

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FIE
Facultad de
Ingeniería Eléctrica

TRABAJO DE DIPLOMA

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales

Título Evaluación de la automatización en la Fábrica de Cementos de Cienfuegos.

Autores Luis Javier Junco Pérez.

Tutores Dr. Francisco Herrera Fernández.

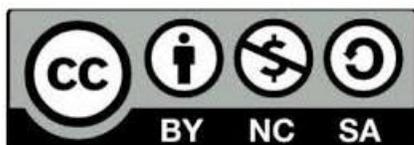
Ing. Dasiel Alba González.

Santa Clara, julio 2018
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubián” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

PENSAMIENTO

“Muchos de los fracasos de la vida son de personas que no se dieron cuenta de lo cerca del éxito que estaban cuando se rindieron”.

Thomas A. Edison.

DEDICATORIA

*A mi mamá y abuela,
A mi papá y mi hermano,
A mi taira,
Al resto de mi familia y amigos
A mis tutores.*

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Dios y a la vida por las oportunidades que me brindó a lo largo de la carrera y por permitirme llegar al final de esta etapa.

A mi mamá, por todo el apoyo incondicional, por la fortaleza que me transmitió en los momentos difíciles y por creer 100% en mis capacidades y cualidades.

A mi abuela y a mi papá por su apoyo incondicional.

A mi Taira querida que con su amor y apoyo incondicional durante todos estos años hizo todo esto posible, por acompañarme y apoyarme constantemente.

A todos mis amigos por estar presentes en este proceso en las buenas y las malas.

A mi suegra por apoyarme y aconsejarme en todo momento.

A mis tutores Ing. Dasiel Alba y Dr. Francisco Herrera por brindarme su tiempo, dedicación y aporte al desarrollo de esta investigación. Por ofrecer su experiencia y conocimientos.

Al claustro de profesores de la FIE, por contribuir a mi formación y en especial a la profesora María del Carmen por brindarme su apoyo incondicional en momentos difíciles.

A la Empresa Cementos Cienfuegos S.A y a todas las personas que hacen parte de esta, por permitirme realizar la investigación suministrándome toda la información necesaria para el desarrollo de la misma y por todas aquellas experiencias vividas que me hicieron aprender y crecer tanto en el aspecto personal como en el aspecto profesional.

RESUMEN

El empleo de metodologías encaminadas a la evaluación de la automatización en diversas industrias es una novedosa técnica que ofrece ventajas significativas a la hora de llevar a cabo un proyecto de automatización. En este trabajo se desarrolla una metodología que sirve de base para el análisis y diseño de los sistemas de automatización integrada como apoyo a la toma de decisiones en la planificación y control de los procesos productivos en la Empresa de Cementos Cienfuegos S.A. El método aplicado posibilita presentar una caracterización de la automatización existente en los principales procesos productivos directos de la empresa determinando parámetros como nivel y grado de automatización, grado de regulación, grado de observación y grado de dirección.

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN	iv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. Fundamentos teóricos de la evaluación de la automatización.....	6
1.1 Fundamentos de la automatización.	6
1.1.1 Reseña histórica de la automatización.	6
1.1.2 Necesidad de la automatización.....	7
1.1.3 Objetivos de la automatización.....	8
1.1.4 Ventajas de la automatización.	9
1.1.5 Factores a tener en cuenta previos a una automatización.	10
1.2 Sistema Automatizado: Definición y funciones principales.	10
1.3 Clasificación de los niveles de automatización.....	11
1.4 Métodos de evaluación de la automatización.....	13
1.4.1 Generación de la automatización basada en el empleo de PLC.	13
1.4.2 Diagnóstico del nivel de automatización en medianas y pequeñas industrias en la ciudad de Cuenca, España.....	16
1.5 Otros métodos empleados.	17
1.6 Descripción del método a utilizar.	19
1.7 Consideraciones finales del capítulo.....	25
CAPÍTULO 2. Descripción del funcionamiento y la estructura de la automatización de los procesos productivos en la Fábrica de Cementos Cienfuegos.	26
2.1 Descripción del proceso tecnológico de fabricación del cemento.	26

2.2	Descripción de la estructura de la automatización del proceso productivo de obtención de crudo.	29
2.3	Descripción de la estructura de la automatización del proceso productivo de obtención de clínker.	31
2.4	Descripción del Sistema de Control Distribuido(DCS) empleado en la industria.	33
2.5	Consideraciones finales del capítulo.	35
CAPÍTULO 3. Aplicación y análisis de resultados del método desarrollado en la Fábrica de Cementos Cienfuegos.		36
3.1	Cálculo de los índices cuantitativos para el proceso de obtención de crudo.	36
3.2	Determinación del nivel y grado de la automatización en el proceso de obtención de crudo.	40
3.3	Cálculo de los índices cuantitativos para el proceso de obtención de clínker.	42
3.4	Determinación del nivel y grado de la automatización en el proceso de obtención de clínker.	48
3.5	Valoración económica y medioambiental.	50
3.6	Consideraciones finales del capítulo.	51
CONCLUSIONES		52
RECOMENDACIONES		53
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		54
ANEXOS		56
Anexo I	Horno de clínker de la Fábrica de Cementos Cienfuegos.	56
Anexo II	Diagrama funcional del horno de clínker de la Fábrica de Cementos Cienfuegos.	57
Anexo III	Guías de calidad para el control de los procesos.	58
Anexo IV	Guías de calidad para el control de los procesos.	59

INTRODUCCIÓN

En la actualidad los procesos industriales son cada vez más complejos, entre sus requerimientos están la optimización de determinados parámetros, como eficiencia energética, productividad, atención a fallos y mayores facilidades operacionales y de mantenimiento y reparación. Debido a esto, la etapa de diseño de una automatización eficiente es decisiva en el logro de este objetivo (Benítez-Pina et al., 2010).

La automatización se ha entendido como una tecnología en la cual se aplican los sistemas mecánicos, electrónicos y computarizados, con el fin de operar y controlar la producción de bienes físicos de consumo, además involucra una gran variedad de sistemas y procesos que se ejecutan con mínima o ninguna intervención del ser humano (Murillo and Hernández, 2013).

La automatización en la industria permite la conjugación de diversas tecnologías con el objetivo de asegurar el control y buen comportamiento de gran variedad de procesos industriales que puedan ser capaces de reaccionar a situaciones imprevistas, logrando un incremento de la productividad, ello se logra racionalizando las materias primas e insumos, reduciendo los costos operativos así como el consumo energético, incrementando la seguridad de los procesos, optimizando el recurso humano de la empresa y mejorando el diagnóstico, supervisión y control de calidad de la producción (Sánchez and Pizarro, 2010).

Un proyecto de automatización se inicia cuando una empresa identifica una oportunidad de mejora dentro de sus procesos productivos susceptibles de ser automatizados. Tal oportunidad puede ser un incremento en la producción, el perfeccionamiento en los atributos y cualidades de alguna línea de productos para enfrentar la competencia de otros proveedores o lo más común, mantener la fabricación y calidad dentro de las normas actuales, pero disminuyendo los costos totales asociados a la producción (Ovalle et al., 2013).

En fin, cualquiera de los motivos anteriores puede ser que desligue una serie de decisiones para iniciar un proyecto de automatización como una herramienta fundamental que permite a las empresas un desarrollo propio, dinámico y competitivo, facilitando la relación entre las diferentes áreas de la organización o empresa. Por lo que es muy importante encontrar una buena metodología o procedimiento adecuado y eficaz, que permita a la industria automatizar bienes de producción (Castro et al., 2005).

Un factor de vital importancia en la confección de un proyecto de automatización para un proceso tecnológico particular consiste en la determinación de cuál o cuáles ventajas económicas se obtendrán una vez que el sistema proyectado esté en funcionamiento. Esto significa que los estudios económicos que se efectúen sobre la automatización de un proceso tecnológico deben constituir uno de los primeros pasos para su introducción (Córdoba, 2006).

Con el fin de evaluar la automatización en varios escenarios internacionales se han desarrollado una serie de metodologías que servirán de base para el presente trabajo. Se desarrolla un método de evaluación basado en 5 pasos: descripción del sistema, diagrama de flujo, descripción de los equipos del sistema, requerimientos del cliente, selección del autómatas programable y programación del PLC; que permite generar una automatización de manera más sencilla (Castro et al., 2005).

Por otra parte, en la investigación "Diagnóstico del nivel de automatización en las pequeñas y medianas industrias de la ciudad de Cuenca" se desarrolla un proyecto basado en la aplicación de encuestas a los trabajadores de pequeñas y medianas industrias de la ciudad de Cuenca, España, con el objetivo de diagnosticar el nivel de automatización existente. Para dicho estudio se establecieron cuatro niveles de automatización: accionamiento manual, semiautomática, automática y computarizada (Sánchez and Pizarro, 2010).

En nuestro país se pueden encontrar también estudios relacionados con el tema, tal como la determinación del grado de la automatización de los accionamientos en la Fábrica de Cementos Cienfuegos. La misma permite establecer una estrategia de automatización que posibilita el aumento del nivel y grado de los accionamientos de esta entidad, a partir de un análisis de algunos CCM (centro de control de motores) que existen en las distintas áreas de la fábrica (Vázquez, 2017).

Tomando como referencia la misma entidad, en (Junco and Martín, 2017) se determinan el nivel y grado de automatización del proceso de obtención de clínker existente en la empresa, para que estos cálculos sirvan como base para un futuro rediseño de la automatización en el proceso antes mencionado con tal de elevar la productividad y la estabilidad de la producción en la fábrica, además de lograr la reducción del consumo de combustibles fósiles con la consecuente disminución de las emisiones de dióxido de carbono, gas causante del efecto invernadero.

La industria de materiales de la construcción y en particular la industria del cemento es objeto de constante atención para su mantenimiento y desarrollo. Es una industria muy exigente en relación a los medios técnicos a emplear, alta consumidora de portadores energéticos y con muy estrecha relación con el medio ambiente por su efecto en el mismo.

Las crecientes exigencias impuestas a la calidad del producto, las unidades de producción cada vez mayores y la elevada presión de costos hacen que los sistemas modernos de automatización se conviertan en un elemento irrenunciable para cualquier fábrica de cemento. Los sectores de la automatización “Afianzamiento de la Calidad” y “Conducción del Proceso” son temas centrales en cualquier plan de inversión y deben ser estudiados en estrecha vinculación con la técnica de proceso y la maquinaria (González et al., 2017).

La competitividad de esta industria, no solo en lo nacional, sino también en la arena internacional requiere particular atención, siendo el nivel y grado de las soluciones de automatización existente o por proyectar para la industria, un factor crítico.

De ahí que se define como **Problema Científico**: Atendiendo a las complejidades dinámicas que caracterizan los procesos tecnológicos de la Fábrica de Cementos Cienfuegos, no se dispone de una estrategia de evaluación y diagnóstico capaz de detectar el nivel y grado de la automatización existente.

La hipótesis de la presente investigación está sustentada por los resultados de la revisión bibliográfica que se presenta en el Capítulo 1.

Hipótesis:

La elaboración y desarrollo de una metodología basada en la aplicación de un método analítico de estimación del nivel y grado de automatización, garantiza conocer el estado de la automatización de los procesos productivos de la empresa.

Con esta investigación se pretende cumplir los siguientes objetivos:

Objetivo general:

Evaluar la automatización en los principales procesos tecnológicos de la línea de producción en la Empresa de Cementos Cienfuegos, que sirva de base para el análisis y diseño de los sistemas de automatización integrada como apoyo a la toma de decisiones en la planificación y control de los procesos productivos en la Empresa.

Objetivos específicos:

1. Revisar analíticamente los métodos de evaluación / clasificar los sistemas de automatización (nivel / grado), comparando el método seleccionado para evaluar un sistema de automatización con otras alternativas.
2. Determinar los Procesos Productivos Directos (PPD) de la cadena de producción, haciendo una caracterización del estado del arte de la automatización de los mismos, enfocado a la calidad de los productos intermedios y finales. (Se excluye los que puedan estar en partes administrativas y otros que no estén directamente vinculados al flujo productivo).
3. Determinar la metodología de evaluación de nivel y grado de automatización más adecuada para aplicar en la Empresa.
4. Desarrollar un método de estimación de nivel y grado para el conjunto completo de PPD.

Para lograr el cumplimiento de los objetivos expuestos anteriormente, se proponen las tareas siguientes:

- Revisión analítica de métodos de evaluación / clasificación de sistemas de automatización (nivel / grado), comparando el método seleccionado para evaluar un sistema de automatización con otras alternativas.
- Determinación de los Procesos Productivos Directos (PPD) de la cadena de producción, haciendo una caracterización del estado del arte de la automatización de los mismos, enfocado a la calidad de los productos intermedios y finales. (Se excluye los que puedan estar en partes administrativas y otros que no estén directamente vinculados al flujo productivo)
- Revisión de los trabajos previos de evaluación de la automatización en la Empresa CCSA.
- Determinación de la metodología de evaluación de nivel y grado de automatización más adecuada para aplicar en la Empresa.
- Determinación para cada PPD de:
 - Los datos básicos.
 - Funciones tecnológicas que se realizan.

- Funciones de automatización (FA) que instaladas operativas (FAO) y no operativas (FANO).
- Desarrollo de un método de estimación de nivel y grado para el conjunto completo de PPD.
- Aplicación de la metodología seleccionada (nivel y grado) para cada PPD.
- Elaboración del informe científico de la investigación.

Los resultados de la investigación poseen una aplicación práctica y teórica de gran trascendencia para la mejora de la automatización de los procesos productivos de la Fábrica de Cementos Cienfuegos. Con esta investigación se obtendrá un diagnóstico de la automatización en cuanto a nivel y grado en los principales procesos tecnológicos directos en la empresa a través de un método analítico de estimación lo cual permitirá un rediseño de la automatización.

Para el desarrollo de esta investigación se proponen tres capítulos, además de las conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos correspondientes. Los temas que se abordan en cada capítulo se encuentran estructurados de la forma siguiente:

CAPÍTULO I: Se dedicará a la fundamentación de las metodologías más generales para la evaluación de las características de los sistemas de automatización ya aplicados en una industria, a su estudio comparativo y sus aplicaciones y a los fundamentos teóricos de la automatización.

CAPÍTULO II: Se describe desde el punto de vista de la estructura de la automatización el proceso productivo de la Empresa de Cementos Cienfuegos. Se explica el proceso y se caracteriza en el contexto nacional e internacional.

CAPÍTULO III: Se aplica el método desarrollado en la Fábrica de Cementos y se dan las conclusiones de los principales indicadores, que caracteriza la automatización en esta empresa. Además, se presenta el análisis económico de la investigación.

CAPÍTULO 1. Fundamentos teóricos de la evaluación de la automatización.

En este capítulo se realiza un análisis de la bibliografía consultada, correspondiente a la temática de los fundamentos de la automatización, así como las metodologías desarrolladas por varios autores en el tema a tratar. El análisis tiene como centro de atención la evaluación de la automatización en procesos industriales, la cual resulta esencial en la realización de proyectos vinculados a mejorar la automatización. Es por eso que en gran parte del capítulo se hace mención a varias de las metodologías desarrolladas con este fin, las cuales se reportan en la literatura especializada.

1.1 Fundamentos de la automatización.

1.1.1 Reseña histórica de la automatización.

La automatización de los procesos industriales a través de los años ha dado lugar a un avance espectacular de la industria. Todo ello ha sido posible gracias a una serie de factores entre los que se encuentran las nuevas tecnologías en el campo mecánico, la introducción de los computadores, y sobre todo el control y regulación de sistemas y procesos (Murillo and Hernández, 2013).

La incorporación de los medios de cómputo en la producción es, sin lugar a dudas, el elemento puente que está permitiendo lograr la automatización integral de los procesos industriales. La aparición de la microelectrónica y los microprocesadores ha facilitado el desarrollo de técnicas de automatización complejas, la robotización, la implementación de sistemas de gobierno y la planificación. Todos estos elementos llevan consigo la reducción de costos, el aumento de la productividad y la mejora del producto (Ruedas, 2010). En este epígrafe se hace una revisión histórica de la evolución de la automatización desde sus primeras épocas.

Algunos creen que la automatización de la máquina comenzó con la revolución industrial, aunque en realidad surgió en los siglos XVI-XVII donde las ruedas de aguas eran empleadas para alimentar los trenes de laminación que se enrollarían tiras metálicas que posteriormente serían estampadas en monedas. A inicios del siglo XIX, se produjeron importantes avances en la automatización con el inicio de la revolución industrial como el empleo de las tarjetas

metálicas con agujeros para controlar patrones de tejidos en telares y el entretenimiento con la pianola. Posteriormente entre 1900 y 1920 se crean el torno de engranajes, la máquina de tornillo automático y la máquina embotelladora automática, en los años 60 se introducen a gran escala los circuitos integrados en procesos de fabricación y los controladores lógicos programables(PLC) (Loján, 2015).

En las décadas de los 70 y los 80 aparece el primer sistema de manufactura integrado, soldadura por punto en carrocería de automóviles por robot, microprocesadores, la inteligencia artificial y los robots inteligentes respectivamente (Callejas et al., 2007). Desde la década de 1990 y los primeros años del 2000, los procesos de fabricación se volvieron automáticos casi en su totalidad, aparecen las máquinas inteligentes y basadas en sensores, los dispositivos de lógica difusa, las redes neuronales artificiales. En la actualidad la automatización debe basarse en la integración, por lo que se hace necesario dar un salto a la automatización inteligente. En la primera revolución industrial, las máquinas sustituyen los seres humanos; en la segunda la automatización sustituye a la operación manual, la tercera revolución industrial será la automatización actualizándose a la automatización inteligente (Pacheco and Villamarín, 2008).

1.1.2 Necesidad de la automatización.

No siempre es necesario automatizar un proceso. Lo primero que nos debemos preguntar es si es realmente necesario. Aunque técnicamente sea factible, los costos de la implantación y ejecución del proyecto pueden no ser asumibles. Añadir complejidad al sistema no aumenta la eficiencia, sino coste de diseño, implantación y mantenimiento. Por norma general, la solución más simple para un problema es la más adecuada. Sin embargo, no siempre la potencia física y mental del ser humano es suficiente para la realización del proceso (Cordero et al., 2016).

La automatización en muchos casos consigue soluciones de elevada precisión y exactitud, imposibles con la intervención exclusivamente humana. Además, en aquellos casos en las que el entorno es demasiado complicado y peligroso, la automatización es una buena opción. Otros casos en los que es necesaria es cuando el proceso requiere tal nivel de cualificación que no existen especialistas o son únicos para determinada tarea. Además, la automatización

de un proceso no es subjetiva y puede reducir aquellas situaciones críticas y emergencias debidas a reacciones inesperadas del ser humano.

La implementación de sistemas de automatización no siempre está determinada por la necesidad de la automatización, pero existen ciertas señales indicadoras que justifican y hacen necesario la implementación de estos sistemas (Rodríguez, 2016).

La automatización solo es viable si al evaluar los beneficios económicos y sociales de las mejoras que se podrían obtener al automatizar, estas son mayores a los costos de operación y mantenimiento del sistema.

El nivel de competitividad del mundo globalizado de hoy, ha definido que la automatización industrial se constituya en uno de los pilares de mayor importancia para el sector productivo en cualquier país, lo cual ha permitido que esta área de la ingeniería se convierta en un campo de gran interés tanto para académicos como para industriales. La automatización en la industria permite la conjugación de diversas tecnologías con el objetivo de asegurar el control y buen comportamiento de una gran variedad de procesos industriales que puedan ser capaces de reaccionar a situaciones imprevistas, logrando una reducción de costes de fabricación, calidad constante en los productos y liberando al ser humano de tareas tediosas, peligrosas e insalubres (Sánchez and Pizarro, 2010).

Cuando se van a introducir medios de automatización en un proceso industrial estos pueden ser sencillos, de mediana complejidad o de una gran complejidad, dependiendo fundamentalmente de los objetivos que se quieren lograr con la automatización. Esto quiere decir que es necesario establecer el nivel y el volumen que tendrá la automatización a introducir (Herrera et al., 1990).

1.1.3 Objetivos de la automatización.

Estando definida ya la necesidad de la automatización como un elemento de desarrollo en la industria y en la economía en general, no es muy difícil establecer sus objetivos fundamentales (Ordax, 2005):

1. Mejorar la productividad y eficiencia, reduciendo los costos de producción y mejorando la calidad y precisión del producto final.
2. Optimizar la planificación y el control.

3. Mejorar las condiciones de trabajo del personal, suprimiendo las tareas más pesadas e incrementando su seguridad.

4. Realizar aquellas operaciones imposibles de controlar intelectual o manualmente.

1.1.4 Ventajas de la automatización.

La automatización de un proceso frente al control manual del mismo proceso, brinda ciertas ventajas y beneficios de orden económico, social, y tecnológico (Marchán, 2016), pudiéndose resaltar las siguientes (Buñay and Guamán, 2015):

- Mejora en la calidad del trabajo del operador y en el desarrollo del proceso, dependiendo de la eficiencia del sistema implementado.
- Reducción de costos, puesto que el trabajo se racionaliza y se reduce el tiempo y dinero dedicado al mantenimiento.
- Reducción en los tiempos de procesamiento de información.
- Flexibilidad para adaptarse a la fabricación de nuevos productos.
- Conocimiento más detallado del proceso, mediante la recopilación de información y datos estadísticos del proceso.
- Mejor conocimiento del funcionamiento y performance de los equipos y máquinas que intervienen en el proceso.
- Factibilidad técnica en procesos y en operación de equipos, así como para la implementación de funciones de análisis, optimización y auto diagnóstico.
- Aumento en el rendimiento de los equipos y facilidad para incorporar nuevos equipos y sistemas de información.
- Disminución de la contaminación y daño ambiental.
- Racionalización y uso eficiente de la energía y la materia prima.
- Aumento en la seguridad de las instalaciones y la protección a los trabajadores.

1.1.5 Factores a tener en cuenta previos a una automatización.

Antes de iniciar una automatización es importante tener en cuenta varios factores:

- Las organizaciones son complejas y realizan diversas funciones que están relacionadas entre sí, que sus necesidades de manejo de información cambian y crecen, y que además del manejo operativo de la información hay una necesidad de contar con un acceso global que permita una mejor toma de decisiones.
- La tecnología es muy cambiante, cada vez hay mayor variedad de equipos y sistemas más poderosos de precios diversos, lo que complica la selección de la tecnología adecuada.
- El diseño, la programación y la operación de los sistemas requieren en la mayoría de los casos de especialistas.

Por todo lo antes mencionado, si se pretende que una automatización no solamente cause una mejora de la producción, sino que además resulte una inversión rentable en cuanto a la adquisición de una tecnología adecuada, es necesario contar con una metodología para llevar a cabo dicha automatización (Sánchez and Pizarro, 2010).

1.2 Sistema Automatizado: Definición y funciones principales.

La automatización es un sistema donde se transfieren tareas de producción, realizadas habitualmente por operadores humanos a un conjunto de elementos tecnológicos. Un sistema automatizado consta principalmente de dos partes: una de mando y otra operativa. Esta última es la que actúa directamente sobre la máquina haciendo que se mueva y realice la operación deseada gracias a los actuadores y sensores que la componen. La parte de mando, sin embargo, suele ser un autómata programado que está en el centro del sistema y es capaz de comunicarse con el resto de constituyentes del sistema.

Hoy en día, para conseguir la automatización de un sistema, se utilizan principalmente métodos de control numéricos y, específicamente, métodos de control por computación. También han ido apareciendo conceptos, tales como CAD (Diseño de Ordenadores Asistido), CAM (Manufactura gracias a los ordenadores) y, en general, Tecnologías asistidas con Ordenadores (CAx). Sin embargo, los principales modos de automatización son: Sistemas Neuronales Artificiales (ANN), sistemas de control distribuido (DCS), interfaz hombre-

máquina (HMI), control de supervisión y adquisición de datos (SCADA), controladores lógicos programables (PLC), controladores programables automáticos (PAC) y robótica (Gualli and Tucunango, 2015). (Uso de siglas en idioma inglés).

Las funciones principales de un sistema automatizado se basan en el tratamiento de los datos correspondientes a los diferentes sistemas de medida, organización de las bases de datos y obtención de los parámetros de interés. En resumen, las funciones principales de un sistema automatizado son (Aguilar and Briones, 2015):

1. Señales de medida procedentes de los convertidores iniciales (sensores, calibradores) y su correspondiente conversión.
2. Adquisición, transmisión e introducción de los datos en el sistema de ordenadores.
3. Procesamiento inicial de los datos.
4. Visualización en tablas, gráficos, histogramas.
5. Agrupamiento de los datos (codificación, embalaje, etc.).
6. Salida, acumulación y mantenimiento de las bases de datos (DB).
7. Regulación automática de parámetros como la temperatura, presión, composición gaseosa, etcétera.
8. Programación y lógica de control, tanto de los objetos investigados como de las condiciones ambientales con el propósito de modelar físicamente el modo de investigación proporcionado.

1.3 Clasificación de los niveles de automatización.

El término “nivel de automatización” podría ser sinónimo, aunque no necesariamente, de “nivel de tecnología”. El nivel de automatización denota la proporción hombre-máquina en las tareas, o la transferencia de las tareas humanas a las tareas de máquinas, basándose así en la interacción hombre-máquina. El nivel de tecnología describe la sofisticación en los procesos donde el proceso sofisticado puede ser totalmente automatizado o parcialmente automatizado. El nivel de automatización es claro en la medida en que se proporcione la interacción hombre-máquina. De otro lado, el nivel de tecnología solo da una perspectiva del software y el hardware que está normalmente asociado con los procesos tecnológicos.

Se han sugerido dos clasificaciones para la automatización, basándose en una complejidad de tres niveles para la contribución hombre-máquina y para la participación obligatoria del hombre en los sistemas. La primera clasificación diferencia entre niveles de complejidad, mientras que la segunda asume la participación del hombre en el sistema al menos como reserva en las situaciones de contingencia (Rebi and Rani, 2001).

Frecuentemente se realiza una clasificación en niveles, atendiendo a la complejidad de la automatización y los medios que se utilicen, y por regla general no existe una única clasificación; no obstante, se expondrá una clasificación lo más general posible, atendiendo al nivel de la técnica.

Nivel cero o primer nivel

Cuando en el proceso industrial existe toda una instrumentación de base, la cual da la posibilidad de conocer el estado actual de las variables fundamentales de dicho proceso, pero no existen lazos de regulación con vistas a controlar automáticamente tales variables, siendo el hombre el que actúa como regulador directo en el control del proceso. Toda la medición, así como los mandos, pueden estar centralizados o no.

Nivel I o segundo nivel

Además de lo anterior, se introducen en la parte fundamental del proceso, o en la totalidad, lazos de regulación automática de los tipos convencionales. Al igual que en el nivel anterior, estos lazos de regulación automática pueden encontrarse centralizados en un punto o por cada parte del proceso.

Nivel II o tercer nivel

Conjuntamente con los anteriores medios se introducen medios superiores de automatización. Específicamente es común definir este tercer nivel con la introducción de medios computacionales en la automatización del proceso.

Pueden realizarse otras divisiones en niveles sucesivos, atendiendo al constante desarrollo de los medios de automatización. Es conveniente precisar que esta división en niveles es respecto a la calidad y complejidad de los medios de automatización y no a la estructura de la automatización (Herrera et al., 1990).

Tanto el nivel como el volumen de la automatización son factores a determinar con un grado de exactitud aceptable dentro del estudio inicial que se realice sobre la automatización a

proyectar. Cuando esto se hace así, se obtendrá después una buena efectividad económica en el sistema.

1.4 Métodos de evaluación de la automatización.

1.4.1 Generación de la automatización basada en el empleo de PLC.

Estudios realizados por (Castro et al., 2005) permiten, mediante el análisis de una metodología, generar una automatización de manera más sencilla utilizando PLC. Su importancia radica en la evaluación de las diferentes técnicas de administración de la tecnología, para de una manera eficaz, poder dar solución de forma sistematizada a la toma de decisiones, para incrementar la productividad de los sistemas empleados por las compañías. Esta metodología está basada en 5 pasos fundamentales: descripción del sistema, diagrama de flujo, descripción de los equipos del sistema, requerimientos del cliente, selección del autómatas programable y programación del PLC. A continuación, se llevará a cabo una explicación detallada de los pasos a seguir para el desarrollo del método.

A. Paso No. 1 (Descripción del sistema).

Para llevar a cabo la descripción del sistema o proceso se requiere recabar la siguiente información: procedimiento que se debe seguir en la operación (arranque, paro), dispositivos que intervienen en el proceso (sensores, transductores, motores, variadores, etc.), variables a medir, variables a controlar, variables a monitorear, rangos de operación, función de los dispositivos, entradas y salidas. Esta actividad se lleva a cabo mediante entrevistas con los operadores y encargados de mantenimiento del proceso, visitas de campo y la experiencia del integrador.

B. Paso No. 2 (Diagrama de flujo).

Un diagrama de flujo es una representación gráfica de los pasos en un proceso. Dicho diagrama es útil para determinar cómo funciona realmente el proceso. El diagrama se utiliza en gran parte de las fases del proceso de mejora continua, sobre todo en definición de proyectos, diagnóstico, diseño e implantación de soluciones, mantenimiento de las mejoras, traslado de materiales, pasos para ventas y procedimientos del proceso.

C. Paso No. 3 (Descripción de los equipos del sistema).

Aquí se agrupan todos los dispositivos que intervienen en el proceso, se describe bien su función e identifican las entradas y salidas del sistema. Esto ayuda a conocer con mayor detalle el sistema y las funciones para los cuales fueron diseñados los dispositivos. Además, sirve para conocer más a detalle el proceso y entenderlo mejor; es decir, tener una amplia visión para la siguiente etapa.

D. Paso No. 4 (Requerimientos del cliente).

Estos se obtienen de las entrevistas realizadas con los operadores y jefes de mantenimiento, los cuales indican características de operación, de los equipos, rango de operación y en algunos casos el rango del costo de los equipos a utilizar.

E. Paso No. 5 (Selección del autómata programable).

Para llevar a cabo la selección del autómata se deben realizar dos evaluaciones, una para seleccionar el tipo de autómata y la otra para seleccionar la marca, esto debido a las diferentes opciones que brinda el mercado actualmente.

F. Paso No. 5.1 (Matriz de decisiones para la selección de PLC).

Para realizar la matriz de selección se deben seguir los siguientes pasos: Elaborar una lista de características de selección, ordenar la lista de características, asignación de ponderación relativa a cada característica de la selección, establecer parámetros de rendimiento o calificación de utilidad para cada una de las características y calcular los valores de utilidad relativa de los diseños alternativos además de comparar los valores de utilidad relativa.

G. Paso No. 5.2 (Matriz de decisiones para la selección de la marca del PLC).

Para generar esta matriz se debe realizar un procedimiento similar al del paso anterior solamente que aquí se compararan por lo menos cuatro marcas diferentes de autómatas programables seleccionado en la etapa anterior.

H. Paso No.6 (Programación del PLC).

Existen dos formas de programación para el PLC: El método heurístico o informal (función memoria) y el método formal (redes de Petri o GRAFCET), se recomienda éste último. Primero se debe de realizar el diagrama GRAFCET, el cual consiste en un diagrama gráfico

de etapas y transiciones, por medio del cual se puede llevar a cabo con facilidad la programación del PLC elegido de acuerdo con el software del mismo.

Paso No. 6.1 (GRAF CET del proceso).

Los pasos esenciales que debe realizar son:

- Se debe caracterizar el funcionamiento del automatismo con total independencia de los componentes con los que vaya a ser construido. Esto equivale a centrar el interés no tanto en la estructura física o en la tecnología empleada para implementar el automatismo, sino en la función que debe realizar.
- El elemento fundamental de un proceso es la operación (denominada etapa en el lenguaje de GRAFCET), entendiendo como tal una acción realizada por el automatismo. Obsérvese que en una primera aproximación se puede dividir el proceso en unas pocas operaciones relativamente complejas, llamadas macroetapas. Estas operaciones podrán ser subdivididas a su vez en operaciones más elementales a medida que se avanza en el nivel de detalle.
- Se debe dividir el proceso en macroetapas y éstas en etapas más elementales, hasta conseguir que las acciones a realizar en cada una de ellas dependa sólo de relaciones combinacionales entre entradas y salidas.
- Establecer un gráfico de evolución que indique la secuencia de las operaciones (secuencia de etapas) y las condiciones lógicas para pasar de una etapa a otra. (denominada condiciones de transición en el lenguaje de GRAFCET). Como resultado de este paso se obtienen las ecuaciones lógicas y queda resuelta la parte secuencial del automatismo.
- Establecer para cada operación elemental (etapa) las relaciones lógicas entre entradas y salidas, utilizando eventualmente otras variables internas combinacionales.
- Finalmente implementar el sistema utilizando el programa de las relaciones lógicas de los dos puntos anteriores.

Paso No. 6.2 (Descripción de entradas y salidas del proceso).

De acuerdo con el diagrama del GRAFCET se describen las entradas y salidas que intervienen en el programa para tener una mejor visualización del mismo. Esto ayuda en mayor parte para la siguiente etapa que se refiere a la programación del PLC.

Paso No. 6.3 (Programa del PLC). Este se realiza en el software del autómeta elegido, usando el diagrama de GRAFCET realizado anteriormente. Cada línea de programa se puede ir leyendo directamente del GRAFCET.

Se puede afirmar que debido a que los sistemas de automatización la mayoría de las veces son muy complejos y diversos. La metodología planteada proporciona una herramienta útil para llevar a cabo proyectos de automatización, sobre todo en el proceso de toma de decisiones, pues éstas deben ser evaluadas por criterios bien definidos los cuales se consensan por los usuarios.

1.4.2 Diagnóstico del nivel de automatización en medianas y pequeñas industrias en la ciudad de Cuenca, España.

Por otra parte, los autores (Sánchez and Pizarro, 2010) desarrollaron una metodología con el objetivo de diagnosticar el nivel de automatización en las pequeñas y medianas industrias de la ciudad de Cuenca (España) basado en la aplicación de encuestas a los trabajadores de las mismas. Para dicho estudio se establecieron cuatro niveles de automatización: accionamiento manual, semiautomática, automática y computarizada.

Accionamiento manual: Si el operario tiene incidencia directa mediante su fuerza de trabajo en el arranque y operación de la máquina, trabaja directamente sobre la materia prima.

- *Semiautomática:* Cuando las tareas manuales son ayudadas por tecnologías oleohidráulicas, neumáticas, electromecánica, contactores, relés, temporizadores, micro-PLC.

Automática: Si las operaciones se ejecutan a través de secuencias y tiempos específicos determinadas por un sistema de control, como PLC, tecnología electrónica.

Computarizada: Si hay presencia de un ordenador que ha sido programado y controla todo el proceso.

Con el conocimiento de las características anteriores de los niveles de automatización y con las encuestas realizadas a los responsables de cada empresa, la metodología permite diagnosticar el nivel de automatización en que se encuentran las pequeñas y medianas industrias de la ciudad de Cuenca, además permite que los resultados sean considerados como una de las líneas base para el desarrollo de posteriores proyectos en el área de investigación,

desarrollo e innovación tecnológica; así como también sea una contribución para la toma de decisiones por parte de los empresarios y el gobierno para futuros proyectos.

1.5 Otros métodos empleados.

Otros autores proponen el desarrollo de un método basado en la identificación de los niveles de automatización existentes partiendo de la premisa que a mayor grado de intervención humana se presenta un menor nivel de automatización y viceversa (Ovalle et al., 2013) con el objetivo de identificar brechas tecnológicas en la automatización industrial de las empresas del sector metalmeccánico de Caldas, Colombia.

La investigación cuantitativa, de tipo descriptivo, fue desarrollada en 30 empresas manufactureras del sector metalmeccánico de Caldas, Colombia. Los niveles de automatización se identificaron en las diferentes etapas de la cadena de valor: abastecimiento de materiales, proceso productivo, empaque y embalaje, almacenamiento y logística; también fueron evaluados en los procesos: control y supervisión, operación, registro de información, comunicación. Los criterios de evaluación, definidos por panel de expertos, se presentan en la Tabla 1.1. Las empresas se clasificaron en categorías, tomando como referencia los niveles de capacidad de las palancas de fabricación propuestos por (Miltenburg, 2005) para empresas americanas y los estudios nacionales (Sarache-Castro et al., 2005). Los resultados se muestran en la tabla 1.2.

Tabla 1.1. Criterios para evaluación de niveles de automatización.

Nivel Automatización	Descripción
0	100% intervención humana, uso de los sentidos
25	Uso de equipos y herramientas
50	Uso de controles tipo on-off
75	Uso de controles avanzados
100	Uso de controles remotos

Tabla 1.2. Categorías establecidas por niveles de automatización.

Categorías	Nivel Automatización	Capacidad de fabricación
Bajo	< 24	La fabricación está baja en técnica y poco cualificada.
Medio-Bajo	25 – 40	La fabricación consiste en rutinas y actividades, pero está baja en técnica.
Medio	41 – 55	La fabricación consiste en rutinas y actividades estándar. Se satisface con mantener el paso con los competidores y el estatus vigente.
Medio-Alto	56 – 70	El sistema de producción provee outputs cualificados, pero no se ha adoptado una perspectiva a largo plazo.
Alto	71 – 85	El sistema de producción provee outputs cualificados y las decisiones de fabricación son consistentes con la estrategia.
Clase Mundial	86 – 100	El sistema de producción es una ventaja competitiva.

Esta metodología es similar a la desarrollada por (Sánchez and Pizarro, 2010), ya que logra identificar los diferentes niveles de automatización a través de los criterios mostrados en la tabla 1.1. Siendo el producto de esta investigación cuantitativa, de tipo descriptiva, la identificación de brechas tecnológicas en automatización industrial de las empresas del sector metalmeccánico de Caldas.

A nivel nacional se puede encontrar la investigación realizada por (Vázquez, 2017) donde se determina el grado de la automatización de los accionamientos en la fábrica de cementos de Cienfuegos. La misma constituye un punto de partida para definir una estrategia de automatización que permita elevar el nivel y grado de los accionamientos de esta entidad, a

partir de un análisis de algunos CCM (centro de control de motores) que existen en las distintas áreas de la fábrica. El método desarrollado en este trabajo será descrito a continuación detalladamente ya que el mismo es el empleado en la investigación en cuestión.

1.6 Descripción del método a utilizar.

El método desarrollado por (Herrera et al., 1990) persigue como objetivo la determinación del grado de automatización, el cual está dado por el cálculo de varios factores como: grado de observación, grado de regulación y grado de dirección que indican en qué medida la automatización está presente en un proceso productivo; los mismos corresponden más con criterios cuantitativos que con la calidad de la automatización, por lo que se hace necesario definir algunos parámetros que proporcionan una idea más clara sobre la calidad del sistema de automatización a proyectar, o sea, factores como el nivel y el volumen de automatización. Para una mejor comprensión de la metodología a utilizar se lleva a cabo una explicación minuciosa de los parámetros empleados.

Grado de observación: Para dar una idea cuantitativa del grado de observación que sobre la marcha del proceso productivo pueda tener el hombre se define el grado de observación, K_o , el cual sería la relación entre la cantidad de parámetros principales observados directa o indirectamente y la cantidad total de parámetros principales, o sea:

$$K_o = \frac{\text{Parámetros observados}}{\text{Total de parámetros principales}} \times 100\% \quad (1.1)$$

Se denominan parámetros principales los correspondientes a las variables de entrada, los parámetros de salida del producto, así como aquellos parámetros internos que influyen directamente en los parámetros de salida. Se denominan parámetros observados aquellos cuyo valor el hombre puede conocer en cualquier instante de tiempo, o periódicamente sin tener necesidad de realizar un trabajo específico, o sea, que esto lo realice un determinado equipo el cual proporciona al hombre estos datos.

Grado de regulación: Similarmente al grado de observación antes descrito, este puede definirse como un indicador que ofrezca un criterio sobre el grado de dominio que el hombre posea sobre el comportamiento de un proceso en particular. Si las variables de salida de un proceso se mantienen dentro de los parámetros establecidos por el hombre, que a su vez

puede cambiarlos, entonces el proceso está regulado. Según este criterio se puede definir el grado de regulación, K_r , de un proceso como la relación entre la cantidad de variables de salida reguladas, directa o indirectamente, y la cantidad total de variables de salida, o sea:

$$K_r = \frac{\text{Variables de salida reguladas}}{\text{Total de variables de salida}} \times 100\% \quad (1.2)$$

En el caso de que para la variable de salida exista un lazo de regulación, entonces dicha variable está regulada directamente. Si en esta forma se encuentran todas las variables de salida del proceso productivo en cuestión, entonces este estará regulado al 100%.

Una situación diferente se obtiene en el caso de que alguna de las variables de salida no esté regulada directamente, o sea, que se controle su comportamiento mediante la regulación de una o varias variables internas del proceso. Entonces es preciso determinar cuáles son las variables que, según el correspondiente diagrama de influencias, actúan en la variable de salida analizada. No es materia fácil determinar cuantitativamente el grado de influencia de cada una de estas variables en la salida, requiriéndose para ello un análisis detallado de la operación del proceso. Tomando como ejemplo la ecuación de influencia:

$$Y_1 = a_1X_2 + a_2X_4 + a_3X_5 + a_4D_2 \quad (1.3)$$

Donde los parámetros $a_1 \dots a_4$ son precisamente los coeficientes de influencia cuya determinación es una tarea principal en el diseño de regulación. Para la determinación de los coeficientes de influencia es necesario encontrar, por vía analítica o experimental, la ganancia de estado estacionaria entre la variable de estado de salida y la variable del coeficiente que se quiere determinar. Este valor de ganancia vendría expresado en tanto por ciento y se establecería de la forma siguiente: Tanto por ciento del cambio del valor de la variable de salida a un 1% de cambio en la variable de influencia.

Una vez determinados todos los valores de las distintas ganancias de estado estacionario, se pueden determinar los coeficientes de influencia. Un valor de ganancia alto corresponderá también a un alto valor del correspondiente coeficiente, o sea, que los coeficientes expresan numéricamente el peso relativo de cada ganancia en la variable analizada, por lo que para determinar el coeficiente a_i en una ecuación de influencia, se puede usar la expresión:

$$a_i = \frac{G_i}{G_t} \quad (1.4)$$

donde G_i es la ganancia correspondiente a esta variable y G_t es la suma de todas las ganancias. El grado de regulación de la variable de salida será entonces la suma de los coeficientes de aquellas n variables de la ecuación de influencias que están reguladas expresado en tanto por ciento, o sea,

$$K_{ri} = 100 \sum_{i=1}^n a_i \quad (1.5)$$

De esta forma puede determinarse el grado de regulación del proceso completo, dependiendo del correspondiente grado de regulación de cada variable de salida, o sea, que al igual que se determinó el grado de regulación para cada variable de salida, es preciso ver qué efecto tiene cada una de estas variables en el comportamiento general del proceso. Ya estos son criterios que en casos frecuentes no son fáciles de determinar, pues dependen de criterios cualitativos desde el punto de vista tecnológico, aunque en principio es posible establecer un balance entre cada variable de salida y determinar el grado total de regulación del proceso como:

$$K_{rj} = \sum_{j=1}^m P_j \times K_{rj} \quad (1.6)$$

Donde existen m variables de salida, cada una teniendo un grado de regulación K_{rj} . Los coeficientes P_j (desde $j=1$ hasta $j=m$) representan numéricamente la influencia relativa de cada una de las variables de salida en el comportamiento global del proceso.

$$\sum_{j=1}^m P_j = 1 \quad (1.7)$$

Grado de dirección: Como ya fue establecido, el grado de automatización, (K_a), de un proceso productivo no solo depende de la observación que sobre el proceso se tenga, (K_o), ni del grado de regulación que este posea (K_r), sino que depende de otros factores que es necesario reconocer. Perteneciente a este grupo de factores adicionales se encuentra la capacidad que tenga el hombre para dirigir el proceso desde su puesto de operación, sin su intervención directa en el proceso. Por supuesto, este factor debe corresponder plenamente con el concepto de automatización, lo cual implica, como fue ya explicado, la no intervención directa del hombre en el proceso como parte activa. Lo anterior implica que el hombre dirija el proceso productivo en cuestión mediante la dirección de los subprocesos correspondientes, y estos a su vez, por la dirección de cada una de las variables que intervienen. Sobre esta base se puede definir el grado de dirección,

$$K_d = \frac{\text{Cantidad de variables controladas}}{\text{Total de variables controlables}} \times 100\% \quad (1.8)$$

Aquí se incluyen las variables que estén reguladas y cuyo valor deseado el hombre pueda ajustar, así como todas aquellas operaciones que el hombre, con la instrumentación adecuada, puede dirigir, por ejemplo, las acciones de mando a distancia, o sea, arranque y parada de un motor eléctrico, abertura o cierre de una válvula solenoide, etcétera. Para lograr la realización de estos tres elementos pueden existir distintos volúmenes de automatización, así como el nivel de esta; esto quiere decir, por ejemplo, que la observación de un proceso puede lograrse con mayor o menor calidad, que el proceso en su conjunto total o cada subproceso en particular pueden estar regulados con mayor o menor eficacia, lo que también se cumple para la dirección o control de las variables que pueden estar dirigidas con mayor o menor precisión, sobre la base de mayor o menor información que del proceso se tenga.

Como el concepto nivel de automatización está vinculado a la complejidad del equipamiento utilizado, estaría también relacionado con las funciones que se podrían realizar.

Indudablemente, un equipo técnico más complejo estaría en condiciones de realizar funciones más complejas, por lo que la complejidad de las funciones va desde simples observaciones del comportamiento de variables mediante instrumentos analógicos, hasta complicadas operaciones automáticas de balance y optimización de la marcha de un proceso determinado. Es necesario entonces definir, para caracterizar el nivel a emplear en la automatización, la cantidad y tipos de funciones que se pueden lograr con el sistema. En la tabla 1.3 se aprecia un listado general de las funciones más empleadas en los sistemas de automatización. En dicha tabla se le asigna, además, a cada función, un índice de complejidad (I_c) el cual puede variar en dependencia de lo compleja que sea dicha función, con el que se pretende comparar el grado de complejidad que tienen las diferentes funciones entre sí.

Tabla 1.3. Funciones e índices de complejidad.

Funciones	Índice de complejidad	
Supervisión	Indicación	1,2
	Registro	1,4
	Integración	1,5
	Visualización directa	1
	Visualización indirecta	11,0
	Alarma	1,7
Control	Dirección	2,5
	Regulación	3,5
	Mando a distancia	2
SAPDT	Balance	15
	Ajuste de reguladores automáticos	5,0
	Estabilización	20,0
	Optimización	50,0

El nivel de automatización está proporcionalmente relacionado con el índice de complejidad de las funciones en particular, mediante el índice total de complejidad (I_i) el cual es la suma de cada índice de complejidad correspondiente a las funciones que se realicen en un sistema, o sea, se calcula mediante: $I_i = \sum_{i=1}^L M_i I_{ci}$ (1.9)

para un sistema de automatización donde se ejecuten L diferentes funciones. En la expresión anterior (M_i) corresponde al número total de veces en que esta función se repite en el sistema.

En general plantea que:

$$\text{Nivel de la automatización} = \frac{\text{Cantidad y complejidad de funciones}}{\text{Cantidad de instrumentos}} \quad \text{o} \quad K_n = \frac{I_i}{N_i} \quad (1.10)$$

O sea, que el nivel de la automatización estará dado por la cantidad y complejidad de funciones a realizar por instrumentos utilizados.

Como instrumento se comprende, a los efectos de la anterior definición, aquellos equipos que forman parte directa de los circuitos de regulación, observación, dirección, etcétera, y que

realizan directamente una de las funciones señaladas o participan en su realización. En esta categoría se incluyen, por tanto, entre otros, los instrumentos siguientes: captadores-transmisores, operadores algebraicos (sumadores, multiplicadores, etcétera.), reguladores, indicadores, display, microcomputadoras, válvulas de control, etcétera.

También relacionado con la automatización se encuentra el volumen el cual puede ser expresado numéricamente, siendo este proporcional a la cantidad de instrumentos por variable principal en el proceso, o sea:

$$\text{Volumen de automatización} = \frac{\text{Cantidad de instrumentos}}{\text{Cantidad de variables principales}} \text{ o } K_v = \frac{N_i}{N_v} \quad (1.11)$$

El volumen de la automatización a emplear está directamente relacionado con la cantidad de instrumentos promedios utilizados por cada variable principal. Tanto la definición de instrumento utilizada como la de variable principal, corresponden con los enunciados anteriormente, por lo que el grado de automatización, que depende tanto del volumen como del nivel de la automatización, podría definirse como:

$$K_a = K_n \times K_v \quad (1.12)$$

Haciendo uso de las expresiones (1.5) y (1.6) quedaría que:

$$K_a = \frac{I_i}{N_v} \quad (1.13)$$

Esta última expresión significa que el grado de automatización de un proceso está directamente relacionado con la cantidad y complejidad promedio de funciones que se realizan automáticamente por cada variable principal del proceso productivo automatizado.

Se seleccionó la metodología desarrollada por (Herrera et al., 1990) debido a que las complejidades dinámicas que caracterizan los procesos tecnológicos de la Fábrica de Cementos de Cienfuegos son muy complejas y diversas. La metodología planteada proporciona una herramienta útil para llevar a cabo proyectos de automatización, ya que permite diagnosticar el nivel y grado de la automatización en dicha empresa de acuerdo a sus características a través del cálculo de varios factores como: grado de observación, grado de regulación y grado de dirección; que indican en qué medida la automatización está presente en un proceso productivo, además de definir algunos parámetros que proporcionan una idea más clara sobre la calidad del sistema de automatización a proyectar, o sea, factores como el

nivel y el volumen de automatización, constituyendo también un aporte para la toma de decisiones a la hora de un rediseño de la automatización.

1.7 Consideraciones finales del capítulo.

Luego de realizar un análisis de la literatura consultada se arriban a las siguientes conclusiones:

- Las diferentes metodologías de evaluación de la automatización han logrado un mejor diagnóstico de la automatización de los procesos industriales para llevar a cabo posteriores proyectos de automatización.
- Se selecciona el método desarrollado por (Herrera et al., 1990) ya que a través de esta metodología se calculan índices cuantitativos tales como: grado de observación, grado de regulación, grado de dirección, nivel, volumen y grado de automatización, parámetros que permiten caracterizar y comparar la automatización de un proceso productivo automatizado.

CAPÍTULO 2. Descripción del funcionamiento y la estructura de la automatización de los procesos productivos en la Fábrica de Cementos Cienfuegos.

2.1 Descripción del proceso tecnológico de fabricación del cemento.

El proceso de producción de la fábrica de cemento puede explicarse partiendo del diagrama representado en la figura 2.1. Se describe desde el punto de vista de la estructura de la automatización el proceso productivo de la Empresa de Cementos Cienfuegos. Se explica el proceso y se caracteriza en el contexto nacional e internacional.

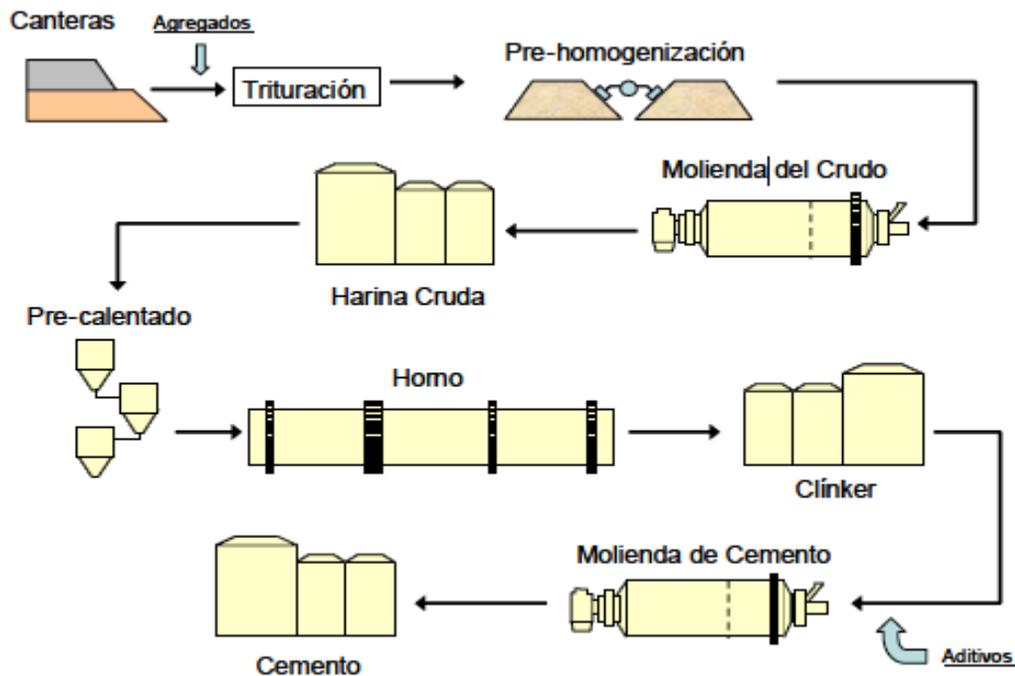


Figura 2.1 Diagrama del proceso de producción de cemento.

En las canteras comienza el flujo de producción, fuente de las materias primas que utilizamos en la obtención del producto final. Las materias primas proceden fundamentalmente de tres sitios: “Lomas Cantabria”; canteras de piedra caliza, de aquí sale aproximadamente el 70% del material que consume la fábrica, existen también los yacimientos de “Marga las Paila”, que aportan calcio, aluminio, hierro y fundamentalmente Sílice, y el yacimiento de Palanquete de arcillas limoníticas con perdigones de hierro situado a 50 km de la fábrica,

considerado material de corrección del Módulo de Sílice aportando fundamentalmente óxido de hierro. En estos tres sitios se busca inicialmente los componentes idóneos que garanticen la calidad de la materia prima, utilizándose para ello el método de perforación y voladura para la extracción de los materiales, aprovechándose el detrito de la barrenación con el objetivo de conocer la química del frente de voladura. Todo este procedimiento inicial es el que posibilita, tras los análisis de laboratorio previos, que a las diferentes líneas de la planta llegue el producto con la calidad necesaria para obtener el clínker y el cemento.

Una vez garantizadas las materias primas de calidad, se escoge el material menor de 70 mm, se secan y el resto se tritura en un molino de martillos para lograr una granulometría hasta 75 milímetros, se transporta y almacena en los silos según el tipo de material.

Posteriormente las materias primas se dosifican mediante un sistema de básculas que permiten un ajuste constante de la alimentación a los molinos de crudo, así como las proporciones correctas que se van variando gracias al sistema automático del proceso (Marga – Hierro - Caliza).

Teniendo en cuenta que, de los procesos productivos, el de producir clínker consume el 70 % de la energía eléctrica, el 90% del consumo de agua y el 95 % de la energía calorífica de la empresa, e incluye los puntos de emisión de polvo y gases más altos que afectan el entorno y la imagen, nos enfocaremos en este proceso.

En esta etapa se realizan las operaciones de dosificación de las materias primas, molienda y secado, homogenización; transferencia de calor en la descarbonatación y clinkerización, enfriamiento y almacenamiento del clínker; molienda y secado del combustible sólido. Las materias primas caliza, marga y perdigón de hierro, se dosifican según requerimiento de calidad por el cálculo automático de un software dosificador, se premuele y seca el material en un triturador secador de impacto hasta 5 mm y menor de 5% de humedad, ya en el molino de bolas se muelen y secan hasta 85% de finura en tamiz de 90 µm y menor de 1 % de humedad, es un circuito cerrado de molienda donde un clasificador de finos retorna al molino la fracción gruesa, el material terminado, harina, se transporta por aerodeslizadores hasta los silos de homogenización, es un proceso donde el silo de harina que se homogeniza solo es enviado al silo de almacenamiento si cumple las especificaciones de calidad, el proceso se corrige con las materias primas tantas veces como se requiera.

La harina homogenizada se alimenta a la torre de intercambio de cuatro etapas con precalcinador donde ocurre hasta el 90% de la descarbonatación, alimentándose por este el 60% del combustible, ya en el horno ocurren las reacciones químicas para formar la composición mineralógica del clínker, con el 40% del combustible por el quemador principal, el clínker se enfría en un enfriador de parrillas con aire, este es almacenado en silos para exportar o para moler y fabricar cemento para el consumo nacional. El combustible que se quema es petcoke, importado desde Venezuela, y se muele y seca en un molino vertical de rodillos marca ATOX 27,5 de FLS. El petcoke se almacena a cielo abierto, con capacidad para 50 000 toneladas.

Se requiere agua para enfriamiento de aceites y operacional para enfriamiento de gases en la torre acondicionadora de gases, aire comprimido para los sistemas neumáticos de limpieza e instrumentación.

Existen sistemas de recolección de polvo instalados en todo el proceso, sistemas electrostáticos de captación de polvos, filtros de manga, ciclones de alta eficiencia como el Hurryclon conectado en el sistema de desempolvado de los gases del enfriador del horno.

Es por el horno y precalcinador por donde se incineran los desechos sólidos y líquidos que se autoriza por el CITMA, el cemento tiene la propiedad de que no se contamina, y todo lo que se queme que aporte calorías es beneficioso.

La harina homogenizada producida en los molinos pasa primero por el precalcinador donde se lleva a cabo más del 90% de la calcinación del material, entra a los hornos rotatorios en los que se desarrolla el principal proceso de la fábrica: la clinkerización.

Con posterioridad el clínker pasa por el enfriador de parrillas y se almacena en los silos, listo para la exportación o la producción de cemento. El clínker para las exportaciones se saca directamente de dichos silos por medio de bajantes y se transporta hasta el puerto en camiones.

El cemento se obtiene tras añadirle al clínker yeso y aditivo según el tipo de cemento a fabricar, se muelen en un molino tubular de bolas, y también es almacenado, despachado a granel o en sacos por camiones o ferrocarril.

2.2 Descripción de la estructura de la automatización del proceso productivo de obtención de crudo.

El área de crudo tiene tres almacenes de materias primas: caliza (tiene 6 silos de 8000 toneladas cada uno), marga (tiene 1 almacén de 7200 toneladas aproximadamente) y perdigón (tiene 1 con 7000 toneladas aproximadamente). La marga y el perdigón son extraídas de sus correspondientes silos a través de aspas extractoras las cuales cuentan con un variador de frecuencia y se vierten posteriormente en una tolva, para determinar su nivel se establecen dos límites, factor de tolva mínimo y factor de tolva máximo y así el variador de frecuencia en conjunto con un sensor de nivel permite su llenado sin que se derrame material. Luego son enviadas mediante transportadores hacia las bandas dosificadoras, estas cuentan con celdas de cargas para chequear el peso sobre la banda y un encoder para corregir la velocidad, con estas dos señales transmitidas a través de 4-20 mA a las entradas del variador de frecuencia y así este corregir el set point de flujo a dosificar que la van incorporando a una banda transportadora que ya viene con caliza procedente de un carro dosificador de caliza a través del mismo procedimiento. En esta banda se mezclan la caliza, marga y perdigón, las cuales son alimentadas a un molinillo de barras y espejos que pretritura estas materias primas hasta una medida de 10 cm antes de enviarlas al molino. A este molinillo se le alimentan gases provenientes del horno con una temperatura aproximada de 350-380 °C, por lo que este equipo tiene doble acción, triturador – secador. Las materias primas previamente trituradas en el molinillo pasan a un molino de bolas de 10m de largo y 4m de ancho, de una sola cámara, el cual cuenta con aproximadamente un total de 93 -104 toneladas de bolas de diámetros entre 30 mm y 70 mm. El molino también tiene un conducto de alimentación de gases calientes provenientes del horno para así terminar de evaporar toda la humedad que traen las materias primas. El molino de bolas es un molino de barrido ,o sea, que mediante un ventilador se extraen los materiales ya triturados, los cuales pasan a un separador estático, el cual cuenta con un sistema de persianas, que a través de ellas pasa el aire del ventilador que transporta los materiales molidos, el sistema de persianas del separador se abre o se cierra según se requiera, por ejemplo si se está arrastrando mucho material con gran granulometría se cierran un poco las persianas para que ese material grueso choque con las persianas y retorne al molino por una canaleta de retorno que tiene el separador en la parte de abajo y de esta forma ese material se triture mejor. Después del separador estático la corriente de aire y

material bien triturado pasa a una batería de 5 ciclones donde se separa el material del aire que lo transporta. El material separado en los ciclones pasa a una canaleta y esta transporta la llamada “harina” hacia un elevador de cangilones y de ahí se eleva hacia los silos de homogenización de harina donde en cada intervalo de una hora aproximadamente se toman muestras, las cuales son llevadas al laboratorio donde se hacen pruebas para comprobar que la harina contenga la composición adecuada, en caso de no ser así, se envía un set point hacia las bandas dosificadoras para corregir la composición. Cuando se llenan estos silos se transportan a los silos de almacenamiento donde seguidamente se extrae la harina para alimentar el proceso de fabricación de cemento. Al elevador de cangilones también llega material proveniente de la batería de los 5 ciclones del molinillo a través de un transportador de tornillo sinfín, ya que al igual que el molino, el molinillo tiene un separador estático con retorno al molino y de ahí a la batería de ciclones que descargan el material separado a un tornillo sinfín (esta batería de ciclones no descarga a una canaleta debido a que la temperatura del material es muy elevada y podría dañar la canaleta). Todas las variables medidas en el campo son enviadas por comunicación desde el PLC de crudo, pasando por el PLC Maestro hasta la estación de operación donde son visualizadas en un SCADA.

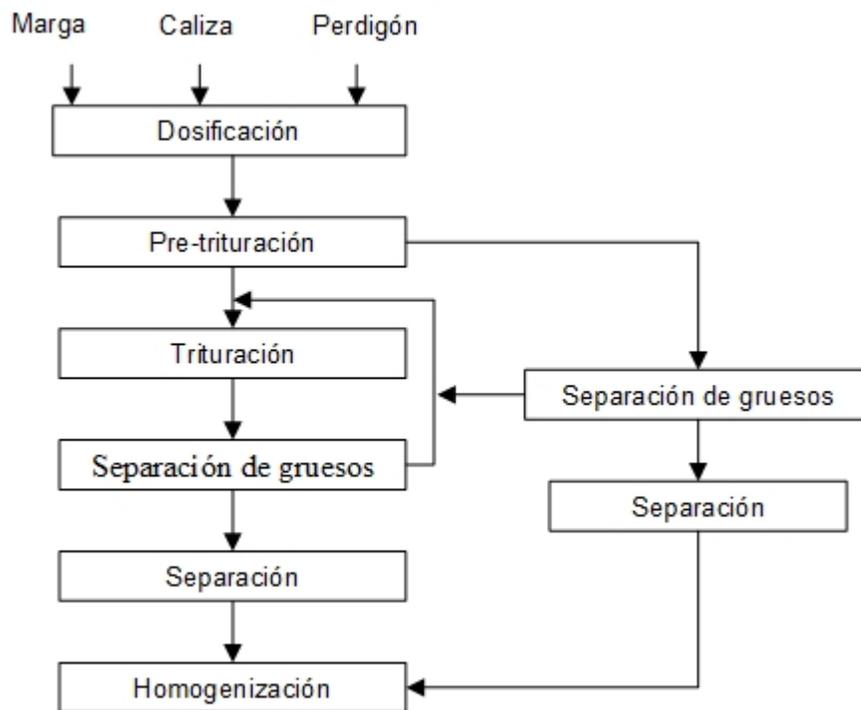


Fig. 2.2 Diagrama de flujo del proceso de obtención de crudo.

2.3 Descripción de la estructura de la automatización del proceso productivo de obtención de clínker.

El proceso de obtención de Clínker consiste en la calcinación de la harina cruda, material con alto contenido de carbonato de calcio (CaCO_3), para descomponerse en óxido de calcio. Esta es una reacción endotérmica, por lo que es preciso suministrarle energía en forma de calor para que la reacción se lleve a cabo. En el caso de estudio actual, el proceso puede ser dividido en tres etapas fundamentales atendiendo al lugar por donde circula la harina en cada instante, precalentador, horno rotatorio y enfriador.

En el proceso la harina cruda es alimentada al precalentador, empleando un dosificador de marca Pfister, conocido como Pfister de Harina, el mismo se compone de una válvula, un motor-reductor y un variador de frecuencia como elementos de acción final, mientras que emplea una celda de carga para medir el peso y un encoder para medir la velocidad de rotación del motor-reductor, todo el control de esta unidad está en un PLC.

El operador desde la sala de control (COP) envía por comunicación Ethernet hasta el PLC Maestro del Área Horno, el set point de alimentación de harina, a su vez este PLC reenvía este set point vía Profibus al PLC del Pfister de harina. El peso dentro del “Pfister” es chequeado por la celda de carga y enviado mediante una señal de 4 a 20 mA a una entrada del PLC donde se implementa un control proporcional y de acuerdo con el valor medido se envía una señal de 4 a 20 mA a la válvula para que esta deje pasar más o menos material al interior del Pfister. Además, este valor de peso es empleado, de conjunto con la medición del encoder para calcular el valor de flujo real y enviar el set point a un regulador PI dentro del mismo PLC para ajustar el set point de velocidad al variador de frecuencia, el cual se envía empleando comunicación RS232.

La harina se suministra alrededor de 210 t/h de forma estable y este valor no se suele cambiar en condiciones normales de trabajo. Todas las variables medidas en el campo son enviadas por comunicación desde el PLC del Pfister, pasando por el PLC Maestro hasta la estación de operación donde son visualizadas en un SCADA. La harina entra al precalentador a una temperatura de 60°C aproximadamente dando inicio al proceso de precalcificación, el cual tiene como objetivo elevar la temperatura de la harina hasta unos 900 °C aproximadamente; para ello se emplea un Pfister de carbón el cual va a ser el combustible a emplear, el PLC de

horno 3 le envía el valor de la temperatura que hay en el precalcinador al PLC del Píster de carbón, el cual cuenta con un control fuzzy programado internamente y este a su vez envía el set point de flujo de combustible requerido al Píster de carbón. En el proceso de elevar la temperatura de la harina dentro del precalcinador intervienen también gases calientes provenientes del proceso de horno y los del enfriadero a través de un ventilador extractor conocido como ventilador de gas caliente, el cual trabaja de forma fija a la máxima velocidad garantizando el uso de menos energía para calentar dicha harina. Este producto es ingresado al proceso de horno con una temperatura alrededor de los 900 °C aproximadamente, en él se cuenta con un quemador principal el cual el operador le ingresa el set point de flujo desde la sala de control al PLC de carbón y el PLC de carbón le envía su set point de flujo al Píster de carbón. El horno es rotatorio, el cual tiene límites de velocidad, por diseño normalmente se trabaja hasta 4.2 rpm. En este caso el operador ingresa el valor deseado al cual se quiere que gire el horno (destacar que este valor de giro puede variar en dependencia de los valores de las vibraciones originadas en el horno), todo este proceso ocurre de la siguiente manera: el operador ingresa el valor deseado de velocidad de giro al PLC de horno, este lo envía al variador de frecuencia y de esta manera se ajusta el valor de velocidad y la devuelve al PLC para la indicación del operador.

En la salida del horno se encuentra un pirómetro que mide la temperatura a la que sale el clínker, también se analizan los parámetros de calidad del clínker de acuerdo a estos el operador hace ajustes enfocados al valor deseado de combustible en el quemador principal, al flujo de alimentación de harina y a la temperatura de salida del precalentador. Finalmente, el clínker sale a una temperatura aproximada de 1200 a 1400 °C. Seguidamente entra al enfriadero el cual tiene dos funciones fundamentales: recuperar parte del calor con que viene el clínker y la otra función es garantizar que la reacción química de formación de C_2S (silicato bicálcico) a C_3S (silicato tricálcico), ocurra como es debido, ya que esta reacción es reversible y puede ocurrir en sentido contrario. Para que no ocurra esto se procede a un enfriamiento rápido del clínker proveniente del horno, para ello se emplean los tres primeros ventiladores del enfriadero, a través de un lazo de control que controla la diferencia de presión entre el primer y tercer ventilador, garantizando el flujo de aire deseado para llevar al clínker a la temperatura deseada. El resto de los ventiladores del enfriadero son empleados en la recuperación del calor restante del mismo para luego emplearlo a través del conducto de aire

terciario en la molienda de crudo y en la molienda de carbón, además del precalentador. Después de todo este proceso el clínker sale a una temperatura aproximada de 120 a 130 °C aproximadamente siendo posteriormente almacenado en los silos correspondientes.

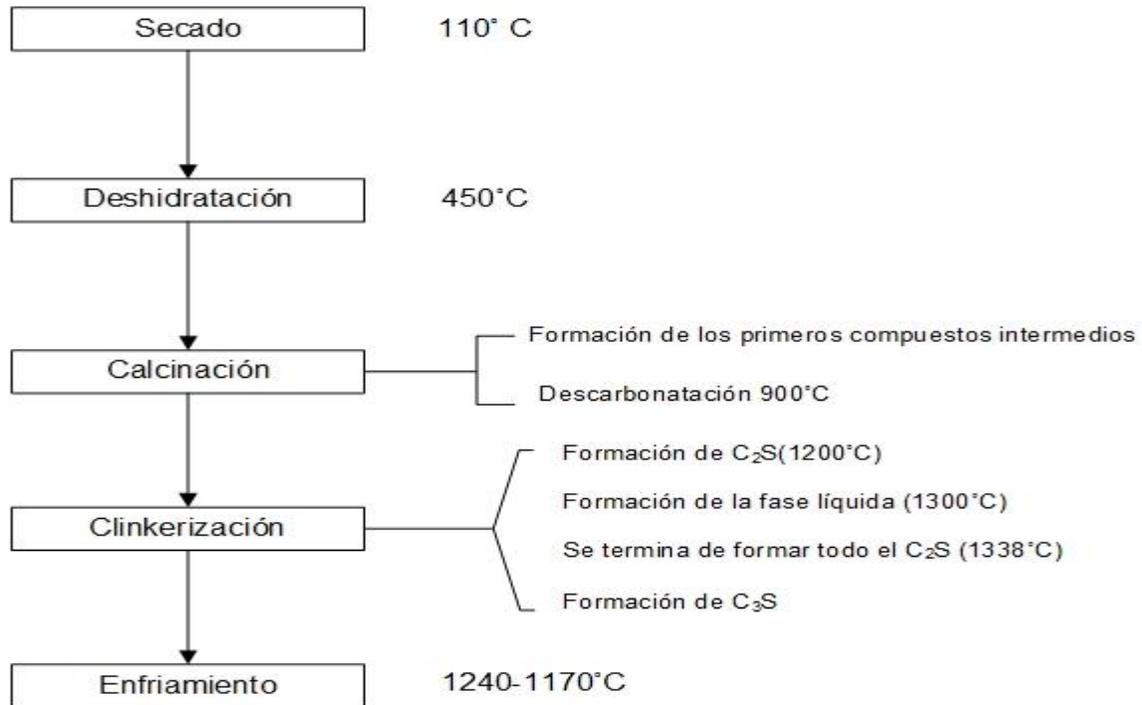


Fig. 2.3 Diagrama de flujo del proceso de obtención de clínker.

2.4 Descripción del Sistema de Control Distribuido(DCS) empleado en la industria.

El sistema de control distribuido empleado en la Fábrica de Cementos Cienfuegos consiste en una arquitectura típica del software PCS7 de Siemens. Esta se compone de una red de PCs conectadas en red sobre las que interactúan ingenieros y operarios de acuerdo a la función que se realiza en cada una. Además, contempla una red de PLCs (Cada PLC es una *Automation Station (AS)*) en una red de anillo redundante que se enlaza a la red de computadoras y sobre la que corre todo el control del proceso. A pesar de contar con un sistema de supervisión, en caso de fallar la comunicación entre las AS y los operadores, el sistema continúa operando automáticamente pues el control del mismo se encuentra en las *Automation Station*.

La red de computadoras se compone de una Estación de Ingeniería (ES), dos Servidores de Operación (OS), un Servidor de Archivos (CAS) y cuatro Clientes (Cl) sobre los que se opera la planta (Se emplean las siglas en inglés).

En la Estación de Ingeniería el grupo de ingenieros de control programa y configura todo el sistema, desde las pantallas de operación de los operadores hasta los cambios que se realizan sobre la programación y configuración de los PLC de campo. Para ello se emplean varios softwares contemplados dentro del PCS7 como pueden ser STEP 7, WinCC, NetPro, etc. Esta PC contempla en su hardware además de la tarjeta de red Ethernet *on board* con la cual se conecta a la red de computadoras, una tarjeta CP mediante la cual se comunica vía Ethernet con la red de PLCs.

Los Servidores de Operación controlan toda la visualización en las pantallas de operación, sirviendo de enlace entre los clientes donde los operadores monitorean la planta y las *Automation Station* donde se ejecuta el control. Para ello cuentan con una tarjeta CP para comunicarse con la red de PLCs y la tarjeta Ethernet *on board* para la comunicación entre PCs. Estos dos servidores están configurados como servidores redundantes con el Servidor 1 como preferencial. Esta configuración implica que en caso de fallar uno de ellos, el otro toma el control de inmediato, impidiendo de esta forma que los operadores pierdan la visualización de lo que está ocurriendo en el proceso.

El CAS es un servidor de archivos que permite almacenar grandes volúmenes de información. Estos datos almacenados pueden ser empleados en registros históricos de variables de proceso, así como de alarmas y advertencias. En este servidor también se almacenan reportes diarios del proceso. Al igual que la Estación de Ingeniería y los Servidores de Operación, este cuenta con una tarjeta CP para la conexión a la red de AS.

Finalmente, desde los clientes se opera el proceso, pero no es posible realizar cambios en las pantallas de operación ni modificar parámetros que impliquen cambios en las protecciones de equipos o que puedan ser relevantes para el proceso. Sin embargo, los operadores pueden graficar tendencias, cambiar *set points*, o gobernar el arranque y parar todos los dispositivos de la planta siempre y cuando el control del mismo esté seleccionado desde la sala de control.

Por su parte la red redundante de PLCs comprende las diez AS del Sistema de Control Distribuido, enlazadas mediante fibra óptica empleando *Fast Ethernet* como estándar de

comunicación. Esta red está conectada además mediante un *switch* con los Servidores de Operación, el servidor de archivos y la Estación de Ingeniería, permitiendo el intercambio de información en ambos sentidos. Existe una AS para cada uno de los subprocesos del sistema que intercambian información entre sí, a su vez cada AS es maestro de una o varias redes Profibus DP. De esta forma los dispositivos de campo pueden ser conectados a la AS como un esclavo Profibus o empleando los módulos de conexión de entrada/salida del mismo.

2.5 Consideraciones finales del capítulo.

1. La industria cuenta con tres procesos productivos directos fundamentales: la obtención de crudo, la producción de clínker y finalmente la obtención de cemento.
2. La descripción detallada del flujo de producción de la empresa y de la estructura de automatización de los principales procesos productivos evidencia el alto requerimiento de la fábrica en cuanto a los medios técnicos de automatización a emplear.
3. El empleo del sistema de control distribuido(DCS) garantiza un factor de disponibilidad elevado, muy superior a los sistemas de control convencionales, además posibilita la comunicación a grandes distancias sin que la señal sea dañada por el ruido o algún otro elemento.

CAPÍTULO 3. Aplicación y análisis de resultados del método desarrollado en la Fábrica de Cementos Cienfuegos.

3.1 Cálculo de los índices cuantitativos para el proceso de obtención de crudo.

Con la explicación detallada expuesta en el capítulo anterior de la estructura los procesos productivos automatizados y del flujo de producción en la Fábrica de Cementos Cienfuegos es posible aplicar los conceptos tratados en el capítulo 1. Un primer paso a efectuar es establecer cuáles son las variables de entradas, las variables de salida, así como las variables internas que influyen directamente en las variables de salida. Analizaremos primero el proceso productivo de obtención de la harina, el cual tiene como objetivo obtener dicho producto con el porcentaje deseado de la mezcla de las materias primas. A continuación, se muestra en la tabla 3.1 la relación de las variables principales presentes en este proceso productivo, además del diagrama de influencia para el proceso de obtención de la harina figura 3.1.

Tabla 3.1. Clasificación de las variables del proceso de obtención de crudo.

Clasificación	Denominación
Variables de salida	Retenido 90 μ Retenido 200 μ 362-SP1%
Variables internas	% abertura del separador 362-MB1.PZ2mbar 362-MB1.PZ2mbar % de llenado del molino
Entrada	Flujo de caliza Flujo de marga Flujo de hierro

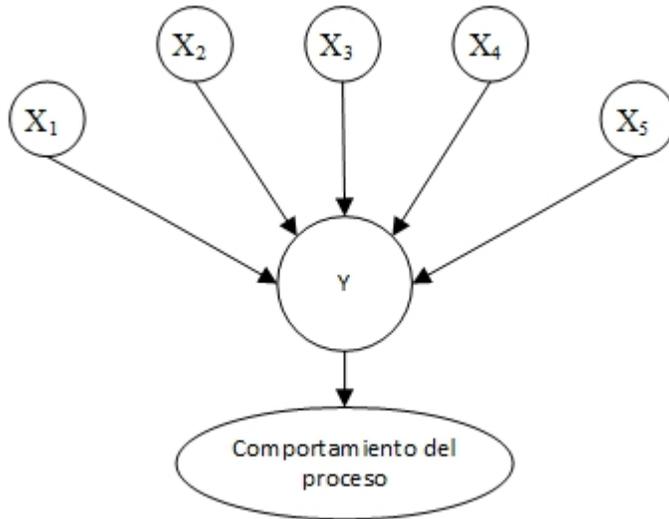


Fig.3.1 Diagrama de influencias para el proceso de obtención de crudo.

Leyenda:

X₁: Flujo de caliza (Entrada).

X₂: Flujo de marga (Entrada).

X₃: Flujo de hierro (Entrada).

X₄: % de llenado del molino (Interna).

X₅: % de abertura del separador (Interna).

Y: Calidad del producto final (Salida).

Grado de observación:

Parámetros observados: Retenido 90 μ, Retenido 200 μ, 362-SP1%, 362-MB1.PZ1mbar, 362-MB1.PZ2mbar, % de llenado del molino, % de abertura del separador, flujo de caliza, flujo de marga, flujo de hierro.

Total de parámetros principales:10

Aplicando la ecuación 1.1

$$K_o = \frac{\text{Parámetros observados}}{\text{Total de parámetros principales}} \times 100\% \quad (1.1)$$

$$K_o = \frac{10}{10} \times 100 = 100\%$$

Este valor cumple con las exigencias de la industria, ya que debido a las características del proceso se exige una rigurosa supervisión, la cual se realiza en el campo o en la sala de control de operadores.

Grado de regulación:

Es preciso establecer el correspondiente diagrama de influencias, el cual es presentado en la figura 3.1. La variable de salida al encontrarse totalmente regulada, se aplica la siguiente ecuación de influencia para la variable Y (Calidad del producto final).

$$Y = a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_4 X_4 + a_5 X_5 \tag{3.1}$$

En esta ecuación tanto X_1 como X_2 y X_3 son variables de entrada del sistema, siendo X_4 y X_5 variables internas, todas ellas directamente reguladas. Queda, por tanto, establecer los valores relativos de los coeficientes desde $a_1 \dots a_5$ en la ecuación anterior.

Considérese los siguientes tantos por ciento de cambio en la calidad de la mezcla para aumentos de 1% en cada una de las variables que influyen, según la ecuación de influencia 3.1

Tabla 3.2. Selección de los valores de ganancia para las variables de influencia en la obtención de crudo.

Variable	Cambio (%)	Ganancia
X_1	1	25
X_2	1	15
X_3	1	9
X_4	1	5
X_5	1	1

Con estos valores de ganancias y aplicando la ecuación para calcular el peso relativo de cada una de estas, como se expresa en la ecuación 1.4, se obtiene:

$$a_i = \frac{G_i}{G_t} \tag{1.4}$$

$$a_1 = \frac{25}{55} = 0,4545 \quad a_2 = \frac{15}{55} = 0,2727 \quad a_3 = \frac{9}{55} = 0,1636 \quad a_4 = \frac{5}{55} = 0,0909 \quad a_5 = \frac{1}{55} = 0,018$$

Al sustituir los valores anteriores en la ecuación de influencia se tiene:

$$Y = 0,4545X_1 + 0,2727X_2 + 0,1636X_3 + 0,0909X_4 + 0,018X_5 \quad (3.2)$$

Es necesario ahora determinar cuáles de las variables que influyen en Y están reguladas directamente por el sistema de automatización. Todas las variables se encuentran reguladas, por lo tanto, aplicando la ecuación 1.5 el grado de regulación que sobre esta variable se ejerce es:

$$K_{ri} = 100 \sum_{i=1}^n a_i \quad (1.5)$$

$$K_{rY} = 100 \times 1 = 100\%$$

Según se establece en la expresión 1.6 es posible calcular entonces el grado de regulación del proceso completo. Como dicho proceso posee una única variable de salida, entonces $P_1=1$ y el grado de regulación será:

$$K_{rj} = \sum_{j=1}^m P_j \times K_{rj} \quad (1.6)$$

$$K_{rp} = 1 \times 100\% = 100\%$$

Grado de dirección:

Se debe determinar como primer paso para la determinación de K_d en el sistema analizado cuáles variables son controlables y cuáles realmente lo están, y aplicar posteriormente el criterio expresado en la ecuación 1.3.

VARIABLES CONTROLABLES: Retenido 90 μ , Retenido 200 μ , 362-SP1%, 362-MB1.PZ1mbar, 362-MB1.PZ2mbar, % de llenado del molino, % de abertura del separador, flujo de caliza, flujo de marga, flujo de hierro. De este total de variables que pueden llegar a ser controlables en distintas formas, exceptuando Retenido 90 μ , Retenido 200 μ , 362-MB1.PZ2mbar, 362-MB1.PZ1mbar, las otras son controladas a través del mando que le proporciona el operador a un elemento de acción final, y el mecanismo garantiza que se realice la operación satisfactoriamente.

$$K_d = \frac{\text{Cantidad de variables controladas}}{\text{Total de variables controlables}} \times 100\% \quad (1.8)$$

$$K_d = \frac{6}{10} \times 100 = 60\%$$

Esto significa que prácticamente algo más de la mitad de las variables de este proceso pueden ser afectadas directamente por el operador de la sala de control(COP).

3.2 Determinación del nivel y grado de la automatización en el proceso de obtención de crudo.

De acuerdo a la tabla 3.3 y 3.4, que contienen las distintas funciones empleadas en la fábrica de Cementos Cienfuegos en los procesos productivos directos, así como los correspondientes índices de complejidad, se procede al cálculo de los indicadores nivel, volumen y grado de la automatización.

Tabla 3.3 Funciones de automatización e índice de complejidad empleadas en los procesos productivos de la Empresa de Cementos Cienfuegos.

Funciones	Índice de complejidad	
Supervisión	Indicación(I)	3
	Indicación(II)	25
	Indicación(III)	18
	Registro	25
	Integración	8
	Alarma	20
Control	Dirección	3
	Regulación(I)	6
	Regulación(II)	15
	Mando a distancia	15
SADPT	Balance	18
	Ajuste de reguladores automáticos	10
	Estabilización	10
	Generación de reportes	18

Tabla 3.4 Funciones de automatización empleadas en el proceso de obtención de crudo.

Función	Cantidad de veces que se realiza
Indicación(I)	53
Indicación(II)	53
Indicación(III)	53
Registro	23
Alarma	53
Dirección	23
Regulación(I)	23
Regulación(II)	23
Mando a distancia	23
Ajuste de reguladores automáticos	1
Estabilización	20

Aplicando la expresión 1.9 puede ser determinado el índice de complejidad total del sistema:

$$I_i = \sum_{i=1}^L M_i I_{ci} \quad (1.9)$$

$$I_i = 53 \times 3 + 53 \times 25 + 53 \times 18 + 23 \times 25 + 53 \times 20 + 23 \times 3 + 23 \times 6 + 23 \times 15 + 1 \times 10 + 20 \times 10 = 4586$$

Donde se hizo uso de los índices de complejidad individuales para cada función. Con este índice calculado se hace uso de la expresión 1.10 para la determinación del nivel de automatización.

$$\text{Nivel de la automatización} = \frac{\text{Cantidad y complejidad de funciones}}{\text{Cantidad de instrumentos}} \quad \text{o} \quad K_n = \frac{I_i}{N_i} \quad (1.10)$$

$$K_n = \frac{4586}{61} = 75,18$$

Para este cálculo se tuvo en cuenta que existen 61 instrumentos en el sistema que son considerados como parte directa de las funciones de automatización empleadas.

Volumen de automatización

El uso de la expresión 1.11 para la determinación de este parámetro proporciona:

$$\text{Volumen de automatización} = \frac{\text{Cantidad de instrumentos}}{\text{Cantidad de variables principales}} \quad \text{o} \quad K_v = \frac{N_i}{N_v} \quad (1.11)$$

$$K_v = \frac{61}{10} = 6,1$$

Grado de automatización

Finalmente se calcula este parámetro general para el sistema mediante el uso de la expresión 1.12

$$K_a = K_n \times K_v \quad (1.12)$$

$$K_a = 75,18 \times 6,1 = 458,6.$$

3.3 Cálculo de los índices cuantitativos para el proceso de obtención de clínker.

Para el desarrollo de los cálculos se hace necesario, primeramente, establecer las variables de entradas, las variables de salida, así como las variables internas que tienen influencia directa en las variables de salida. Analizaremos el proceso productivo de obtención de clínker, el cual tiene como objetivo lograr que los parámetros C₃S (silicato tricálcico), C₂S (silicato bicálcico), S₃A (Aluminato tricálcico), C₄AF (Ferrito aluminato tetracálcico) y cal libre (CaO) se encuentren en los rangos de composición adecuados, logrando así una buena calidad del producto constituido por dichos componentes (Kumar and Krishna, 2016). En la tabla 3.5, que se muestra a continuación, se refleja la relación de las variables principales presentes en este proceso productivo, además del diagrama de influencias para el proceso de obtención de clínker (figura 3.2.).

Tabla 3.5. Clasificación de las variables del proceso de obtención de clínker.

Clasificación	Denominación	
Variables de salida	Temperatura de salida del enfriador	
	Trióxido de azufre(%)	
	Cal libre (%)	
	Silicato tricálsico(%)	
	Silicato bicálsico(%)	
Variables internas	Amperaje del elevador(A)	
	Temperatura de salida del clínker(°C)	
	Presión en la carátula del horno(mbar)	
	Temperatura de entrada de la harina al precalcinador(°C)	
	Temperatura de los aires terciarios(°C)	
	% de O ₂	
	% de CO	
	NO _x (ppm)	
	Entrada	Flujo de alimentación al horno(t/h)
		Vent.473VE1-PZ1(mbar)
Vent.473VE3-PZ1(mbar)		
Flujo de combustible en el quemador principal		
Velocidad de rotación del horno(rpm)		
Flujo de combustible al precalcinador		
Factor de saturación de cal (%)		
Módulo de Sílice(%)		
Módulo de alúmina(%)		
Sodio(%)		

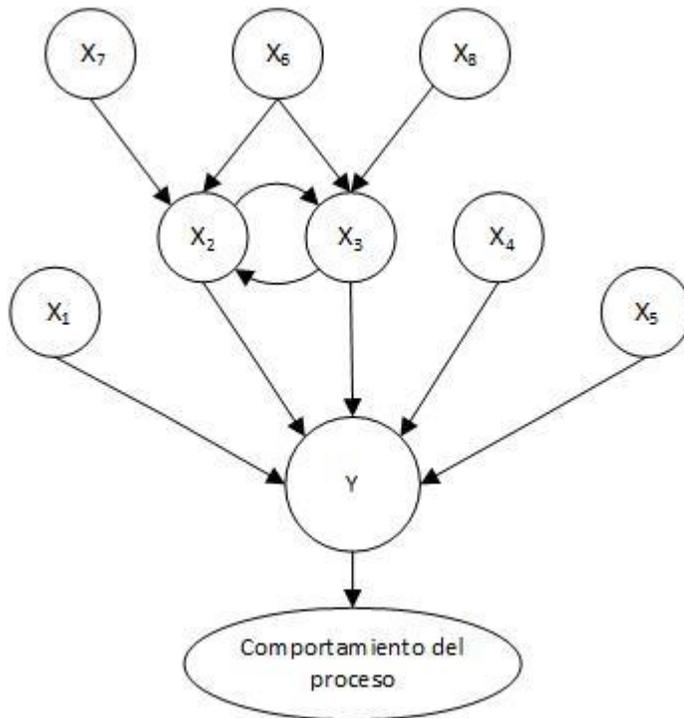


Fig.3.2 Diagrama de influencias para el proceso de obtención de clínker.

Leyenda:

X₁: Calidad de la harina (Entrada).

X₂: Temperatura de salida del precalcinador (Interna).

X₃: Temperatura del quemador principal (Interna).

X₄: Flujo de alimentación (Entrada).

X₅: Velocidad de rotación del horno (Entrada).

X₆: Presión en la cabeza del horno (Interna).

X₇: Flujo de combustible al precalentador (Entrada).

X₈: Flujo de combustible al quemador principal (Entrada).

Y: Calidad del producto final (Salida).

Grado de observación:

Parámetros observados: Temperatura de salida del enfriador, Trióxido de azufre(%), Cal libre (%), Silicato tricálsico(%), Silicato bicálsico(%), Amperaje del elevador(A), temperatura de

salida del clínker (°C), presión en la carátula del horno (mbar), temperatura de entrada de la harina al precalcinador (°C), temperatura de los aires terciarios (°C), % de O₂, % de CO, NOX (ppm), flujo de alimentación al horno (t/h), Vent.473VE1-PZ1 (mbar), Vent.473VE3-PZ1 (mbar), velocidad de rotación del horno (rpm), flujo de combustible en el quemador principal, flujo de combustible al precalcinador, factor de saturación de cal (%), Módulo de Sílice(%), Módulo de alúmina(%), Sodio(%).

Total de parámetros principales: 24

Aplicando la ecuación 1.1

$$K_o = \frac{\text{Parámetros observados}}{\text{Total de parámetros principales}} \times 100\% \quad (1.1)$$

$$K_o = \frac{24}{24} \times 100\%$$

Este valor cumple con las exigencias de la industria, ya que debido a las características del proceso se exige una rigurosa supervisión, la cual se realiza en el campo o en la sala de control de operadores.

Grado de regulación:

Es preciso establecer el correspondiente diagrama de influencias, el cual es presentado en la figura 3.2. La variable de salida al encontrarse totalmente regulada, se aplica la siguiente ecuación de influencia para la variable Y (Calidad del producto final).

$$Y = a_1 X_1 + a_2(a_{21}X_7 + a_{22}X_6 + a_{23}X_3) + a_3(a_{31}X_2 + a_{32}X_6 + a_{33}X_8) + a_4X_4 + a_5 X_5 \quad (3.3)$$

En esta ecuación tanto X_2 como X_3 y X_6 son variables internas del sistema, siendo X_1 , X_4 , X_5 , X_7 y X_8 variables de entrada, todas ellas directamente reguladas, exceptuando X_3 . Queda, por tanto, establecer los valores relativos de los coeficientes $a_1 \dots a_5$ en la ecuación anterior.

Considérese los siguientes tantos por ciento de cambio en la calidad de la mezcla para aumentos de 1% en cada una de las variables que influyen, según la ecuación de influencia 3.3

Tabla 3.6. Selección de los valores de ganancia para las variables de influencia en la obtención de clínker.

Variable	Cambio (%)	Ganancia
X_1	1	18
X_2	1	22
X_3	1	23
X_4	1	10
X_5	1	5

Tabla 3.7. Selección de los valores de ganancia para las variables de influencia en la temperatura de salida del precalcinador (X_2).

Variable	Cambio (%)	Ganancia
X_3	1	12
X_6	1	6
X_7	1	4

Tabla 3.8. Selección de los valores de ganancia para las variables de influencia en la temperatura del quemador principal (X_3).

Variable	Cambio (%)	Ganancia
X_2	1	13
X_6	1	7
X_8	1	3

Con estos valores de ganancias de la tabla 3.6 y aplicando la ecuación para calcular el peso relativo de cada una de estas en el proceso en general, como se expresa en la ecuación 1.4, se obtiene:

$$a_i = \frac{G_i}{G_t} \tag{1.4}$$

$$a_1 = \frac{18}{78} = 0,2307 \quad a_2 = \frac{22}{78} = 0,2820 \quad a_3 = \frac{23}{78} = 0,2948 \quad a_4 = \frac{10}{78} = 0,1282 \quad a_5 = \frac{5}{78} = 0,0641$$

Analizando la influencia de las variables en la temperatura del precalcinador (X_2), y partiendo de los valores correspondientes de ganancia, se tiene:

$$a_{21} = \frac{12}{22} = 0,5454 \quad a_{22} = \frac{6}{22} = 0,2727 \quad a_{23} = \frac{4}{22} = 0,1818$$

Analizando la influencia de las variables en la temperatura del quemador principal (X_3), y partiendo de los valores correspondientes de ganancia, se tiene:

$$a_{31} = \frac{13}{23} = 0,5652 \quad a_{32} = \frac{7}{23} = 0,3043 \quad a_{33} = \frac{3}{23} = 0,1304$$

Al sustituir los valores anteriores en la ecuación de influencia se tiene:

$$Y = 0,2307X_1 + 0,2820(0,5454X_7 + 0,2727X_6 + 0,1818X_3) + 0,2948(0,5652X_2 + 0,3043X_6 + 0,1304X_8) + 0,1282X_4 + 0,0641X_5 \quad (3.4)$$

Es necesario ahora determinar cuáles de las variables que influyen en Y están reguladas directamente por el sistema de automatización. En el caso analizado todas las variables se encuentran reguladas a excepción de X_3 , por lo tanto, aplicando la ecuación 1.5 el grado de regulación que sobre esta variable se ejerce es:

$$K_{ri} = 100 \sum_{i=1}^n a_i \quad (1.5)$$

$$K_{rY} = 100 \times 0,705 = 70,5\%$$

Según se establece en la expresión 1.6, es posible calcular entonces el grado de regulación del proceso completo. Como dicho proceso posee una única variable de salida, entonces

$P_1 = 1$ y el grado de regulación será:

$$K_{rj} = \sum_{j=1}^m P_j \times K_{rj} \quad (1.6)$$

$$K_{rp} = 1 \times 70,5\% = 70,5\%$$

Grado de dirección: Se debe determinar como primer paso para la determinación de K_d en el sistema analizado cuáles variables son controlables y cuáles realmente lo están, y aplicar posteriormente el criterio expresado en la ecuación 1.8.

Variables controlables: Temperatura de salida del enfriador, Trióxido de azufre(%), Cal libre (%), Silicato tricálsico(%), Silicato bicálsico(%), temperatura de salida del clínker(°C), presión en la carátula del horno(mbar), temperatura de los aires terciarios(°C), flujo de alimentación al horno(t/h), Vent.473VE1-PZ1(mbar), Vent.473VE3-PZ1(mbar), flujo de combustible en el quemador principal, velocidad de rotación del horno(rpm), flujo de

combustible al precalcinador, factor de saturación de cal (%), Módulo de Sílice(%), Módulo de alúmina(%), Sodio(%).

De este total de variables que pueden llegar a ser controlables en distintas formas, exceptuando: Temperatura de salida del enfriador, Trióxido de azufre (%), Cal libre (%), Silicato tricálsico (%), Silicato bicálsico (%), temperatura de salida del clínker(°C) y flujo de combustible en el quemador principal, las otras son controladas a través del mando que le proporciona el operador a un elemento de acción final, y el mecanismo garantiza que se realice la operación satisfactoriamente, a excepción de la temperatura del precalentador la cual posee un lazo de control fuzzy, mediante el cual el operador le ingresa el valor deseado de temperatura que mediante el flujo de combustible controla el valor de ajuste de temperatura que le da el variador de frecuencia.

$$K_d = \frac{\text{Cantidad de variables controladas}}{\text{Total de variables controlables}} \times 100\% \quad (1.8)$$

$$K_d = \frac{11}{18} \times 100 = 61,1\%$$

Esto significa que prácticamente algo más de la mitad de las variables de este proceso pueden ser afectadas directamente por el operador de la sala de control(COP).

3.4 Determinación del nivel y grado de la automatización en el proceso de obtención de clínker.

Partiendo de los datos mostrados en las tablas 3.3 y 3.7, que contienen las distintas funciones empleadas en la Fábrica de Cementos Cienfuegos en los procesos productivos directos, así como los correspondientes índices de complejidad, se procede al cálculo de los parámetros nivel, volumen y grado de la automatización.

Tabla 3.7 Funciones de automatización empleadas en el proceso de obtención de clínker.

Función	Cantidad de veces que se realiza
Indicación(I)	9
Indicación(II)	9
Indicación(III)	9
Registro	9
Integración	9
Alarma	9
Dirección	5
Regulación(I)	7
Regulación(II)	4
Mando a distancia	6
Ajuste de reguladores automáticos	5
Estabilización	6
Balance	4
Generación de reportes	3

Aplicando la expresión 1.9 puede ser determinado el índice de complejidad total del sistema:

$$I_i = \sum_{i=1}^L M_i I_{ci} \quad (1.9)$$

$$I_i = 9 \times 3 + 9 \times 25 + 9 \times 18 + 9 \times 25 + 9 \times 8 + 9 \times 20 + 5 \times 3 + 7 \times 6 + 4 \times 15 + 6 \times 15 + 4 \times 18 + 5 \times 10 + 6 \times 10 + 3 \times 18 = 1334$$

Donde se hizo uso de los índices de complejidad individuales para cada función. Con este índice calculado se hace uso de la expresión 1.10 para la determinación del nivel de automatización.

$$\text{Nivel de la automatización} = \frac{\text{Cantidad y complejidad de funciones}}{\text{Cantidad de instrumentos}} \quad \text{o} \quad K_n = \frac{I_i}{N_i} \quad (1.10)$$

$$K_n = \frac{1334}{40} = 33,35$$

Para este cálculo se tuvo en cuenta que existen 40 instrumentos en el sistema que son considerados como parte directa de las funciones de automatización empleadas.

Volumen de automatización

El uso de la expresión 1.11 para la determinación de este parámetro proporciona

$$\text{Volumen de automatización} = \frac{\text{Cantidad de instrumentos}}{\text{Cantidad de variables principales}} \quad \text{o} \quad K_v = \frac{N_i}{N_v} \quad (1.11)$$

$$K_v = \frac{40}{24} = 1,6$$

Grado de automatización

Finalmente se calcula este parámetro general para el sistema mediante el uso de la expresión 1.12

$$K_a = K_n \times K_v \quad (1.12)$$

$$K_a = 33,35 \times 1,6 = 53,36$$

3.5 Valoración económica y medioambiental.

Las exigencias de la competencia en el mercado internacional hacen decisiva la automatización, esta, como cualquier otra inversión, debe someterse al impacto financiero de la relación costo/beneficio. Como en todo negocio es importante que la automatización sea autosustentable y contribuya de forma definitiva a los ingresos de la empresa, debido a que en la economía moderna, el factor tecnológico es quien proporciona el cambio y la reducción de costos más significativos, de allí el papel fundamental que juega la metodología empleada en la presente investigación, ya que permite un análisis de factibilidad y se convierte en una herramienta que garantiza el ahorro de tiempo y de dinero a la hora de poner en marcha cualquier proyecto de automatización.

La investigación llevada a cabo permitió identificar como variable no controlada directamente la temperatura del quemador principal en el proceso de obtención de clínker, lo que provoca emisiones no controladas de gases de efecto invernadero a la atmósfera, si en el proceso de rediseño de la automatización el cual forma parte del proyecto “Modelado de la automatización integrada del sistema de producción en la Empresa Cementos Cienfuegos S.A.” se tiene en cuenta el manejo de esta variable, disminuiría el impacto negativo de esta sobre el medio ambiente.

3.6 Consideraciones finales del capítulo.

Partiendo de los resultados obtenidos con la aplicación de la metodología seleccionada se arriban a las siguientes conclusiones parciales:

1. Se observa que los parámetros denominados nivel y volumen de la automatización, Kn y Kv , así como el grado general Ka son parámetros que sirven más para comparar dos variantes de sistemas de automatización para un mismo proceso industrial que para caracterizar en valor absoluto un determinado sistema de automatización. Por otra parte, queda demostrado que el grado de observación, regulación y dirección dan una idea de cuan presente está la automatización en un sistema automatizado.
2. Mediante el cálculo de los parámetros establecidos se evidencia que los procesos productivos de obtención de crudo y clínker presentan un estado de la automatización aceptable, pero de acuerdo a las características dinámicas que se requieren en la fábrica necesitan ser atendidas.

CONCLUSIONES

Como resultado final de esta investigación se ha evaluado la automatización en los principales procesos tecnológicos de la línea de producción en la Empresa de Cementos Cienfuegos. A partir de este resultado, se plantean las siguientes conclusiones generales:

1. Se consiguió evaluar la automatización en los principales procesos tecnológicos de la línea de producción en la Empresa de Cementos Cienfuegos aplicando una metodología adaptada de los principales conceptos que corresponden a la automatización de un proceso industrial, tales como observación, regulación, dirección entre otros.
2. La metodología empleada es una herramienta de carácter relativo para evaluar la automatización en una empresa, ya que no permite la comparación con otra empresa, esto puede ser considerado como una limitante dado que no es una evaluación global de la automatización.
3. Se determinó el nivel y grado de la automatización en los (PPD) respectivos, llegándose a conocer que en el proceso productivo de obtención de crudo el nivel de la automatización es 75,18 y un grado de la automatización igual a 458,6, mientras que en el de obtención de clínker el nivel de la automatización fue de 33,35 y el grado de la automatización 53,36.

RECOMENDACIONES

Para establecer la necesaria continuidad que debe tener este trabajo se recomienda lo siguiente:

1. Continuar trabajando en el perfeccionamiento de esta metodología, incluyendo aspectos tales como comunicación entre equipos e instrumentos tanto en lo cuantitativo como cualitativo, dado la evidente importancia actual de la trasmisión de datos en todo sistema de automatización.
2. Evaluar posibles soluciones para el aumento del nivel y grado de la automatización.
3. Aplicar la metodología empleada en otras empresas para buscar generalidades que permitan su perfeccionamiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUILAR, A. & BRIONES, W. 2015. *Diseño de un sistema de supervisión y control para el proceso de obtención de clínker en el horno vertical 4 de la Planta Industrial Cementos Selva*. Ingeniero Electrónico., Universidad Privada Antenor Orrego.
- BENÍTEZ-PINA, I., SILVA, J. R., GOMIS, O. & SOTOMAYOR, S. 2010. Modelado formal de la automatización del molino de clínker. *Ciencia en su PC.*, 3, 71-85.
- BUÑAY, J. & GUAMÁN, R. 2015. *Implementación de una estación de fijación y prensado con un PLC para el laboratorio de control y automatización de procesos industriales de la Facultad de Mecánica de la ESPOCH.*, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- CALLEJAS, F., GONZÁLEZ, G., SÁNCHEZ, E., YESCAS, I. & ZERMEÑO, C. 2007. *Automatización de un puente Grúa.*, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.
- CASTRO, J. G., PADILLA, J. J. & ROMERO, E. 2005. Metodología para realizar una automatización utilizando PLC. *Impulso: Revista De Electrónica, Eléctrica y Sistemas Computacionales*, 18-21.
- CORDERO, D., CHACÓN, E., SAÑAY, I. & CRIOLLO, D. 2016. Modelo de procesos para la automatización del área de producción en el sector de la industria cementera pública del Ecuador. *Ingenius Revista de Ciencia y Tecnología*, 16, 51-63.
- CÓRDOBA, E. 2006. Manufactura y automatización. *Ingeniería e Investigación*, 26, 120-128.
- GONZÁLEZ, D., VEGA, B. & HERRERA, F. 2017. Modelo para controlar la temperatura de salida del calcinador en la fabricación de cemento. *XVII SIMPOSIO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA (SIE 2017)*. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas
- GUALLI, F. A. & TUCUNANGO, D. 2015. *Automatización y Estudio de Optimización del Rascador de Recuperación MIAG de la Unión Cementera Nacional Planta Chimborazo*. Tesis de Diploma, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- HERRERA, F., RODRÍGUEZ, F. & NEUMANN, P. 1990. *Proyectos de Automatización*, Ciudad de La Habana, Cuba.
- JUNCO, L. & MARTÍN, J. 2017. *Caracterización de la Automatización en la Fábrica de Cementos Cienfuegos S.A.*. Universidad Marta Abreu de Las Villas.
- KUMAR, A. & KRISHNA, H. 2016. Online monitoring of cement clinker quality using multivariate statistics and Takagi-Sugenofuzzy-inferencetechnique. *Elsevier*, 57, 1-17.
- LOJÁN, E. 2015. *Automatización de la línea de ensamble de congeladores e ingreso de producto terminado, en la Empresa Induglob, SA*. Máster, Universidad Politécnica Salesiana.
- MARCHÁN, E. 2016. *La creciente automatización de los puestos de trabajo*. Tesis de Diploma, Universidad Miguel Hernández.

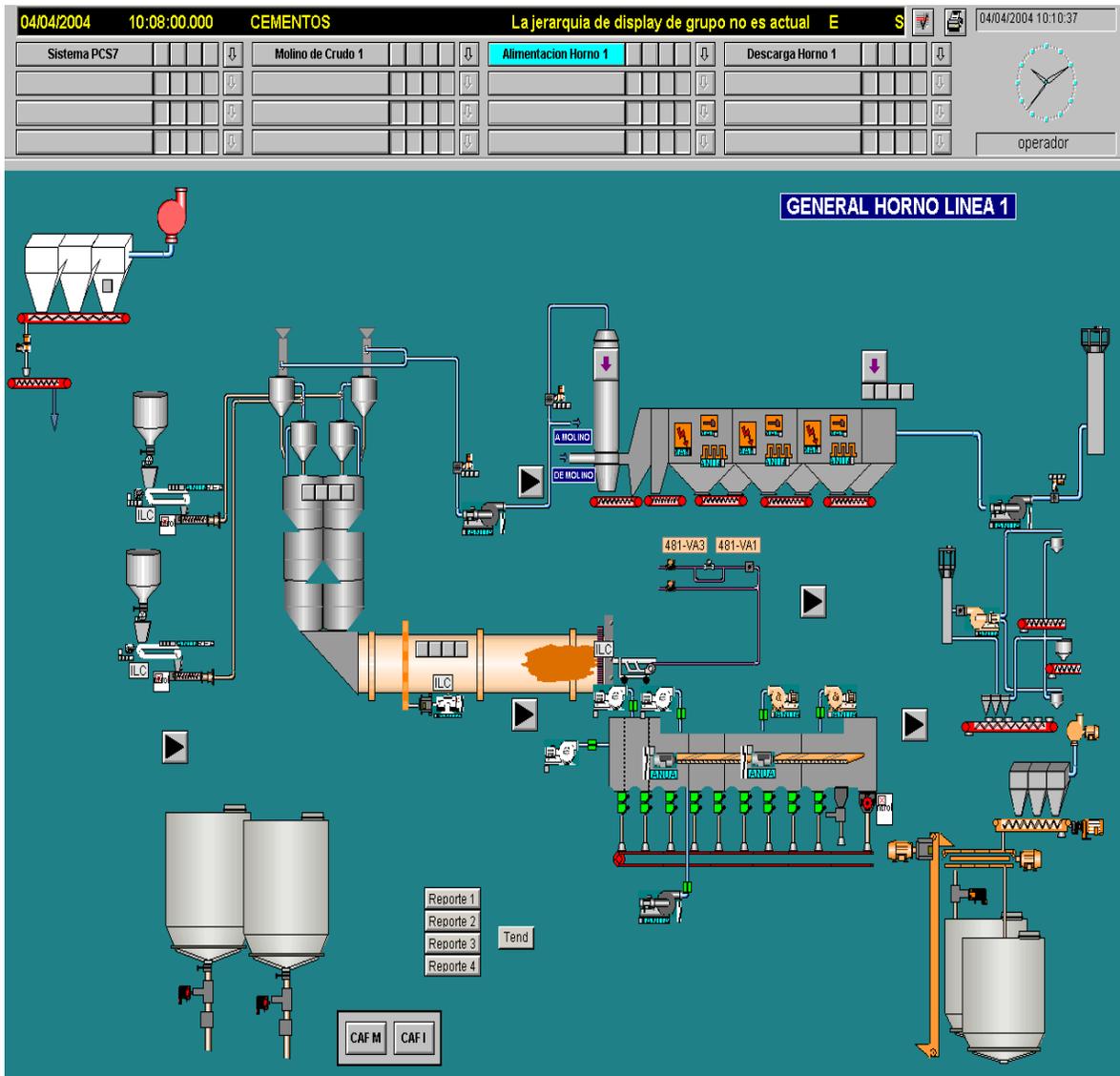
- MILTENBURG, J. 2005. *Manufacturing Strategy, how to formulate and implement a winning plan.*, Estados Unidos.
- MURILLO, Z. & HERNÁNDEZ, R. 2013. *Estudio de automatización del proceso de control y monitoreo de elaboración de tesis de estudiantes de la carrera Ingeniería de Sistemas.*, Universidad Politécnica Salesiana. .
- ORDAX, J. 2005. *Automatización de procesos industriales.* Universidad Pontificia Comillas.
- OVALLE, A., OCAMPO, O. & ACEVEDO, M. T. 2013. Identificación de brechas tecnológicas en automatización industrial de las empresas del sector metalmeccánico de Caldas, Colombia *Ingeniería y Competitividad*, 15, 171 – 182.
- PACHECO, S. & VILLAMARÍN, J. 2008. *Automatización de los procesos operativos en la Empresa EVEREADY Ecuador C.A.* . Tesis de Diploma, Escuela Politécnica Nacional.
- REBI, M. & RANI, A. An Overview of Ergonomic Issues with Respect to the Levels of Automation in Manufacturing. Malaysian Ergonomics Conf, 2001 Malaysia.
- RODRÍGUEZ, R. 2016. *Automatización de métodos radioquímicos para la separación y preconcentración de radionúclidos en muestras ambientales.* . PhD Tesis Doctoral, Universidad de las Islas Baleares.
- RUEDAS, C. *Automatización Industrial: Áreas de aplicación para Ingeniería.* . EMI- 2010 2010 Universidad Rafael Landivar, Guatemala.
- SÁNCHEZ, V. & PIZARRO, D. 2010. Diagnóstico del nivel de automatización en las pequeñas y medianas industrias de la ciudad de Cuenca. . *Ingenius Revista de Ciencia y Tecnología*, 44-56.
- SARACHE-CASTRO, W., CÁRDENAS-AGUIRRE, D. & GIRALDO, J. 2005. Procedimiento para la definición y jerarquización de prioridades competitivas de fabricación. Aplicaciones en las pymes de la industria metalmeccánica. *Ingeniería y Competitividad*, 7, 84-91.
- VÁZQUEZ, J. 2017. *Caracterización de la automatización de los accionamientos en la Fábrica de cementos de Cienfuegos.* Tesis de Diploma, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.

ANEXOS

Anexo I Horno de clínker de la Fábrica de Cementos Cienfuegos.



Anexo II Diagrama funcional del horno de clínker de la Fábrica de Cementos Cienfuegos.



Anexo III Guías de calidad para el control de los procesos.



Materias Primas								
Especificaciones	Hdad	FSC	CaO mín	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃ max	Ret 90	Ret 75
Caliza	≤ 6,0	333±105	≥ 48 %	1,88±0.52		≤ 0.25	Suma ≤ 6 %	
♣ Marga	≤ 12			8.2±0.73		≤ 0.21		
♣ Arcilla	≤ 12,0				40 ± 8			
♣ Tobas zeolitizadas	≤ 12,0							
♣ Yeso	≤ 6,0					32.0-36.0		
Salida de los molinillos								
Retenido en 4 mm, %			≤ 40					
Retenido en 12.5 mm, %			0					
Harina Cruda								
Requisitos					Especificaciones			
SFSC					≤ 15			
Retenido en 200 mm, %					≤ 2			
S Ret 200 mm					≤ 1			
Retenido en 0.09 mm, %					15 - 17			
Harina Alimentación								
Requisitos					Especificaciones			
FSC			Línea 3	96 - 98				
			Línea 1	100 - 102				
MS			Línea 3	2.60 - 2.70				
			Línea 1	2.45 - 2.55				
MA			1.40 - 1.60					
Na			0.16 - 0.25					
SFSC			≤ 1,2					
Petcoke molido								
Requisitos			Materias primas			Horno		
Humedad %			≤ 1			≤ 2		
Retenido % (tamiz 90 micras)			≤ 0.8			≤ 1		
Clinker								
Requisitos				Especificaciones				
Cal Libre %				≤ 2				
C ₃ S, %				≥ 60				
C ₂ S, %				≤ 15				
SO ₃ , %				≤ 2.2				
Cemento								
Requisitos		P-35 Tipo 1	P-35	PP-25	PP-35			
Blaine, cm ² /g		3000 - 3200	3000 - 3200	3200-3600	3400-3800			
SO ₃ , %		2.7 - 3.0	2.8 - 3.3 Prov	2.8- 3.3 Prov	2.7 - 3.0			
Retenido%		< 2,5	≤ 3	≤ 6.0	≤ 4			
SiO ₂		-	Sin guía Prov	Sin guía Prov	≤ 23			
% adición		-	4 - 5	18 - 20	≤ 15			
Cal Libre %		≤ 1.5	≤ 1.5	≤ 1.5	≤ 1.5			
Despacho de Cemento								
Requisitos					Especificaciones			
Peso medio de la Bolsa/ camión nacional					Media ≥ 42,5 Todos los camiones			
Peso medio de la Bolsa/ camión para exportación					Media 42,5 ± 1 kg Todos los camiones			

Anexo IV Guías de calidad para el control de los procesos.



Cementos Cienfuegos SA

Coeficiente de variación semanal (CV)

Producto	Requisito (CV)	Especificación
Caliza	Al ₂ O ₃	≤ 28
	FSC	≤ 32
Marga	Al ₂ O ₃	≤ 9
Harina de Alimentación	MS	≤ 1
	MA	≤ 7
Clinker	Cal Libre	≤ 10
	C ₃ S	≤ 8
	C ₂ S	≤ 22
Cemento P-35	Blaine	≤ 3
	Retenido 0.09 mm	≤ 106
	SO ₃	≤ 9
	SiO ₂	≤ 5
Cemento PP-25	Blaine	≤ 6
	Retenido 0.09 mm	≤ 103
	SO ₃	≤ 9
	SiO ₂	≤ 10

Indicador de Calidad Mensual (ICP)

Áreas	2018	Proceso	2018
MP	0.86	Materias Primas	0.86
HC	0.94	Producción	0.92
HH	0.80		
Ck3	0.99		
Combustible	1.00		
Cemento	0.94	Despacho	0.97
Entrega	0.97		
Fábrica	0.92	Dirigir CCSA	0.92