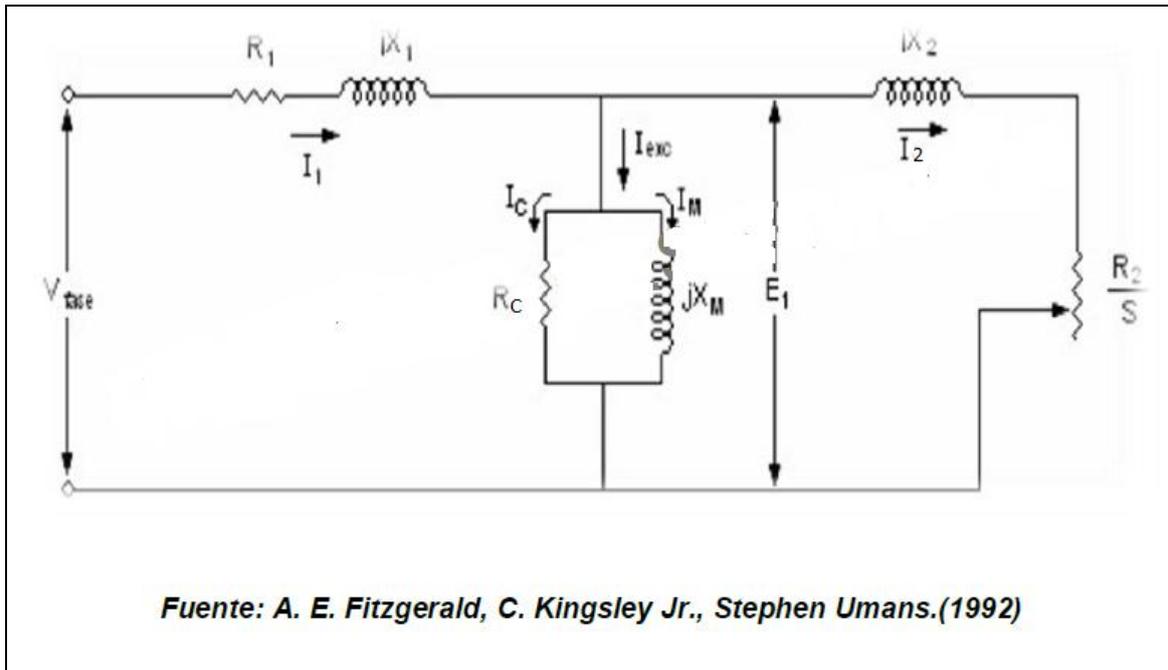
$s$  = deslizamiento, expresado en por unidad.

$F_e$ = frecuencia en el estator, o frecuencia de las líneas de alimentación, así como la del campo magnético giratorio (Hz).

Cuando el rotor de un motor se encuentra bloqueado, presentara en el rotor la misma frecuencia de estator, mientras que si el rotor gira a velocidad sincrónica la frecuencia de la corriente en el rotor será cero. Considerando una frecuencia variable del rotor, el circuito equivalente de un motor de inducción se caracteriza en los efectos que tiene dicha frecuencia sobre las tensiones inducidas en él y las impedancias del mismo.

El circuito equivalente según Fitzgerald, Kingsley y Umans (1992), “traduce con facilidad el estado estable de la máquina, considerando maquinas con devanados polifásicos simétricos excitados por voltajes polifásicos balanceados, lo cual ayuda a imaginarse que las maquinas trifásicas están conectadas es estrella, y así las corrientes son siempre de línea, y los voltajes son siempre de fase”. El modelo por fase del circuito equivalente de un motor de inducción, se muestra en la figura 3.11.

Por otra parte, el circuito equivalente permite la obtención de fórmulas para el cálculo del par, factor de potencia y diversas características del rotor, además se ser una herramienta de suma ayuda al momento de hallar los parámetros de aceptación del motor.



**Figura 3.11** Circuito Equivalente por fase de un motor de inducción [4].

Las variables presentes en el circuito equivalente son señaladas a continuación:

$V_{fase}$ = tensión aplicada por fase a los terminales del estator (V).

$E_1$ = tensión inducida en cada fase del estator (V).

$I_1$ = corriente por fase del estator (A).

$I_2$ = corriente por fase del rotor referida al estator (A).

$I_{exc}$ = corriente de excitación (A).

$I_C$ = corriente de pérdidas en el núcleo (A).

$I_M$ = corriente de magnetización (A).

$R_1$ = Resistencia por fase del estator ( $\Omega$ ).

$R_2$ = Resistencia por fase del rotor referida al estator ( $\Omega$ ).

$R_C$ = Resistencia de magnetización ( $\Omega$ ).

$X_1$ = Reactancia de dispersión por fase del estator ( $\Omega$ ).

$X_2$ = Reactancia de dispersión por fase del rotor referida al estator, rotor bloqueado ( $\Omega$ ).

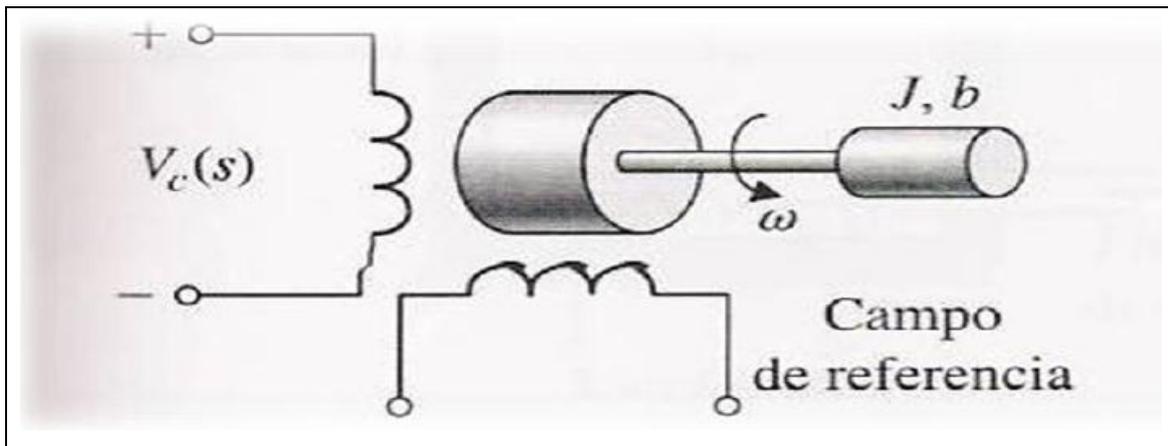
$X_M$ = Reactancia de magnetización ( $\Omega$ ).

$s$ = Deslizamiento (expresado en por unidad).

Cabe destacar que la corriente  $I_C$  no suele tomarse en cuenta, ya que su valor resultante será mucho más bajo que el valor de la corriente de magnetización ( $I_M$ ), siendo esta última un valor bastante aproximado al de la corriente de excitación ( $I_{exc}$ ).

Para finalizar, se calculará la función de transferencia para el motor de inducción, según Richard C. Dorf y Robert H. Bishop (2005) [11], el sistema de transferencia es un sistema que se define como la relación entre la transformada de Laplace de la

variable de salida y la transformada de Laplace de la variable de entrada, suponiendo que todas las condiciones iniciales se hacen igual a cero (ver figura 3.12).



**Figura 3.12** Función de transferencia para motor de inducción [4].

$$\frac{W(s)}{V_c(s)} = \frac{Km}{1 + \tau s} \quad (3.5)$$

$$\tau = \frac{J}{(b - m)} \quad (3.6)$$

donde:

$W(s)$  = Velocidad del eje del motor.

$V_c(s)$  = Tensión aplicada.

$Km$  = Ganancia de velocidad nominal del motor.

$s$  = Variable de la transformada de Laplace.

$m$  = Pendiente de la curva Par-Velocidad linealizada (normalmente negativa)

$J$  = Inercia del motor.

$b$  = Coeficiente de fricción del cojinete de fricción del motor.

$\tau$  = Constante de tiempo del sistema.

### 3.2.6 Descripción del PLC SLC 500 de Allen Bradley

La serie SLC 500 de Allen Bradley es una familia del PLC modulares que ofrecen gran cantidad de opciones en módulos de entrada y salidas, comunicación y memoria. Por otra parte, ofrecen diferentes tipos de CPU según las características de la aplicación.

A continuación se describen los módulos específicos de la serie SLC500:

**Bastidor 1746-A7:** tiene una capacidad de siete módulos, cada módulo debe ocupar una ranura. Las direcciones de las ranuras son 0 a 6, asignadas de izquierda a

derecha, la fuente se debe colocar en un espacio especial, fuera del área de ranuras, en el extremo izquierdo del bastidor; el CPU debe colocarse en la ranura 0.

**Fuente de alimentación 1746-P2:** esta es la fuente que alimenta los módulos del PLC, el voltaje de entrada debe estar en el rango de 85-132/170-255 Vac, 47-63 Hz. Tiene un voltaje de salida de 5/24 Vdc, su consumo típico de potencia es de 135 VA. La selección de la fuente depende del consumo de los módulos que se utilizarán.

**CPU SLC 5/05 1747-L551:** este CPU tiene una capacidad de memoria de 16 kbits, puede direccionar hasta un máximo de 4096 entradas y salidas digitales pues soporta hasta 3 bastidores y 30 ranuras de conexión; posee dos canales de comunicación:

Canal 1: protocolo de capa física RS-232 full dúplex master/slave.

Canal 2: protocolo de capa física Ethernet TCP/IP.

Ambos canales soportan los protocolos de comunicación DH-485, ACSII RS-232, Data highway plus, Ethernet, Devicenet, Controlnet.

Además, el CPU tiene una capacidad de memoria para programa de hasta 16 mil palabras y una memoria flash de respaldo.

**Módulo de entradas digitales 1746-IA16:** consiste en 16 entradas digitales que asignan el estado verdadero al voltaje de 100/120 Vac, se tienen 16 bornes para los voltajes de entrada y un borne para el común o neutro, los ámbitos de operación para la entrada son 85 a 132 Vac, 47 a 63 Hz; el consumo es de 85 mA a 5 Vdc de alimentación.

**Módulo de salidas digitales 1746-OW16:** el módulo consta de 16 salidas tipo relé, con dos puntos comunes, por ser contactos de relé, los niveles de las señales de salida se establecen por el usuario. Consume 170 mA a 5 Vdc; cada contacto está diseñado para soportar hasta 2.5 A a 120 Vac.

**Módulo de entradas/salidas analógicas 1746-NIO4I:** en este módulo se tienen dos entradas analógicas de corrientes o voltaje (seleccionable por medio de un interruptor en el módulo) y dos salidas analógicas de corriente. Las entradas del módulo convierten las señales de entrada analógicas en un valor de 16 bits que se guarda en memoria del PLC

Con respecto a la programación del PLC SLC 500, los programas necesarios para programar el PLC SLC 500 son: RSLinx y RSLogix, propiedad de Allen Bradley. Estos programas son diseñados para un PC con una plataforma Windows de 32 bits versión 95 o superior. El programa RSLinx es una aplicación de comunicación entre los sistemas operativos Windows de 32 bits versión o superior y una serie de aplicaciones creadas por Rockwell software para Allen Bradley, entre ellas, RSLogix.

En la aplicación RsLogix el usuario puede configurar el PLC y programar el algoritmo de control, configurar el PLC es importante, pues se debe corroborar que las

direcciones de las variables de entrada/salida que se utilizan en el programa corresponden realmente a los módulos conectados al bastidor; RSLogix permite escribir el programa y descargarlo en el PLC.

RSView32 es un programa que permite al usuario crear animaciones, simulaciones e interfaces graficas entre el PLC y un computador personal. La interface permite monitorear, modificar e introducir comandos al programa que está almacenado en el PLC. RSView32 está diseñado para ser ejecutado en una computadora personal con un sistema operativo de 32 bits versión 95 o superiores.

La operación básica del CPU es ejecutar, de forma repetitiva, el programa que fue cargado por el usuario en la memoria del PLC. El tiempo de ciclo es el tiempo que requiere el CPU para ejecutar ese programa una sola vez.

Los Elementos básicos de los programas escritos en la aplicación RSLogix, el programa contiene el algoritmo que utiliza el PLC para obtener las salidas a partir de una configuración de entradas dada. La serie de procesadores SLC 500 tiene un set de instrucciones, codificadas en lenguaje escalera, que especifican todas las operaciones que el PLC puede realizar. Los objetos sobre los que las instrucciones actúan se llaman elementos de lenguaje. Estos elementos residen en la memoria interna del PLC. La memoria está estructurada en archivos, cada uno con una capacidad de 256 elementos. Cada elemento está formado de 16 bits, 32 bits o 48 bits dependiendo del tipo de archivo. Existen archivos de datos y de programa.

A continuación se describe los elementos de lenguaje, dependiendo del tipo, los archivos de dato se pueden clasificar en: salida, entrada, estado, bit, temporizador, contador, control, entero y punto flotante. Existen 256 archivos de dato disponibles. El tipo de archivo específico es definido por el usuario, excepto para los primeros 9, los cuales están definidos con un tipo predeterminado. La forma en que el CPU direcciona un elemento dentro de un archivo depende de la clase de archivo que se trate. Un elemento, entonces, es caracterizado por el archivo en donde se encuentra. Para el caso de los archivos de programa existen solamente dos tipos: de sistema y de programa.

### **3.3 Descripción de los principios físicos y/o eléctricos relacionados con la solución del problema**

#### **3.3.1 Especificaciones en el dominio del tiempo para una señal escalón.**

Según el Kuo [10], la fracción transitoria de la respuesta en el tiempo es aquella parte que tiende a cero cuando el tiempo crece. Esta respuesta transitoria de un sistema de

control es importante debido a que tanto la amplitud como la duración del tiempo en la respuesta transitoria deben mantenerse dentro de los límites establecidos.

En los sistemas de control lineal las propiedades de la respuesta transitoria normalmente se dan ante una función al escalón como entrada. Tomando como referencia esta señal, a continuación se presentan los criterios de desempeño definidos por Kuo[10], y que son comúnmente utilizados para la caracterización de sistemas de control lineal en el dominio del tiempo:

- ✓ Sobrepasso máximo. “Asumiendo que  $y(t)$  es la respuesta del sistema a la entrada escalón, que  $y_{m\acute{a}x}$  es el valor máximo de  $y(t)$  y  $y_{ss}$  es el valor en estado estable”, entonces el sobrepasso máximo se puede definir como:

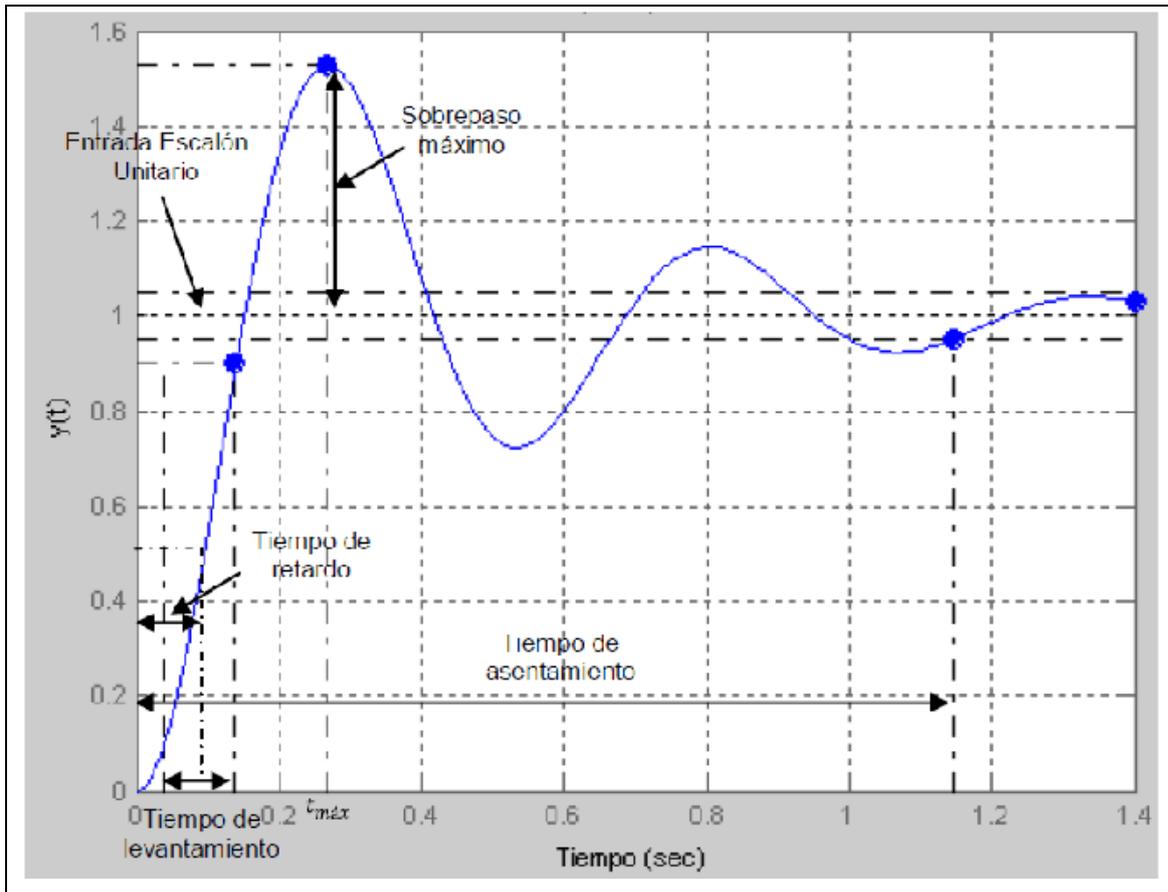
$$M = \text{sobrepasso}_{\text{m\acute{a}ximo}} = y_{m\acute{a}x} - y_{ss} \quad (3.7)$$

A este parámetro se le denota con la letra M. Como porcentaje del valor final de la respuesta al escalón se tiene:

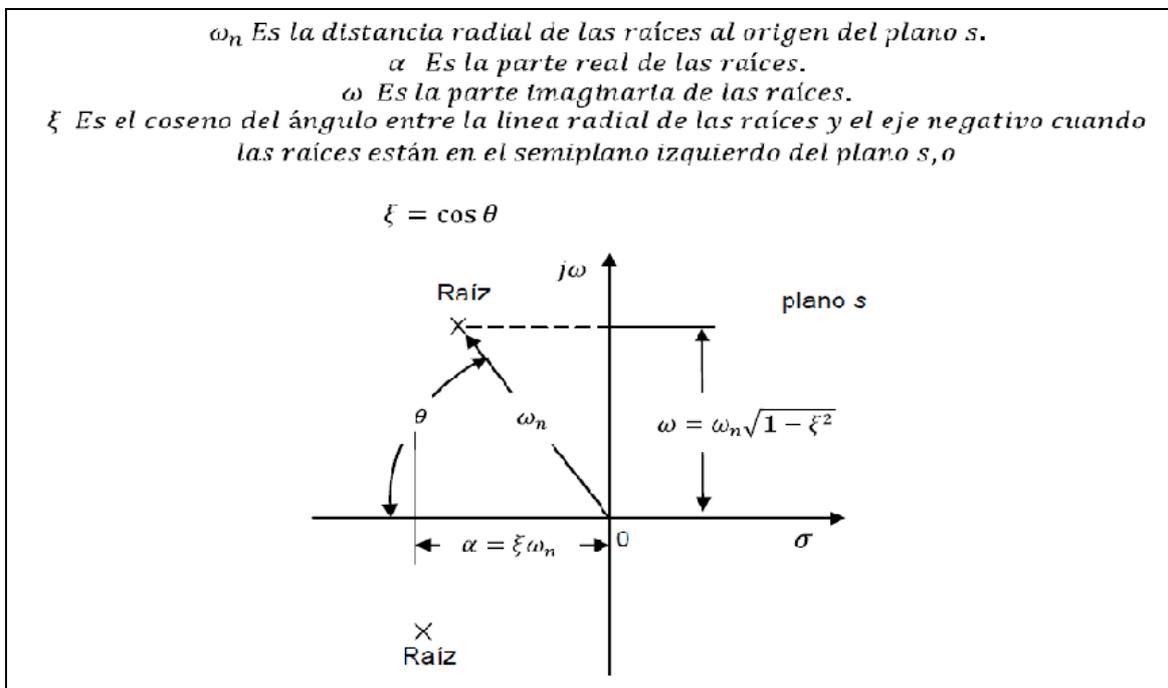
$$\%M = \frac{M}{y_{ss}} * 100 \quad (3.8)$$

- ✓ Tiempo de retardo. “El tiempo de retardo  $t_d$  es el tiempo requerido para que la respuesta al escalón alcance 50% de su valor final.”
- ✓ Tiempo de levantamiento. “El tiempo de levantamiento  $t_r$  se define como el tiempo requerido para que la respuesta al escalón se eleve de 10% a 90% de su valor final”.
- ✓ Tiempo de asentamiento. “El tiempo de asentamiento  $t_s$  se define como el tiempo requerido para que la respuesta al escalón disminuya y permanezca dentro de un porcentaje específico de su valor final y por lo general se utiliza 5%.”

Estas cuatro especificaciones definidas dan una medida directa de las características transitorias de un sistema de control en términos de la respuesta a la entrada escalón. En la figura 3.13 se muestra una respuesta típica de un sistema de control de segundo orden ante una entrada escalón. Como se puede apreciar, estas especificaciones de dominio en el tiempo se pueden medir con relativa facilidad.



**Figura 3.13** Respuesta típica de un sistema de control ante una entrada escalón unitario [9]. En la figura 3.14 se muestra la relación entre la localización de las raíces de la ecuación característica y  $\omega_n$ ,  $\xi$ ,  $\alpha$  y  $\omega$ . Para las raíces de conjugación compleja se tiene:



**Figura 3.14** Sistema de control prototipo de segundo orden [9].

## **Capítulo 4: Procedimiento y metodología**

En este capítulo, se describirán las etapas del método de diseño en ingeniería, seguidas para llegar a la solución del problema; iniciando con la definición del problema, información relevante, las restricciones, datos técnicos, seguido del alcance del mismo. Por último el procedimiento para buscar la mejor solución.

### **4.1 Reconocimiento y definición del problema**

En la planta de CEMEX colorado Abangares, se lleva a cabo la elaboración y embasamiento del Cemento que se utiliza en las diferentes construcciones y proyectos relacionados en infraestructura, como carreteras, puentes, edificios, casas de habitación, en general todo lo que se puede hacer con cemento. Debido a los cambios y en busca de mejoras, se compromete con el cumplimiento de estándares, tanto de calidad como de preservación y cuidado del medio ambiente, así mismo se da la tarea de reducir el consumo energético y la reducción en la emisión de dióxido de carbono.

Debido a esto, CEMEX ha puesto en marcha el proyecto de utilización de biomásas, como fuente alternativa de combustible, con el fin de reducir el consumo energético y de implementar la ley de aprobación de carbono neutro para el año 2021. De esta forma y con una serie de visitas a CEMEX, en coordinación con el Ing. Jesús Rubaldo Batista Castillo junto con Rafael Martín Alpizar Loría, surge la propuesta para el desarrollo del presente proyecto. El cual se puede definir como la necesidad de hacer un análisis estadístico utilidad, elaborar la investigación del equipo que se va a utilizar en el proyecto, así como desarrollar la simulación de un control automático e implementar el control mediante el uso de un PLC como herramienta, además de realizar las interconexiones necesarias entre los dispositivos de control, según la información y equipos con que cuenta la planta.

### **4.2 Obtención y análisis de información**

Toda la información, en cuanto al funcionamiento de la modernización de la báscula dosificadora de la cascarilla fue suministrada por el ingeniero a cargo en forma verbal, en conjunto con algunos técnicos de la planta, además de forma personal se buscó información más detallada para la solución del problema planteado.

Con respecto al análisis de la información se inició con algunos apuntes tomados en el campo de funcionamiento actual, de las básculas dosificadoras con cinta transportadora, y del funcionamiento que desempeñan estas en el proceso, además de comprender todo la lógica del sistema actual.

Seguidamente se investigó el tipo de tecnología empleada por la planta para obtener información de los equipos y sus datos técnicos, utilizando como herramienta el internet, se estudió el tipo de programación requerida para cada uno de los equipos a utilizar, así como su posible interconexión entre ellos.

Cabe resaltar, que uno de los puntos importantes es que con la modernización del equipo de la báscula de cascarilla de arroz, se mejore la precisión con la que se desea trabajar el proceso, es decir, que cuando se realiza un chequeo de pesaje entre lo que marco el sistema a implementar contra lo que realmente se midió, presente un error de desviación menor que un 10%.

### **4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución**

Con respecto a la implementación de hardware requerido para la implementación del proyecto, la reevaluación no tomo partida, debido a que se cuenta con la mayoría del equipo requerido, además debido a la temática de trabajar marcas existentes y de confianza en la plata, como lo son las aplicaciones de control Allen Bradley, ya que presentan un buen desempeño en áreas industriales.

Desde la perspectiva de software programación, se apegó a la tecnología existente ya en la empresa, para poder comunicar los equipos y que la interfaz se acoplara con el software que trabaja la planta, además se tomaron algunas restricciones propias de CEMEX. Para la revisión y verificación de la programación se realizaron varias pruebas de simulación, se implementaron estrategias de control y se tomaron en cuenta condiciones de seguridad del equipo y del personal que lo opera.

Para la elección de la mejor solución se tomaron en cuenta aspectos como: la velocidad de la cinta transportadora, el peso de las celdas de carga, la densidad aparente de la cascarilla de arroz, tiempo de transporte de la cascarilla de punto de carga al de descarga, se debe mencionar que el control sistema a implementar es un sistema secundario, ya que en la planta lo tienen estipulado de esa manera, temporización de todo el equipo en general.

### **4.4 Implementación de la solución**

Se enfatizó el siguiente orden para el desarrollo de la solución, primero se realizó una investigación, toma de datos, elaboración de ideas, desarrollo parcial, pruebas e implementación final.

En la etapa de investigación se especificaron los aspectos relacionados con características eléctricas, electromecánicas, funcionamiento de INTECONT PLUS, del PowerFlex70, norma de seguridad en manipulación de equipos y algunos estándares. De esta manera y con la orientación del entorno del proyecto, se continuó con la toma de datos, con el fin de desarrollar el control y sincronización del sistema. Garantizando

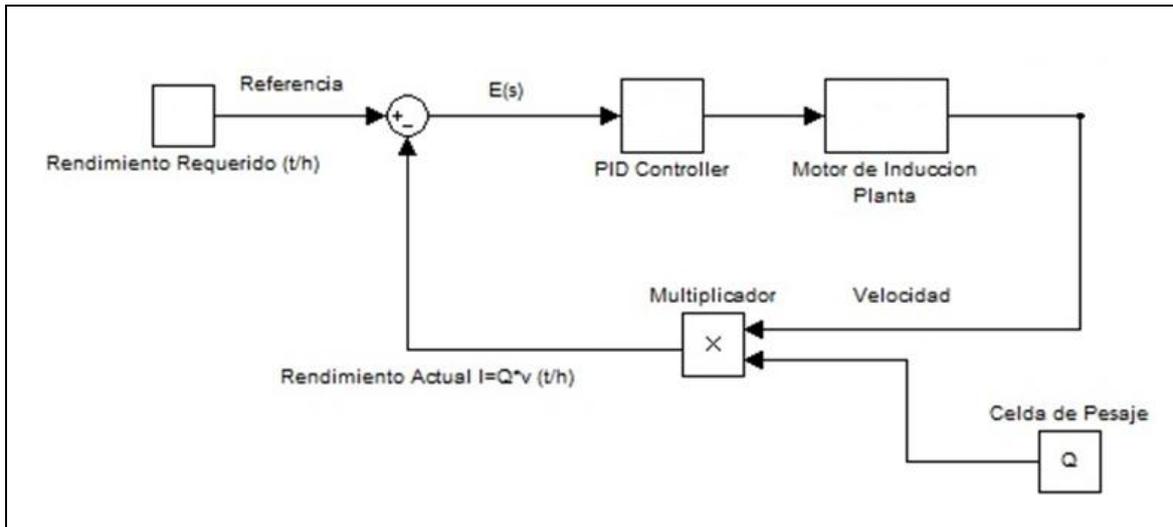
un lazo cerrado de control, buscando la recolección de la información con la ayuda de los sensores y generando las actividades o accionamientos correspondientes a la etapa de potencia.

Por otra parte, se desarrolló la rutina encargada del control del motor de inducción, que acciona el mecanismo de la cinta transportadora, siguiendo una secuencia de pasos y algoritmos; con el objetivo de encontrar errores o fallas en el sistema en el momento de realizar la puesta en marcha, buscando depuración del programa.

Las simulaciones son desarrolladas en Matlab, es un lenguaje de alto nivel y presenta un entorno interactivo para el cálculo numérico, visualización y programación; con la ayuda de este software, puede analizar los datos, desarrollar algoritmos, crear modelos y aplicaciones. Este lenguaje permite explorar múltiples enfoques y llegar a una solución más rápida con las hojas de cálculo o lenguajes de programación comunes, como C/C++ o Java.

Además con el control lógico programable (PLC), presenta ventajas adicionales según la implementación, ya que estos dispositivos poseen conectores de RJ-45, que permiten la conexión vía Ethernet a 10/100 Megabits Full Duplex o Half Duplex, según sea requerido. Tiene un diseño modular, el cual permite al expansión de tarjetas (rack's), generando el incremento de entradas y salidas discretas, analógicas o módulos con algunas funciones especiales, como funciones matemáticas y de control, como el PID.

En la figura 4.1, se visualiza el diagrama para la simulación del sistema a controlar, en donde la planta es el motor de inducción, ya que la variable final de control es la velocidad sobre la cinta, cuenta con dos sensores un tacómetro que mide la velocidad de la cinta y una celda de pesaje que indica el peso del material transportado. El sistema está orientado en seguir la referencia de entrada, por lo que se debe programar un PI que acondicione el rendimiento requerido con el rendimiento actual.



**Figura 4.1** Diagrama de bloques del sistema de control a diseñar (Matlab).

## **Capítulo 5: Descripción detallada de la solución (Explicación del diseño)**

Para este capítulo se explicara detalladamente el análisis de las soluciones propuestas y de la selección de la mejor de ellas, además se describirá las principales características tanto de hardware como software implementados. Se emplearan diagramas de los algoritmos utilizados, con el objetivo de detallar el trabajo realizado en el proyecto.

### **5.1 Análisis de soluciones y selección final**

Con respecto al hardware, debido a que la planta ya tiene establecido el sistema de comunicación, el proyecto tiene que ser orientado a ese sistema; porque de lo contrario no podría enviar ni recibir datos a los equipos instalados.

Previo al desarrollo del software a implementar, fue necesario para la resolución del problema, entender bien el funcionamiento de toda el proceso de dosificación, partiendo del análisis de utilización de cintas transportadoras, la lógica de programación del INTECONT PLUS, el razonamiento de funcionalidad del sensor de velocidad y el de la celda de pesaje; así como programar los diferentes parámetros del variador de frecuencia PowerFlex70 y el la obtención del circuito equivalente del motor de inducción.

Cabe resaltar que la dosificación de la cascarilla de arroz, pertenece a un sistema secundario, ya definido por CEMEX, junto con la dosificación de aserrín; el sistema primario de control es el de la pfister de coque, el cual da el ajuste final según lo estipulado en los dos sistemas secundarios. Es decir, nuestro sistema lo único que tiene que hacer es poder mantener el rendimiento de t/h dentro del rango de 1 a 10 t/h, según lo especifique el operario de sala de control. El control a programar en el PLC está enfatizado como seguidor de la referencia de entrada. Además la escogencia de la mejor solución está definida por la planta, debido a que esta ya tiene comprado todos los equipos y estándares en general.

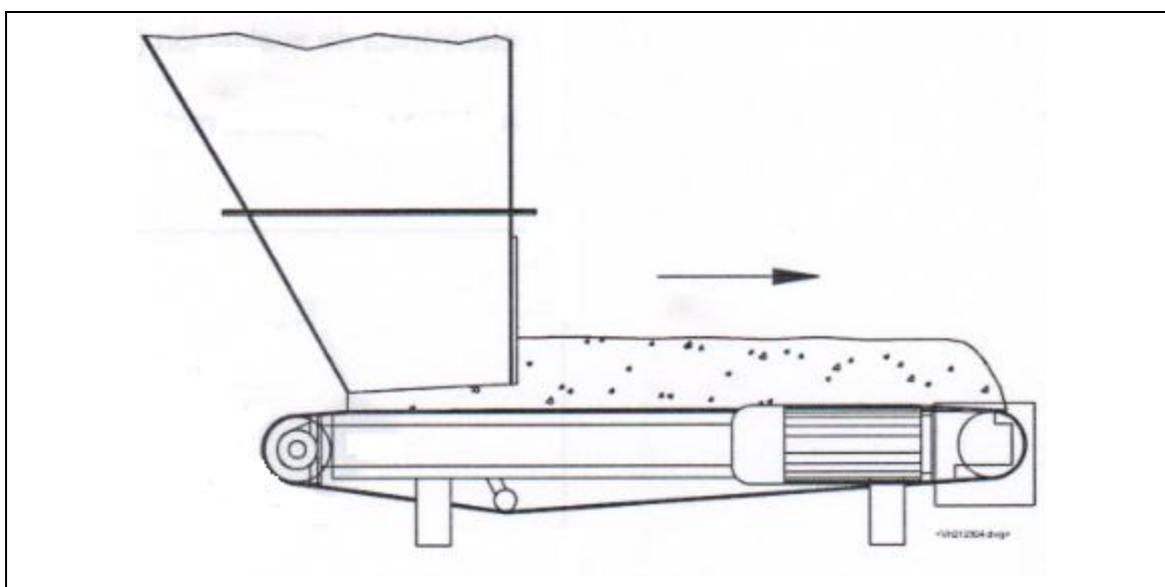
### **5.2 Descripción de hardware**

Con respecto a la modulación de la planta a controlar, hay que tomar en cuenta que consta de una tolva, una cinta transportadora, una celda de pesaje, un motor de inducción de corriente alterna, una celda de pesaje y un variador de frecuencia para controlar la velocidad del motor el cual gira la cinta transportadora. Para el diseño de la

báscula dosificadora, son de vital importancia la densidad aparente de la cascarilla de arroz y el área transversal de la boquilla de salida de la tolva.

En la figura 5.1, se visualiza una MULTIDOS, la cual es una báscula dosificadora de cinta con regulación de velocidad para la dosificación continua de materiales a granel. El material a granel es extraído directamente del dispositivo (silo) localizado encima de la tolva de carga. Un ajustador de la altura del material a granel que frecuentemente forma parte de la instalación del cliente proporciona una carga volumétrica casi constante de la cinta.

Gracias al pesaje permanente de la carga de cinta y una regulación automática de la velocidad de la cinta es posible alcanzar un caudal masivo continuo. El pesaje es efectuado mediante una unidad de pesaje compacta (zona de pesaje) integrada en el bastidor de la báscula dosificadora de cinta. La unidad de pesaje compacta transmite sus resultados de medida a la electrónica de evaluación conectada.

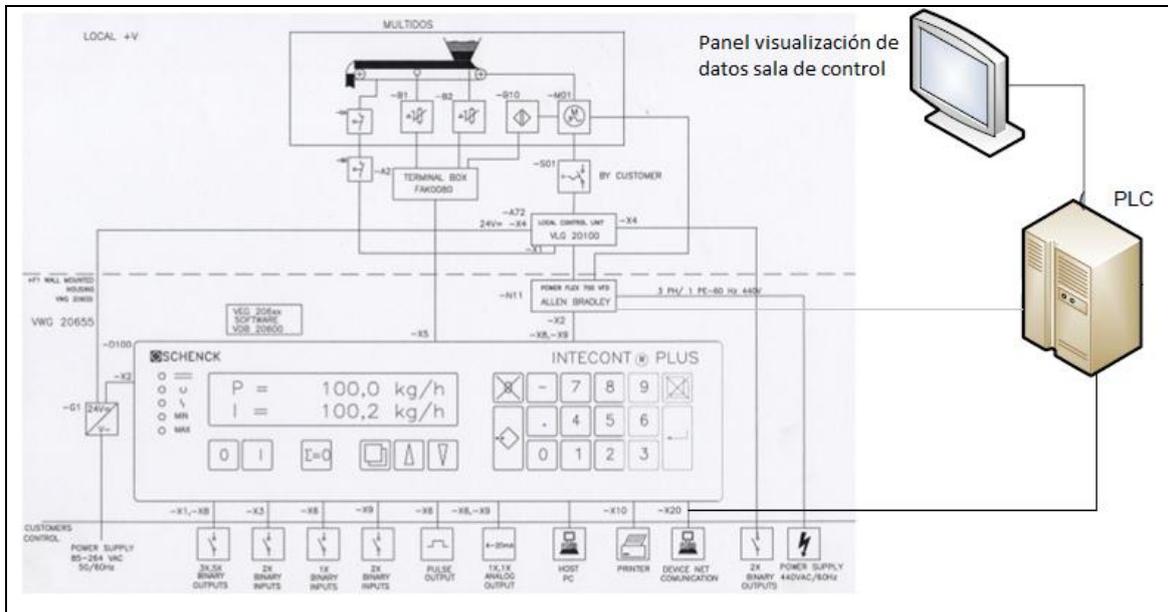


**Figura 5.1** Carga del material a granel (Multidos).

Existen dos modos de operación, modo manual y modo automático, el modo manual el PLC recibe el dato de entrada y realiza el ajuste de la velocidad mediante el sistema de control PID programado en dicho dispositivo, en donde este genera una señal de salida que es interpretada por el PowerFlex70 en cual controla la velocidad de motor de inducción de la cinta, en este modo lo único que hace el INTCONT PLUS es calcular el rendimiento actual de producción y comunicárselo vía Ethernet al PLC, que a su vez este lo ocupa para los cálculos de control.

En el modo automático en INTECONT PLUS es el que controla al PowerFlex70, ya que este cuenta con una unidad de control interna, que se ajusta según

especificaciones deseadas de la planta, en este modo el PLC solo sirve como elemento de visualización de datos para el operario que está en la sala de control. La unidad de control interno del INTECONT PLUS está programada mediante la herramienta EasyServe VPC 20150.



**Figura 5.2** Diagrama de conexión de equipos en general.

### 5.3 Descripción del software

A continuación se describirán los principales programas de cómputo utilizados en la programación del PLC y configuración de PowerFlex70:

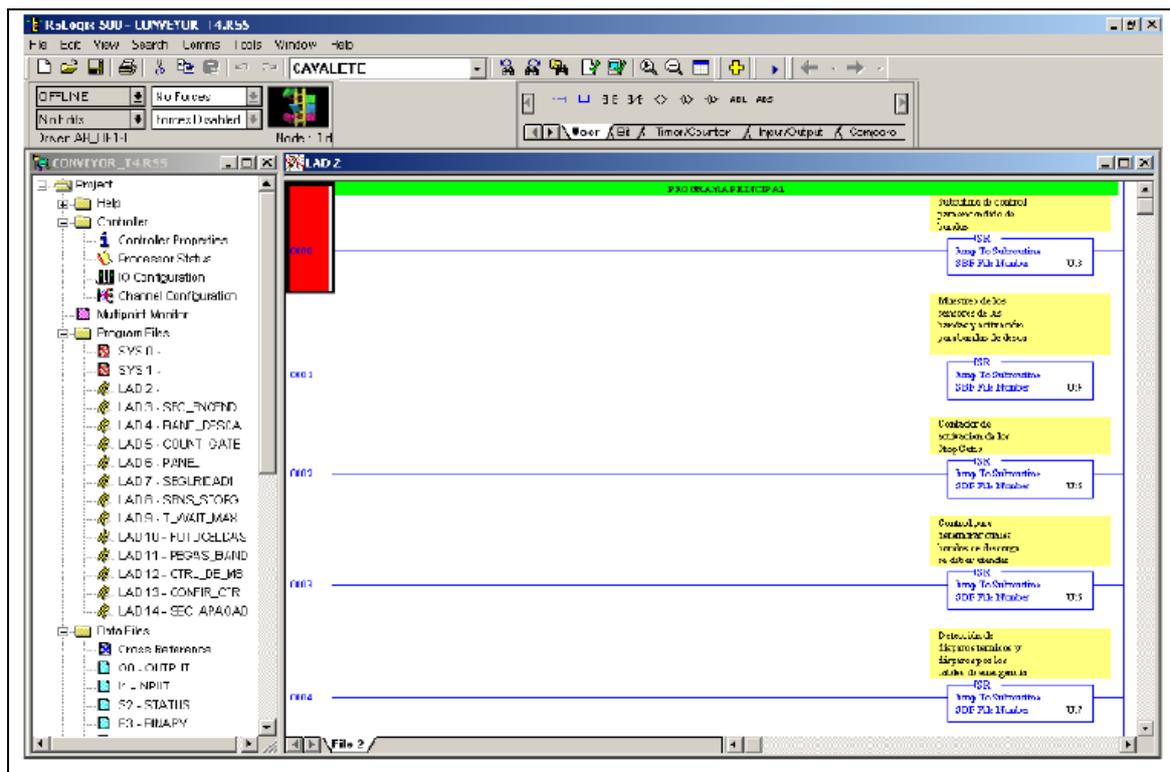
#### RSLogix 500

Es un software de programación para autómatas que permite realizar programación en escalera, mediante nemónicos o por medio de la barra de instrucciones, que permite a través de pestañas y botones, acceder de forma más rápida a las instrucciones más habituales del lenguaje. En algunos casos, dependiendo de los dispositivos periféricos, es posible la programación en línea (modo run).

Se dice que su programación es escalera ya que al desarrollar rutinas sus instrucciones tienen forma de sucesión descendente. La ejecución del programa cuenta con tres recorridos para las instrucciones: el primero es el scan de instrucciones de entradas, el segundo, el scan de instrucciones de proceso y ejecución y por último se realiza el scan de salida. La pantalla principal y algunas de las instrucciones para la edición de programas se describen a continuación:

**Tabla 5.1** Descripción de la instrucciones más comunes de RSLogix 500 [9].

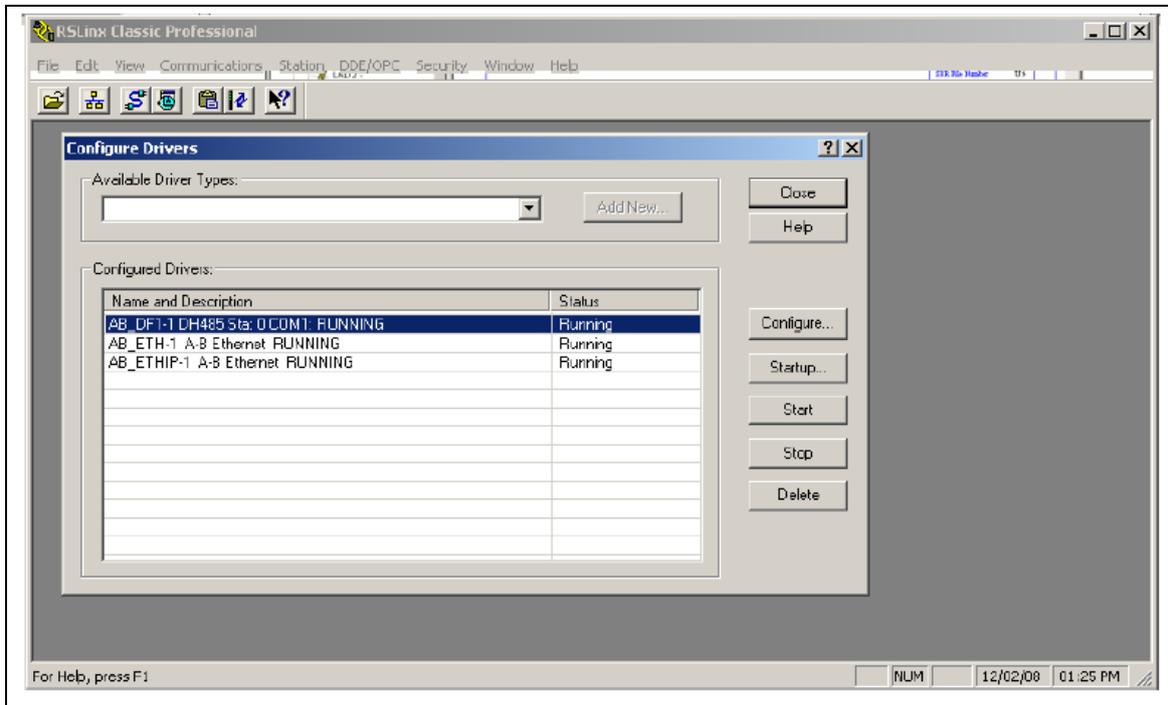
Nemónico	Descripción	Símbolo
	Nueva línea de trabajo	⋯—
	Bifurcación de línea de trabajo	└─┘
XIC	Contacto normalmente abierto	┌─┐ E
XIO	Contacto normalmente cerrado	┌─┐ /E
OTE	Activación de la variable	( )
OTL	Activación de la variable de manera retentiva	( )
OTU	Desactivación de la variable	( )
ONS	Flanco ascendente	ONS
TON	Temporizador	TON
CTU	Contador ascendente	CTU
RES	Resetear	RES



**Figura 5.3** Pantalla principal del RSLogix 500 [9].

## RSLinx

RSLinx es un servidor de comunicación desarrollado por Rockwell Automation, que brinda la conectividad entre los dispositivos de campo, a través de distintos protocolos de transmisión de datos, y los diferentes programas de visualización y control de procesos. Proporciona acceso a los controladores Allen-Bradley y a una gran variedad de aplicaciones de Rockwell Software, tales como RSLogix 500. Seguidamente se presenta la pantalla principal del RSLinx:



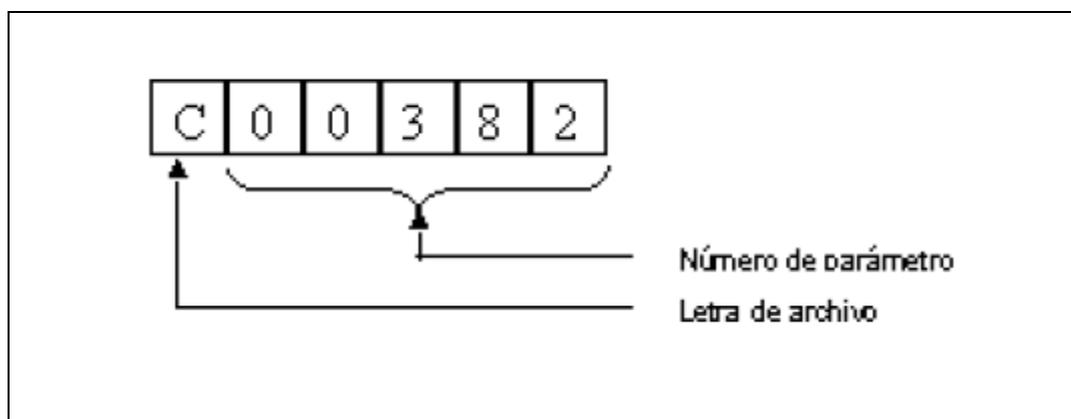
**Figura 5.4** Pantalla principal del RSLinx, configurado para la comunicación entre la PC y el PLC [9].

## Parámetros del variador PowerFlex70

El variador de frecuencia cuenta con una serie de parámetros programables, con el fin de controlar la aplicación. Esto significa que el equipo es de aplicación general y debe ser programado a través de una serie de parámetros según el motor que vaya a ser conectado a sus terminales de potencia. En total son más de 500 parámetros. La programación puede hacerse a través de un módulo HIM, o través de una red de comunicación o PC por el puerto serial.

Para configurar el variador a fin de que funcionara de la manera específica requerida, se debieron establecer algunos de los parámetros del variador. Existen tres tipos de parámetros:

- **Parámetros ENUM:** Los parámetros ENUM permiten una selección entre 2 o más ítems. El HIM de LCD mostrará un mensaje de texto para cada ítem. El HIM de LED mostrará un número para cada ítem.
- **Parámetros de Bit:** Los parámetros de bit tienen bits individuales asociados con funciones y condiciones. Si el bit es 0, la función está desactivada y la condición es falsa. Si el bit es 1, la función está activada y la condición es verdadera.
- **Parámetros Numéricos:** Estos parámetros tienen un solo valor numérico (por ejemplo, 0.1 Voltios). Los parámetros del variador se subdividen en archivos, los cuales a su vez están divididos en grupos y cada uno tiene un número específico. De manera que al visualizar un parámetro en el módulo de programación se visualiza de la siguiente manera:



**Figura 5.5** Presentación de los parámetros en la pantalla del HIM [9].

En la siguiente tabla se presentan los parámetros que debieron ser modificados para esta aplicación en particular:

**Tabla 5.2** Algunos parámetros programados en el variador.

Archivo	Número de parámetros	Nombre	Descripción	Valor programado
B	041	Motor NP volts	Voltaje en la placa del motor que se conectó	230 V
B	042	Motor NP FLA	Corriente a plena carga en la placa del motor	2.9 A
B	043	Motor NP Hertz	Frecuencia a la que opera el motor según el dato de la placa	60 Hz
B	044	Motor NP RPM	Revoluciones por minuto a la que gira el motor a la frecuencia nominal	1740 RPM

B	045	Motor NP Power	Potencia en la placa del motor	¼ HP
B	046	Mtr NP Pwr Units	Unidades en que se expresa la potencia (0:HP, 1:kW)	0
C	081	Minimum Speed	Valor límite inferior de frecuencia a la que debe operar el variador	0 Hz
C	082	Maximum Speed	Valor límite superior de frecuencia a la que debe operar el variador	60 Hz
C	090	Speed Ref A Sel	Selecciona cuál de las entradas disponibles como referencia de velocidad debe ser la tomada en cuenta	1:Entrada Analógica 1
C	091	Speed Ref A Hi	Escala el valor de máximo de frecuencia de salida cuando la entrada analógica está en su valor máximo	0 Hz
C	092	Speed Ref A Lo	Escala el valor de mínimo de frecuencia de salida cuando la entrada analógica está en su valor mínimo	60 Hz
C	100	Jog Spped	Velocidad que se debe aplicar al motor cuando se aplica procesos por empujes	10 Hz
C	101-107	Preset Speed 1-7	Velocidades de preselección de 1 a 7	5,10,20,30,40,50 y 60 Hz
D	140	Accel Time 1	Tiempo en que debe ejecutarse la aceleración del motor al haber un cambio en la referencia	1 s
D	142	Decel Timer 1	Tiempo en que debe ejecutarse la desaceleración del motor al haber un cambio en la referencia	1 s
D	155	Stop Mode A	Modo en que debe frenar el motor cuando se da un orden de freno	Freno CC
D	159	DC Brake Time	Tiempo en que se debe frenar el motor por DC	0.5 s
D	163	DB Resistor Type	Tipo de resistor utilizado para le frenado por DC	0:Resistencia interna del variador
J	322	Analog In 1 Hi	Valor máximo de la entrada analógica utilizado para escalar la frecuencia	10 V
J	323	Analog In 1 Lo	Valor mínimo de la entrada analógica utilizado para escalar la frecuencia	0 V
J	362	Digital In 1 Sel	Función de la entrada digital 1	"Arranque"
J	363	Digital In 2 Sel	Función de la entrada digital 2	"Empuje"
J	364	Digital In 3 Sel	Función de la entrada digital 3	"Dirección"

## Capítulo 6: Análisis de Resultados

### 6.1 Resultados

#### 6.1.1 Características del Motor de Inducción

El motor de inducción a utilizar, es de la marca Sew Vietnam modelo: SA67DR571M4, el cual es un motor trifásico de  $\frac{3}{4}$  HP. Por otro parte dicho motor presenta los siguientes valores nominales, ver tabla 6.1, estos valores fueron tomados de la placa característica del motor.

**Tabla 6.1** Valores nominales del motor Sew Vietnam  $\frac{3}{4}$  HP.

$V_L(V)$	$I_L(A)$	$P(kW)$	RPM	$F_p$	$f(Hz)$
230	2.9	0.55	1740	0.6	60
460	1.45	0.55	1740	0.6	60

#### 6.1.2 Circuito Equivalente del motor

Antes de poder obtener el circuito equivalente del motor de inducción, es importante conocer los parámetros del mismo, por lo que se sometió al motor a las siguientes pruebas o ensayos:

##### 6.1.2.1 Prueba de resistencia en corriente directa

Dicha prueba se realizó aplicando a cada una de las bobinas 10.8 V DC, con el fin de poder medir la corriente en estas, la cual fue de 2.57 A, con estos datos obtenidos, se procedió a calcular la resistencia por fase obteniendo 4.2  $\Omega$ , por medio de la Ley de Ohm. Este valor de resistencia se multiplicó por un factor de 10% para ajustarla al incremento producido al suministrar corriente alterna.

##### 6.1.2.2 Prueba en vacío

Una de las cosas importantes de esta prueba, es que se realizó con el eje del motor libre de cualquier carga mecánica, bajo estas condiciones se tomó lectura de la corriente de línea, voltaje de línea., potencia trifásica y revoluciones por minuto los cuales se pueden observar en la tabla 6.2.

**Tabla 6.2** Valores obtenidos de prueba en vacío.

$I_L$	$V_L$	$P$	Velocidad
2.1 A	236 V	497.87 W	1798 R.P.M

### 6.1.2.3 Prueba de rotor bloqueado

Para poder realizar esta prueba, se debe ajustar la frecuencia reducida en el estator a un valor típico del 25%, esto con el objetivo de considerar el efecto peculiar debido a la frecuencia presente en el rotor al efectuar la prueba. Es decir, se busca un valor más aproximado a la resistencia, pero en este ensayo se ejecutó con la frecuencia nominal por qué no se disponía del equipo adecuado para realizar dicho parámetro, lo cual es irrelevante.

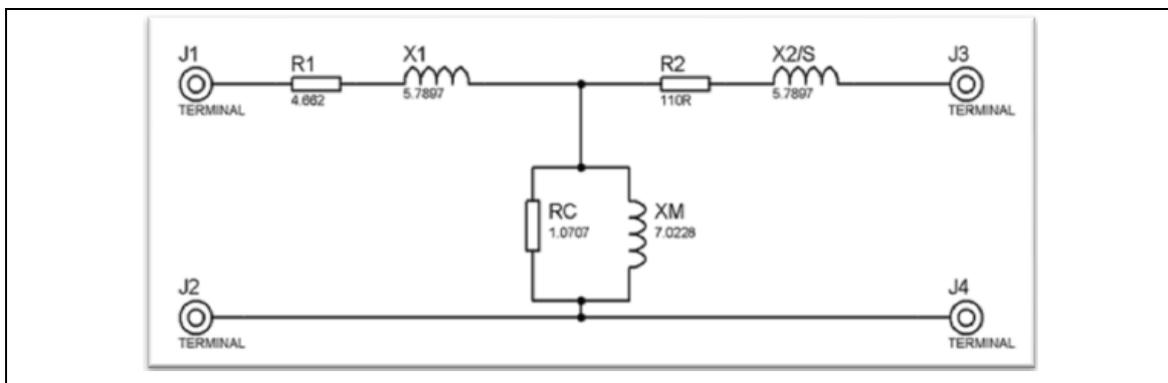
La prueba consistió en impedir mecánicamente la rotación de motor, mientras que se excitaba por medio de una fuente trifásica balanceada variable, el voltaje se incrementó hasta conseguir la corriente nominal del motor. Una vez alcanzado la corriente nominal, se tomó lectura de los siguientes valores de la tabla 6.3.

**Tabla 6.3** Valores obtenidos de prueba en rotor bloqueado.

$I_L$	$V_L$	$P$	$f$
2.9 A	66.3 V	159.85 W	60 Hz

Una vez obtenidos los resultados de las tres pruebas efectuadas, se aplicaron las siguientes fórmulas matemáticas para obtener el circuito equivalente del motor de inducción.

Con la obtención de los parámetros del circuito, se puede concluir el circuito equivalente de la figura 6.1.

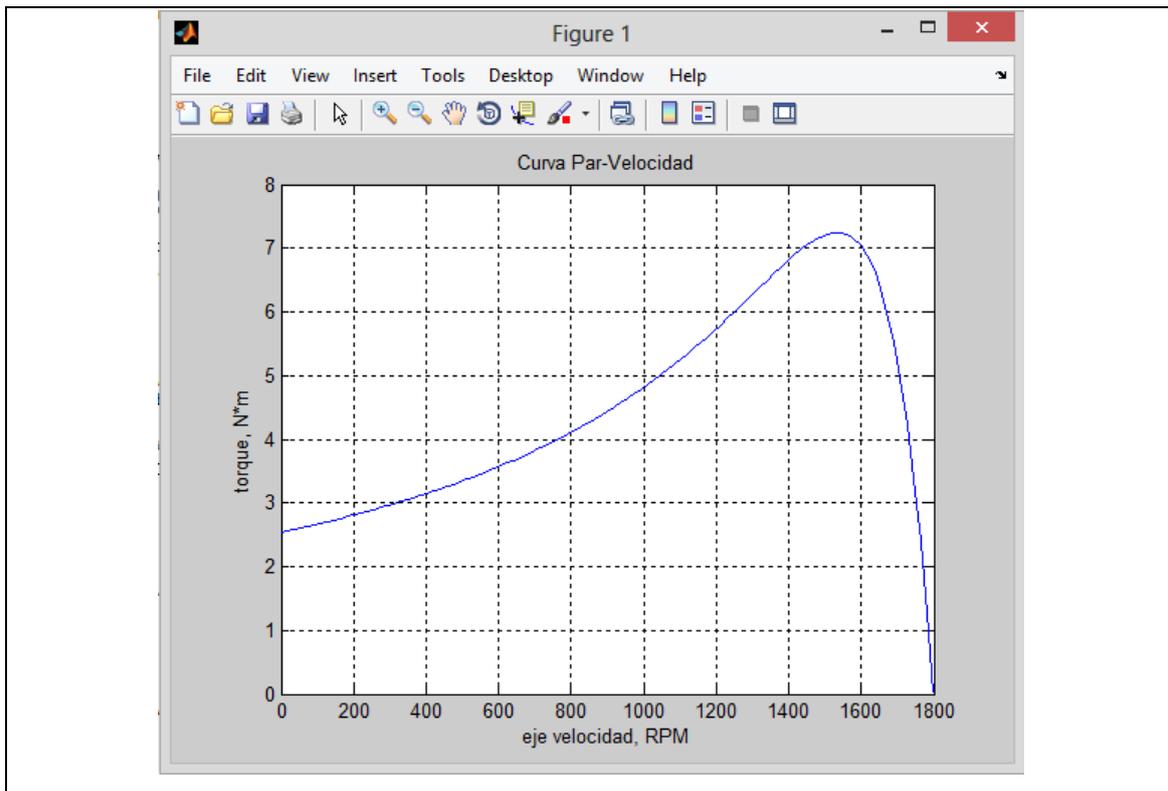


**Figura 6.1** Circuito equivalente motor de inducción.

### 6.1.3 Curva del Par –Velocidad del motor

Con la finalización de los parámetros del circuito equivalente, se prosigue con la elaboración de la curva Par vs. Velocidad, para la cual se aplicó el algoritmo matemático de Matlab que se muestra a continuación:

Este algoritmo generó la siguiente grafica de la figura 6.2,



**Figura 6.2** Curva Par vs Velocidad del motor.

Con el fin de poder calcular la pendiente del rango de operación del motor, se realizó un acercamiento sobre las misma, ver figura 6.3.

Seguidamente se procede a calcular el valor de la pendiente de la gráfica, debido a que es necesario para completar la función de transferencia del motor de inducción:

$$m = \frac{4 - 0}{1731 - 1800} = -0.05797 \quad (6.1)$$

#### 6.1.4 Función de transferencia en velocidad de un motor inducción

Dentro de las variables de entrada a considerar están:

- Variable de entrada: tensión aplicada al motor.
- Variable de salida: velocidad en el eje del motor.

Según la información del libro de Dorf y Bishop (2005, pág. 65) [11], la función de transferencia en velocidad de un motor de inducción de corriente alterna está dada como:

$$\frac{W(s)}{V_c(s)} = \frac{Km}{1 + \tau s} \quad (6.2)$$

$$\tau = \frac{J}{(b - m)} \quad (6.3)$$

donde:

W(s) = Velocidad del eje del motor.

V<sub>c</sub>(s)= Tensión aplicada.

Km= Ganancia de velocidad nominal del motor.

S=Variable de la transformada de Laplace.

m= Pendiente de la curva Par-Velocidad linealizada (normalmente negativa)

J=Inercia del motor.

b=Coeficiente de fricción del cojinete de fricción del motor.

### 6.1.5 Variables de la función de transferencia

Para poder simular la función de transferencia, es necesario conocer las variables que forman partes de esta, las cuales se pueden observar en la tabla 6.4.

**Tabla 6.4** Variables de la función de transferencia.

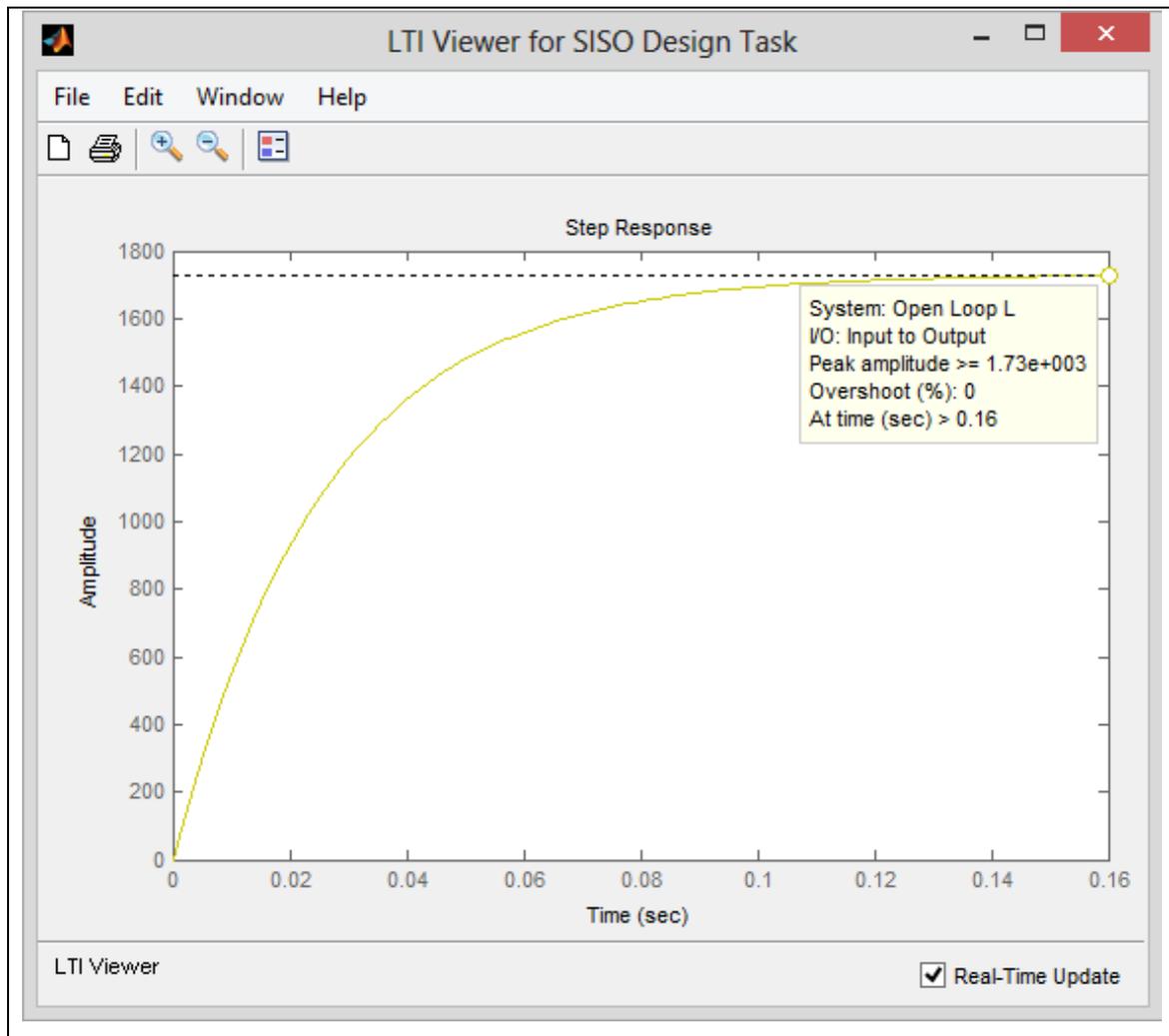
V <sub>c</sub> (S)	Km	M	J
230 V	1730 RPM	0.05797	0.0015

$$\tau = \frac{0.0015}{(0 - (-0.05797))} = 0.026 \quad (6.4)$$

Con base en la ecuación 6.2, se tiene que:

$$\frac{W(s)}{V_c(s)} = \frac{1730}{1 + 0.026s} \quad (6.5)$$

Como consecuencia, el sistema modelado en velocidad evidencia un cierto error ante una entrada escalón en lazo abierto. Provocando que en lazo cerrado, la velocidad de salida nunca alcance exactamente la velocidad específica de referencia. Como se puede observar en la figura 6.3, se trata de un sistema de primer orden, por lo que su respuesta ante entrada escalón no refleja sobreoscilación.



**Figura 6.3** Respuesta a lazo abierto antes entrada escalón.

Al carecer de sobreoscilación junto con el tiempo de establecimiento adecuado, son los responsables que hacen que se consideren las prestaciones dinámicas aceptables. Además, se sabe que el tiempo de establecimiento ante entrada escalón para un sistema de primer orden se calcula como:

$$t_s = 3 * T \quad (6.6)$$

Donde T es la constante de tiempo del sistema, o mejor dicho, es el instante en el que la tangente a la señal de salida en el origen corta a la asíntota horizontal del valor final, o es el tiempo que tarda la salida en alcanzar el 63.2% del valor final.

### 6.1.6 Control en velocidad

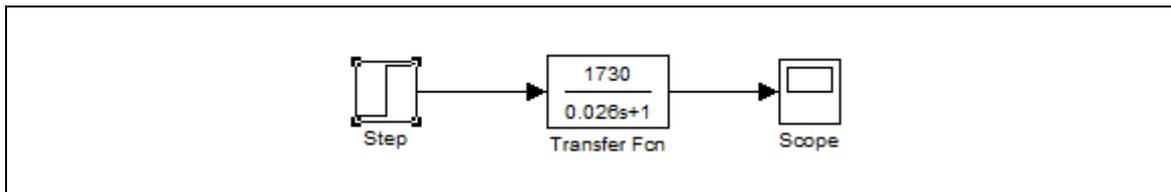
Se parte de la función de transferencia en velocidad, en este caso es la siguiente:

$$G_{vel}(s) = \frac{W(s)}{V_c(s)} = \frac{1730}{1 + 0.026s} \quad (6.7)$$

Seguidamente se analizará el sistema anterior, para obtener las condiciones dinámicas y estáticas tanto en lazo abierto como en cerrado.

### 6.1.6.1 Análisis en lazo abierto

Para empezar el análisis en lazo abierto ante una entrada escalón, se considera el siguiente esquema en Simulink:



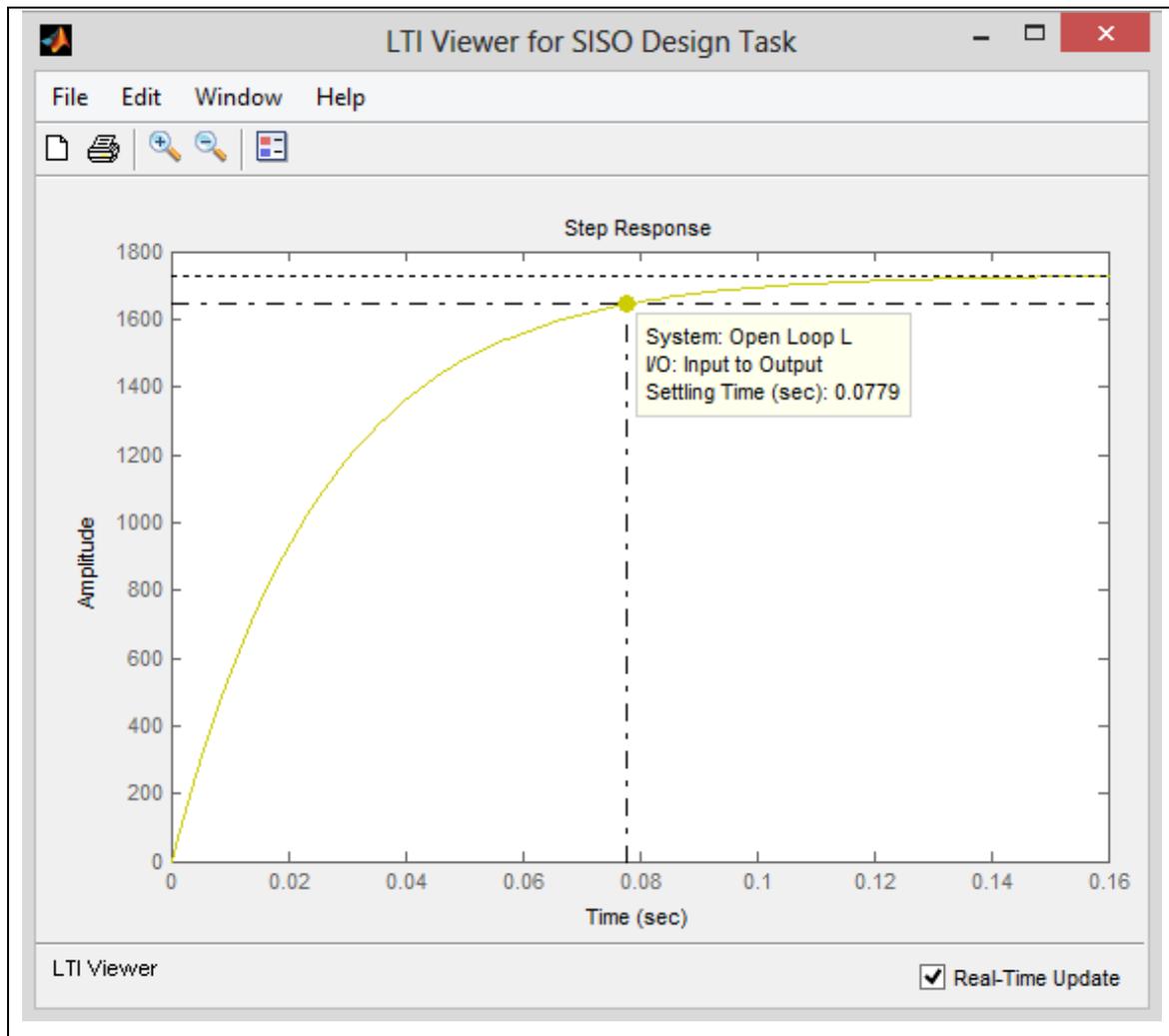
**Figura 6.4** Esquema en lazo abierto ante entrada escalón.

Se procede a calcular el valor en régimen permanente ante una entrada escalón de 1V, en este caso el valor de salida en régimen permanente coincide con la ganancia del sistema:

$$y_{final} = \lim_{s \rightarrow 0} G(s) \cdot U(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot G(s) \cdot \frac{u}{s} = G(0) \cdot u \quad (6.7)$$

$$y_{final} = \frac{1730}{0+1} \cdot 1 = 1730 \quad (6.8)$$

Además se calcula el tiempo de establecimiento, el cual es el tiempo que tarda la salida del sistema en entrar en una banda de  $\pm 5\%$  del valor final. Para este caso, como el sistema es de primer orden no presenta sobreoscilaciones, el tiempo de establecimiento es el instante en el que la salida alcanza el 95% del valor final, es decir:



**Figura 6.5** Respuesta a lazo abierto ante entrada escalón.

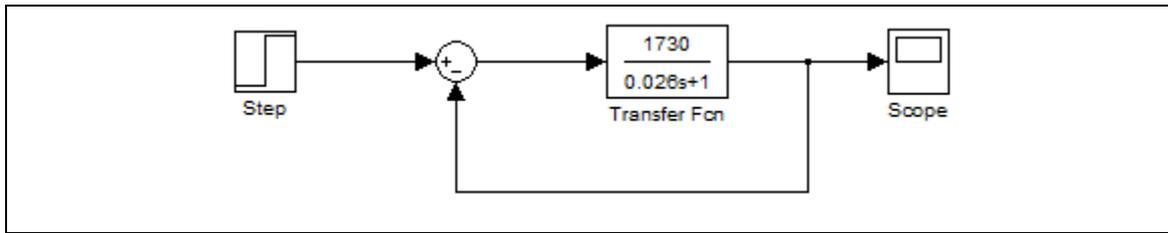
Como se puede observar en la figura 6.5, el tiempo de establecimiento anda cercano a 0.0779seg. Para nuestro caso la constante de tiempo es de 0.026seg redondeando a dos decimales:

$$t_s = 3 \cdot 0.026 = 0.078\text{seg} \quad (6.9)$$

El tiempo de establecimiento calculado está bastante similar al obtenido en la simulación de lazo abierto.

#### 6.1.6.2 Análisis en lazo cerrado

Para empezar el análisis, partimos del siguiente esquema:



**Figura 6.6** Esquema en lazo cerrado ante entrada escalón.

Como se puede observar en la figura 6.6, se presenta el esquema completo de un sistema a lazo cerrado, en donde se presenta una realimentación unitaria negativa, modificando la función de transferencia como:

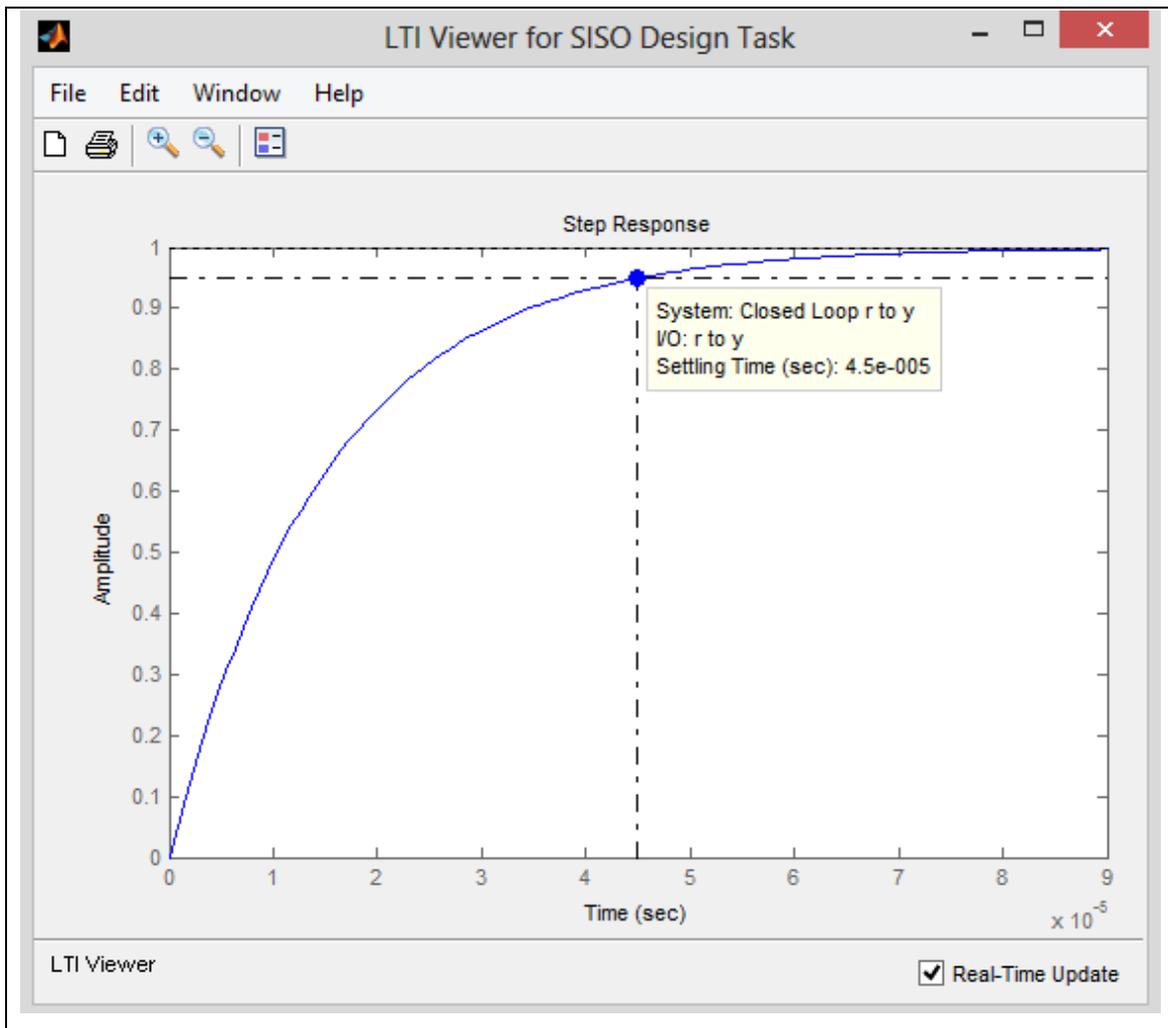
$$M(s) = \frac{G(s)}{1+G(s)} = \frac{\frac{1730}{0.026s+1}}{1+\frac{1730}{0.026s+1}} = \frac{0.9994}{1+0.000015s} \quad (6.10)$$

Lo primero que se debe calcular es el valor en régimen permanente:

$$y_{final} = G(0) \cdot u = \frac{0.9994}{1+0} \cdot 1 = 0.9994 \quad (6.11)$$

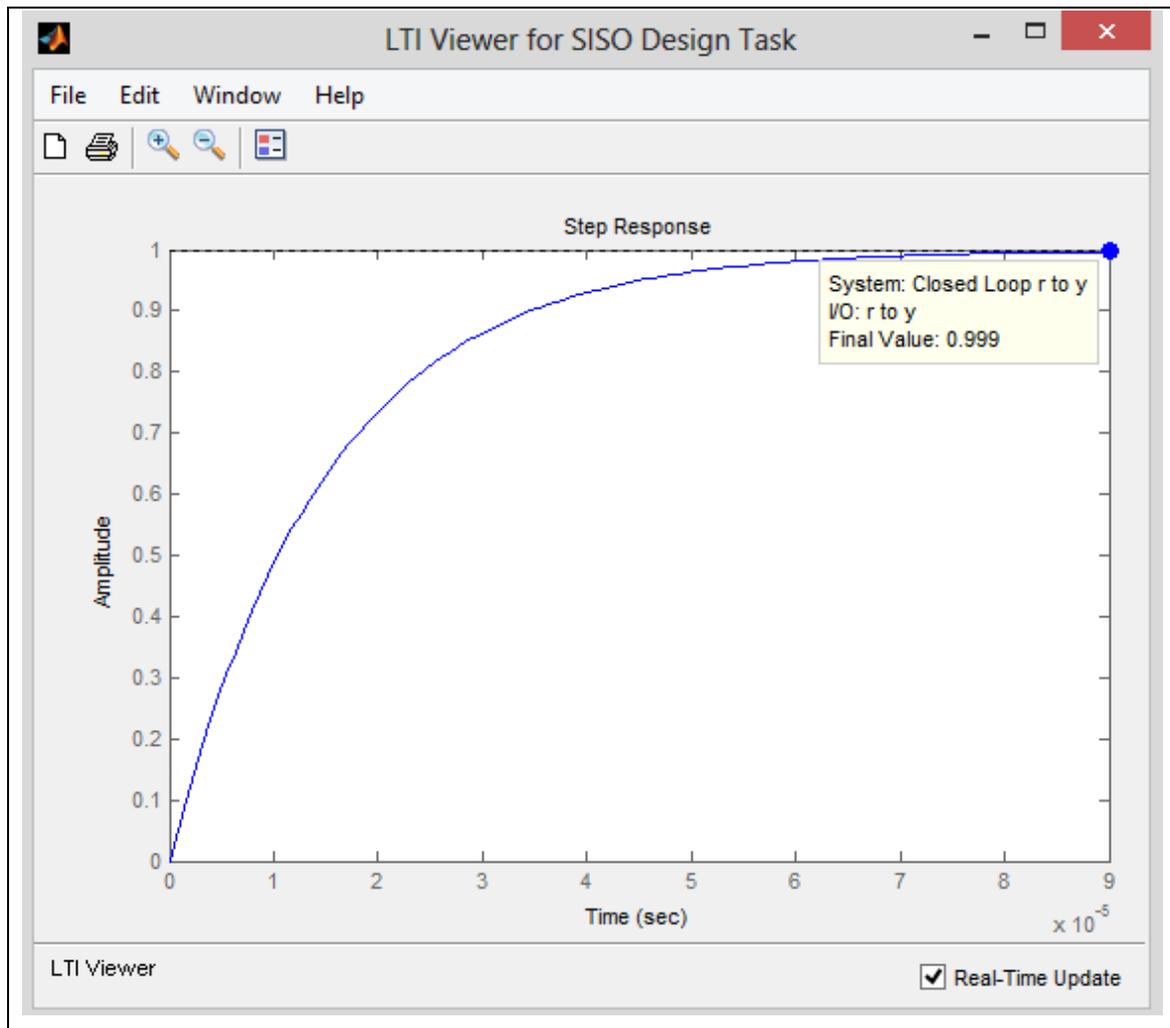
Seguidamente, se calcula el tiempo de establecimiento al 5%, pero antes hay que señalar que la constante de tiempo del sistema es de  $T=0.000015$  seg, con esto se calcula:

$$t_s = 3 * 0.000015 = 0.000045 \text{seg} \quad (6.12)$$



**Figura 6.7** Respuesta a lazo cerrado ante entrada escalón.

Analizando los resultados de tiempo de establecimiento calculado, se puede decir que está bastante semejante al de la simulación de la figura 6.7.



**Figura 6.8** Error estado estacionario a lazo cerrado.

De forma general las condiciones dinámicas obtenidas son aceptables, pues el tiempo de establecimiento es pequeño. Por otra parte las condiciones estáticas no son las más aceptables posible, pues presentan error en régimen permanente; debido a que se está trabajando con un sistema de primer orden, evidenciando un error ante una entrada escalón tal como se puede observar en la figura 6.8.

Dicho error se calcula de forma muy sencilla mediante la siguiente expresión:

$$e_p = \frac{1}{1 + k_p} \quad (6.13)$$

donde:

$$k_p = \lim_{s \rightarrow 0} G(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1730}{1 + 0.026s} = 1730 \quad (6.14)$$

entonces,

$$e_p = \frac{1}{1+1730} = 0.000578 \quad (6.15)$$

Por ultimo calculamos el error mediante los datos de la simulación de la figura 6.8:

$$Error = referencia - valor\_final = 1 - 0.9994 = 0.0006 \quad (6.16)$$

Se puede notar que ambos datos coinciden, a continuación vamos a probar distintos reguladores para eliminar o disminuir dicho error.

### 6.1.7 Diseño del sistema de control en Matlab.

Para empezar el análisis del sistema de control, hay que identificar el método a implementar para obtener los valores del controlador.

#### 6.1.7.1 Método de ubicación de polos

Se trabajará el método de ubicación de polos de Persson, a partir de este modelo se obtendrán los parámetros requerido por un controlador PI para la planta de primer orden.

#### 6.1.7.2 Parámetros de un controlador PI por ubicación de polos

En la figura 6.9, se puede observar el diagrama de bloques completo del sistema a controlar.

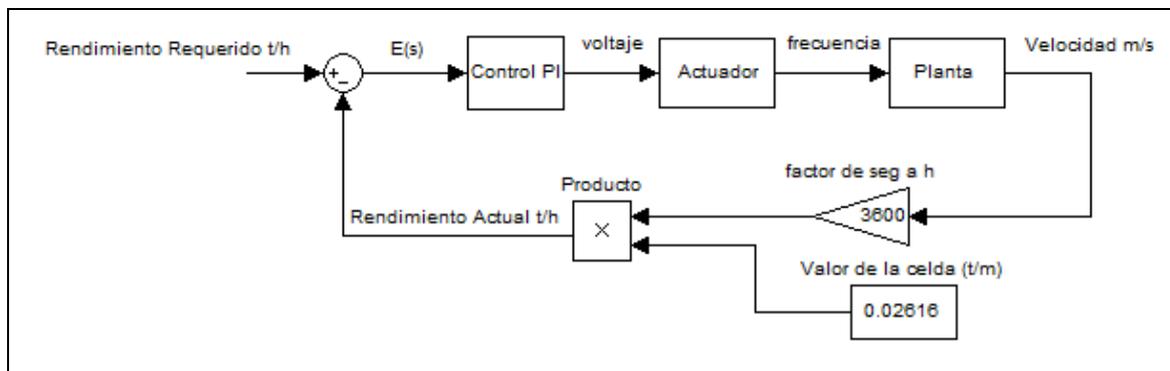


Figura 6.9 Diagrama de bloques de sistema.

El control, es un control PI con una planta de primer orden y una realimentación no unitaria, basada en el producto de la velocidad y el peso de sensor de celda de pesaje. Seguidamente se obtendrá la función de transferencia a lazo cerrado, donde  $G_P(s)$ ,  $G_{PI}(s)$  y  $H(s)$  corresponde a la función de transferencia de la planta, el controlador PI y la parte de retroalimentación no unitaria negativa respectivamente.

$$G_p(s) = \frac{K_p}{1 + s \cdot T_L} \quad (6.17)$$

$$G_{PI}(s) = K_{pr} \left( 1 + \frac{1}{s \cdot T_i} \right) \quad (6.18)$$

$$H(s) = k \quad (6.19)$$

Una vez definido las diferentes partes del sistema a controlar, se procede a calcular la función de transferencia a lazo cerrado:

$$T(s) = \frac{G_p(s) \cdot G_{PI}(s)}{1 + H(s) \cdot G_p(s) \cdot G_{PI}(s)} \quad (6.20)$$

Los polos de lazo cerrado pueden ser ubicados escogiendo la ganancia del controlador y su tiempo integral. Los polos de lazo cerrado son las raíces del denominador de la ecuación anterior; es decir es el polinomio característico ( $p(s)=1+H(s) \cdot G_p(s) \cdot G_{PI}(s)=0$ ), para este caso el polinomio característico queda como:

$$s^2 + \left( \frac{1}{T_L} + \frac{k \cdot K_p \cdot K_{pr}}{T_L} \right) \cdot s + \frac{k \cdot K_p \cdot K_{pr}}{T_L \cdot T_i} = 0 \quad (6.21)$$

Si se desea que los polos de lazo cerrado tengan una razón de amortiguamiento  $\xi$  y una frecuencia natural  $\omega_n$ , entonces el polinomio característico debe ser igual al denominador de la ecuación 6.20 (sistema de segundo orden subamortiguado):

$$p(s) = s^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2 \quad (6.22)$$

Igualando las ecuaciones 6.21 y 6.22 se obtienen:

$$2 \cdot \xi \cdot \omega_n = \frac{1}{T_L} + \frac{k \cdot K_p \cdot K_{pr}}{T_L} \quad (6.23)$$

$$\omega_n^2 = \frac{k \cdot K_p \cdot K_{pr}}{T_L \cdot T_i} \quad (6.24)$$

Despejando los parámetros del controlador:

$$K_{pr} = \frac{2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot T_L - 1}{k \cdot K_p} \quad (6.25)$$

$$T_i = \frac{2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot T_L - 1}{T_L \cdot \omega_n^2} \quad (6.26)$$

Se observa en estas ecuaciones 6.25 y 6.26 que para obtener valores positivos de ganancia y el tiempo integral se debe cumplir que:

$$\omega_n \cdot \tau > \frac{1}{2 \cdot \xi} \quad (6.27)$$

### 6.1.7.3 Sistema de control PI a implementar

Considerando las condiciones de diseño de  $M_p < 5\%$  y  $t_s < 0.5$  seg al 2%,  $T_L=0.000015$  seg,  $k=94.176$  (que es contante proveniente del sensor de peso multiplicado por 3600 seg para que el sistema presente las mismas unidades) y  $K_p=0.9994$ , se procede a calcular los valores del control PI:

$$K_{pr} = \frac{(2 \cdot 0.8 \cdot 0.000015) - 1}{94.176 \cdot 0.9994} = -0.010624536 \quad (6.28)$$

$$T_i = \frac{(2 \cdot 0.8 \cdot 0.000015) - 1}{0.00015 \cdot 1.15925^2} = -49607.13077 \quad (6.29)$$

### 6.1.8 Instalación de los dispositivos

Por otra parte se tiene la instalación de los equipos en la planta, los cuales se muestran a continuación:



**Figura 6.10** Boquilla de salida Tolva báscula de cascarilla de arroz.

En la figura 6.10, se visualiza la boquilla de salida de la tolva, la cual es utilizada para calcular el área transversal, del material que será transportada en la cinta.



**Figura 6.11** Servomotor de accionamiento de la cinta.

El servomotor de la figura 6.11, se instaló con el objetivo de accionar el movimiento de la cinta transportadora de la tolva, el cual es controlado por el PowerFlex70 que está ubicado en el cuarto de control.



**Figura 6.12** Rodillo de pesaje.

Como se puede observar en la figura 6.12, la forma del rodillo de pesaje sobre la celda de carga, utilizado para pesar el material sobre la cinta.



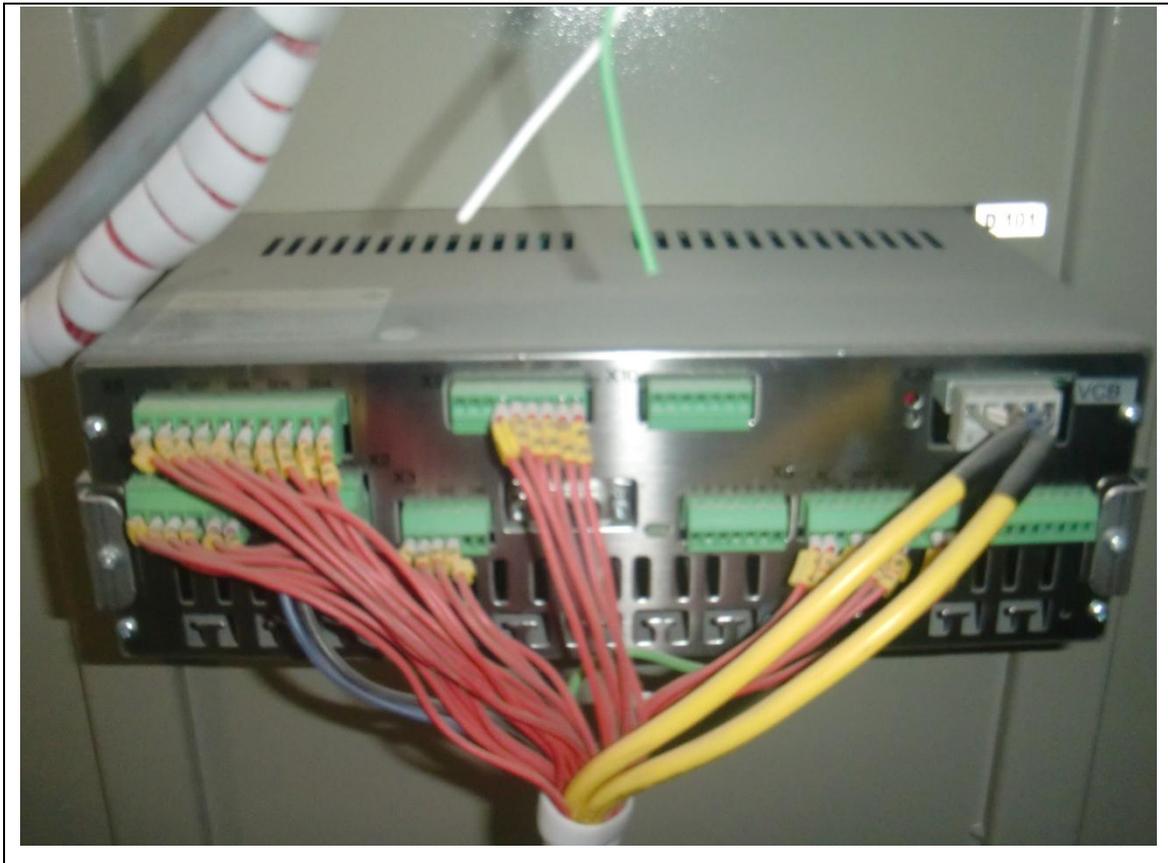
**Figura 6.13** Panel de control de la báscula en el cuarto de control.



**Figura 6.14** INTECONT PLUS en el panel de control.

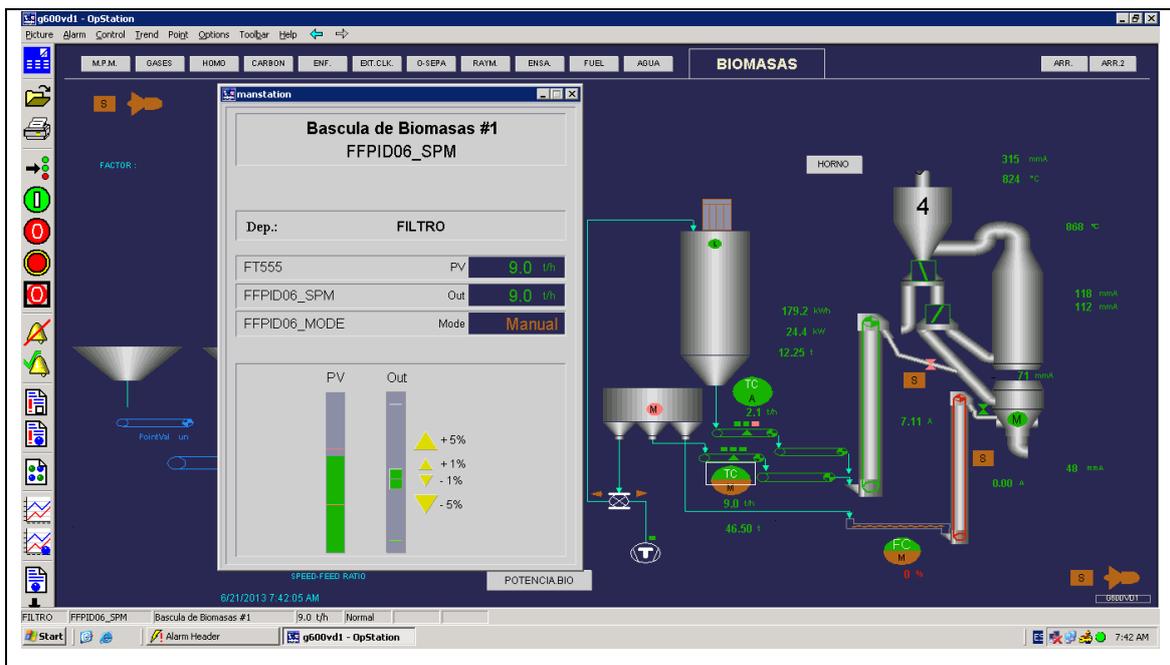


**Figura 6.15** Vista interna del panel de control instalado.



**Figura 6.16** Conexión de entradas y salidas del INTCONT PLUS.

### 6.1.9 Interfaz Gráfica



**Figura 6.17** Interfaz gráfica de la báscula dosificadora en la sala de control.

Como se puede apreciar, en la figura 6.20 se representa la interfaz programada según el software de ejecución de la planta CEMEX.

## 6.2 Análisis

Para poder comentar los objetivos alcanzados del proyecto, se parte de las limitaciones y las restricciones que este presentó. Primero se debe mencionar que el sistema actual es un sistema de control secundario, en donde lo que importa es que el sistema siga la entrada de referencia establecida por el operario de sala, no depende de ninguna temperatura y de ningún tiempo de retardo, además en la empresa ya tiene instalado un equipo que no funciona de acuerdo a las especificaciones deseadas, especialmente en la precisión de la cantidad de cascarilla transportada durante un lapso de tiempo deseado. Por lo cual, la empresa ya tiene conocimiento del equipo que se tiene que instalar y programar. La restricción del rango de trabajo de la báscula de cascarilla debe ser entre 1 a 10 t/h, debido a las características del material a transportar.

Para empezar debido a que el material a transportar es muy liviano, se debe escoger un grosor de cinta delgada, ya que en el momento en que el material pase sobre la celda de pesaje presente sensibilidad, luego la escogencia de la celda de pesaje también juega un papel muy importante en el diseño del sistema a controlar, por eso anteriormente se realizaron unos cálculos del peso aproximado según el área transversal del material en un metro de la cinta, a esto hay que sumarle el peso de las partes móviles como rodillos y el peso de la cinta transportadora. Todo esto con el objetivo de poder escoger el tipo que celda que mejor se ajuste según nuestro sistema a controlar.

Se deben reemplazar los rodillos de medición ubicados en la zona de pesaje, ya que actualmente no garantizan el TIR de 0.2 mm (excentricidad) mínimo requerido para la correcta medición y adicionamiento el pesador debe tener la configuración en la punta del eje para un ajuste correcto del módulo de pesaje. Con respecto a la cinta, debe ser de caucho y estar en buen estado.

Con respecto al INTECONT PLUS, que es un equipo empleado para sistemas de medición, con software para sistemas de pesaje, el cual presenta una serie de características especificadas en el anexo, con respecto a la programación se utiliza el software Easy Serve tanto para mantenimiento como para la parametrización el cual se realiza en la pantalla de Windows donde se muestran los campos de introducción de datos, según especificaciones de CEMEX y de los equipos a controlar. Además nos permite la configuración del set-point o valor de consigna a dosificar; el cual se puede fijar localmente a través del teclado del INTECONT, remotamente a través de una señal 0/4-20 mA desde el PLC con comunicación a través de bus de campo DeviceNet. Además el INTECONT tiene funciones importantes como tara y puesta a cero, los cuales son herramienta de calibración.

Se alcanzó la instalación correcta del INTECONT PLUS, con todas las salidas y entradas estipuladas según el manual del fabricante así como la calibración y parametrización de este, además se logró establecer la comunicación de bus de datos de DeviceNet, con el objetivo de tener dos modos de operación manual y automático; si el modo es automático el PLC carga el dato de set-point al INTECONT vía DeviceNet para que este realice el ajuste de velocidad de la cinta, mientras si fuese el modo manual en el PLC se programó un PI de control, el cual lee el dato de set-point y el dato del rendimiento actual calculado en el INTECONT, aplica el PI el cual tiene como variable de salida el control de la velocidad del motor, este dato se comunica con el PowerFlex 70 el cual lo interpreta y ajusta la velocidad del motor.

Por otra parte la instalación y programación del variador de frecuencia PowerFlex70 se logró completar en un 100%, en donde se programaron los parámetros requeridos según la características del motor, así como restricciones del sistema a controlar y especificaciones de CEMEX con la ayuda del ingeniero a cargo del proyecto.

A manera de resumen, como se puede observar en la figura 6.19, se logró establecer la comunicación entre los equipos implementados, así como obtener la visualización de los datos reales de campo en la sala de operación, según especificaciones de la planta CEMEX. Cabe mencionar que también se alcanzó la investigación previa de los diferentes equipos utilizados, con fines de tener una buena documentación de información de los equipos utilizados según especificaciones del asesor de la planta.

## Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

### 7.1 Conclusiones

- Se logró un control automático eficiente en la báscula de dosificación de cascarilla, con base al rendimiento establecido en t/h.
- Se realizó la programación de PowerFlex70 según las especificaciones del diseño.
- Con la inserción de un modo manual y uno automático al sistema, se alcanza un mayor control sobre la velocidad de la cinta, además de brindar mayor seguridad al operario, ya que con este sistema no es necesario tanto contacto físico, con la ayuda del control del INTECONT y PLC.
- Se alcanzó la modulación del sistema a controlar (velocidad del motor de inducción) con la ayuda de matlab.
- Se realizaron las pruebas necesarias con matlab al sistema de control modulado con fines de corroborar su buen funcionamiento.
- Con respecto a la medición de la cantidad transportada de cascarilla, se logra estar dentro del rango establecido según CEMEX.
- Se logró la instalación de los rodillos de medición según las especificaciones de diseño, considerando el tipo de material a transportar.
- Se logró establecer la comunicación de vía DeviceNet entre el PLC y el INTECONT PLUS.
- En general se alcanzó lo establecido por la plata en instalación, investigación y programación de todos los equipos de la modernización de la báscula cascarilla de arroz.

### 7.2 Recomendaciones

Antes de la puesta en marcha de los equipos es recomendable, leer las hojas de datos en general, para analizar y confirmar que las conexiones y configuración son las correctas según el fabricante.

Con el uso de la báscula, surge la necesidad de calibración, para ello utilice las herramientas del INTECONT PLUS como tara y puesta en cero, utilizando pesas de pruebas según especificaciones del fabricante.

Debido la tecnología existe en la plata CEMEX, solo se puede correr o ejecutar el sistema de interfaz en Windows 98 o XP profesional service pack 2 en inglés.

## Bibliografía

[1] Rockwell Automation, “Descripción general del sistema, Allen-Bradley” [en línea].

<[http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/so/1747-so001\\_-es-p.pdf](http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/so/1747-so001_-es-p.pdf)> [Consulta: 11 de febrero de 2013]

[2] Chapman, Stephen J. “Máquinas eléctricas”. 3ª Ed. México. Mc Graw-Hill, 1988.

[3] Rockwell Automation, “PowerFlex70, Allen-Bradley” [en línea].

<[http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/20a-um001\\_-es-p.pdf](http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/20a-um001_-es-p.pdf)> [Consulta: 11 de febrero de 2013]

[4] Universidad Rafael Urdaneta, “Diseño y construcción de un prototipo de controlador Proporcional, Integral, Derivativo (PID) Retroalimentación, basado en micro-controlador, para el arranque y frenado en rampa de velocidad de motores de inducción trifásicos hasta 5 HP” [en línea].

<<http://200.35.84.131/portal/bases/marc/texto/2201-08-02342.pdf>> [Consulta: 11 de febrero de 2013]

[5] Universidad de Magallanes, “Control de velocidad de motores trifásicos conectados en cascada utilizando el PLC Siemens Simatic S7-200, CPU 222” [en línea].

<<http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4517/1/CD-4139.pdf>> [Consulta: 11 de febrero de 2013]

[6] Rice Lake Weighing Systems, “Load cell weigh module handbook” [en línea].

<<https://www.google.co.cr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&ved=0CDgQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.dataweigh.com%2Fshared%2Fpdf.asp%3FUploadID%3D2958&ei=z9nIUcOXF4TG9gTN74CIDA&usg=AFQjCNFUHoyOiHMAUSdnlZnH7tv39tVtLQ&sig2=PDyD0o64zfjyK1b7vYMrPw&bvm=bv.48293060,d.eWU>> [Consulta: 11 de febrero de 2013]

[7] Escuela Superior Politécnica Del Litoral, “Software para Diseño de transportadores de Banda [en línea].

<[http://www.cib.espol.edu.ec/Digipath/D\\_Tesis\\_PDF/D-27768.pdf](http://www.cib.espol.edu.ec/Digipath/D_Tesis_PDF/D-27768.pdf)> [Consulta: 15 de mayo de 2013]

[8] Rockwell Automation, “Control de accionamientos integrado, Allen-Bradley” [en línea].

<<http://tv.uvigo.es/uploads/material/Video/1118/6.pdf>> [Consulta: 15 de mayo de 2013]

**[9]** Instituto Tecnológico de Costa Rica, “Diseño e implementación de un sistema hidráulico de presión constante, Escuela de Ingeniería Electrónica” [en línea].

<[http://bibliodigital.itcr.ac.cr:8080/xmlui/bitstream/handle/2238/738/Informe\\_Final.pdf?sequence=1](http://bibliodigital.itcr.ac.cr:8080/xmlui/bitstream/handle/2238/738/Informe_Final.pdf?sequence=1)> [Consulta: 15 de mayo de 2013]

**[10]** Kuo, Benjamín C. Sistemas de control automático. 5ª Ed. México, Prentice-HALL HISPANOAMERICANA, 1996.

**[11]** Richard C. Dorf, Robert H. Bishop. “Sistemas de Control Moderno”. 10ª Ed. Madrid, Prentice-HALL HISPANOAMERICANA, 2005.

## Anexos

### Anexo A.1

#### Glosario

- **Ladder:** Término utilizado para describir el tipo de programación de los PLC's, cada escalera o ladder es un archivo en el programa.
- **Scan:** Ciclo de ejecución o barrido de la lógica de programación.
- **Sensores:** Dispositivo capaz de transformar magnitudes físicas o químicas en magnitudes eléctricas.
- **Tag:** se utiliza mucho en la programación, es una etiqueta para tener la identificación de un objeto ya programado, o sea, son un grupo de parámetros que definen una dirección del controlador.

#### Abreviaturas

- **HMI:** Human-Machine interface.
- **PLC:** Programable Logic Controller.
- **PI:** Proporcional-Integral.

### A.4 Información sobre la planta

Planta CEMEX Colorado Abangares Costa Rica:

#### A.4.1 Descripción de la empresa

CEMEX es una planta encargada de la producción y embasamiento de cemento, está ubicada carretera al Puente la Amistad sobre el Rio Tempisque, Colorado de Abangares, Guanacaste. Cuenta con un Departamento de Instrumentación Eléctrica.

#### A.4.2 Descripción del departamento de Instrumentación Eléctrica.

Como su nombre lo dice es el encargado de resolver fallas eléctricas, tanto en equipos como instalaciones, tienen una buena área de trabajo, equipado con equipo tecnológico de acuerdo a las necesidades de la planta, su personal es íntegro y responsable.

### Anexo B.1

Equipo a utilizar según especificaciones de la empresa, además da las características de la celda de carga:

- Piezas complementarias soporte Módulos de pesaje a chasis del equipo.
- Celdas de carga tipo PWS con las siguientes características:
  - ✓ Valor característico nominal 2 " 0,002 mV/V
  - ✓ Error combinado 0,03 %
  - ✓ Gama de temperatura nominal comp. -10 a +40 EC

- ✓ Temperatura de uso -30 a +70 EC
- ✓ Tensión de alimentación. máxima. 15 V
- ✓ Resistencia de entrada min 350  $\Omega$
- ✓ Resistencia de salida 350  $\Omega$
- ✓ Resistencia de aislamiento 5000 M $\Omega$
- ✓ Carga límite referida a carga nominal 150 %
- ✓ Carga máxima admisible, referida a carga nom. 300 %
- 1 Caja de conexiones para las celdas de carga FAK080.
- 3 rodillos scale quality, para el nuevo puente de pesaje, uno de estos pesador.
- 1 Sensor para la medición de velocidad tipo Namur FGA10 instalado en el eje del motor.
- 1 caja de mando local VLG 20100.
- Un motorreductor AC.
- Un INTECONT PLUS con características:
  - ✓ Módulo compacto para sistemas de medición continua.
  - ✓ Pantalla a color de alta resolución LCD-Display
  - ✓ Display de servicio con teclado integrado, frontal IP65. Pantalla fluorescente de dos líneas con 22 caracteres cada una, altura de los caracteres 6mm
  - ✓ Óptima estructura de comunicación gracias a la tecnología modular de buses de campo.
  - ✓ Software Easy Serve para calibración y servicio.
  - ✓ Fuente de 24VDC +30% / -25%. Consumo 20VA, integrada.
  - ✓ Entrada de velocidad (RPM) NAMUR 0.04 – 3000Hz; Entrada de celda (R Min 80 $\Omega$ , Longitud máxima de cable 500m); contacto libre (24V, 5mA); tres entradas digitales libres de potencial (24V, 5mA)
  - ✓ 3 salidas de relé (máx. 230V, 8 A carga óhmica, 1 A de carga inductiva); una salida analógica libre de potencial 0/4...20mA, máx. 11V); una salida de pulsos para el contador totalizador (24V / 100mA).
  - ✓ Interface RS232 para PC de servicio
  - ✓ Tarjeta de comunicación DeviceNet

#### Software:

VBW 20100 para básculas de cinta, instalado en el Intecont. Easy Serve para mantenimiento y servicio. El software está instalado y comprobado en las correspondientes unidades de control. La parametrización se efectúa con el programa EASY SERVE en pantalla de Windows y campos de introducción de datos. El software EASY SERVE funciona en cualquier laptop.