

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OPCIÓN I.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

**“REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE LAS ACTIVIDADES DE
MANTENIMIENTO DEL TANDEM DE MOLINOS DE
UN INGENIO AZUCARERO”.**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA
INDUSTRIAL**

PRESENTA:

Ing. José Eduardo Mayoral Hernández

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Fernando Ortiz Flores

CODIRECTOR DE TESIS:

M.C. José Octavio Rico Contreras



SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



Subsecretaría de Educación Superior
Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico de Orizaba

"Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos"

FECHA: 01/12/2017
DEPENDENCIA: POSGRADO
ASUNTO: Autorización de Impresión
OPCIÓN: I

C. JOSE EDUARDO MAYORAL HERNANDEZ
CANDIDATO A GRADO DE MAESTRO EN:
INGENIERIA INDUSTRIAL

De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros de Enseñanza Técnica Superior, dependiente de la Dirección General de Institutos Tecnológicos de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

"REDUCCION DEL TIEMPO DE LAS ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO DEL TANDEM DE MOLINOS DE UN INGENIO AZUCARERO".

Comunico a Usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

A T E N T A M E N T E


RUBEN POSADA GOMEZ

JEFE DE LA DIV. DE ESTUDIOS DE POSGRADO

C.A. TITULACIÓN



**SECRETARIA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA
INSTITUTO
TECNOLÓGICO
DE ORIZABA**

ggc





"Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos"

FECHA : 28/11/2017

ASUNTO: Revisión de Trabajo Escrito

C. RUBEN POSADA GOMEZ
JEFE DE LA DIVISION DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACION.
P R E S E N T E

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C. :

JOSE EDUARDO MAYORAL HERNANDEZ

la cual lleva el título de:

"REDUCCION DEL TIEMPO DE LAS ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO DEL TANDEM DE MOLINOS DE UN INGENIO AZUCARERO".

Y concluyen que se acepta.

A T E N T A M E N T E

PRESIDENTE : DR. **FERNANDO ORTIZ FLORES**

SECRETARIO : M.C. **JOSE OCTAVIO RICO CONTRERAS**

VOCAL : DR. **MARIO LEONCIO ARRIOJA RODRIGUEZ**

VOCAL SUP. : DR. **ALBERTO ALFONSO AGUILAR LASSERRE**

FIRMA
FIRMA
FIRMA
FIRMA

EGRESADO (A) DE LA MAESTRIA EN **INGENIERIA INDUSTRIAL**

OPCION: I **Tesis**



Agradecimientos

No hay palabras para describir la satisfacción que siento en estos momentos. Es un logro importante para mí, en mi vida profesional y personal, y no lo hubiera logrado sin el apoyo de muchas personas que estuvieron, están y estarán siempre a mi lado apoyándome en cada paso que doy. A todos ustedes muchas gracias.

A Dios: *por nunca dejarme sólo en cada paso de mi vida, personal y profesional. Porque en cada momento de mi vida siento su amor y en Él siempre confiaré. Le agradezco por siempre poner en mi camino a excelentes personas que han ayudado en mi formación profesional y, sobre todo, por darme una familia y amigos que siempre me han apoyado en las buenas y en las malas. Gracias Dios porque sin ti no sería nada.*

A mi mamá María Fidelina: *no hay palabras para describir el amor que te tengo, eres un pilar importante de mi vida mamá. Te agradezco por educarme desde pequeño para ser siempre un mejor hijo, un mejor profesional y una mejor persona; por el esfuerzo que realizas todos los días, por darme todo sin pedir nada a cambio. Ahora y siempre te agradeceré tus consejos, tu motivación y tus palabras. En aquellas desveladas que pasaste conmigo y preocuparte siempre por mí. Gracias por que sin ti no lo hubiera podido lograr. Este logro es tuyo mamá.*

A mi papá José Luis: *sabes que te amo con todo mi corazón. Eres un ejemplo para mí, ya que desde niño me enseñaste el valor del trabajo, el compromiso, la responsabilidad, la dedicación al trabajo; siempre te agradeceré que hayas inculcado en mí esos valores. Se que siempre voy a contar con tu apoyo porque siempre me has ayudado cuando más lo necesito. Gracias porque ésta es la mayor herencia que puedo recibir de ti. Eres un pilar importante en mi vida. Este logro es tuyo papá.*

A mi hermano Sergio Daniel: *porque a pesar de las peleas que como hermanos no pueden faltar, sabes que te amo. Gracias por ser un apoyo cuando lo necesito, por siempre escucharme, por ser un amigo más en mi vida.*

A mi familia: a mi tía Lulú, mi tía Reyna, mi tío Chucho, mi tía Tere, mi tío Tele, mi tío Arturo, mi tío Carlos. A todos mis primos: Miriam, Isaac, Lupe, Chucho, Chayo, Sara, Manuel, Joel, Luis, Leti, Rosa, Yola, Brenda, Anahí, Hugo, Beto, y por supuesto, a todos mis sobrinos.

Al Dr. Fernando: le agradezco su apoyo incondicional a lo largo de estos años. Gracias por los conocimientos que compartió conmigo los cuales estoy seguro me servirán en mi vida profesional y laboral. Me enseñó a ser disciplinado y autodidacta y que el día tiene 24 horas para seguir trabajando. Gracias por su tiempo, su gran paciencia conmigo y lo más importante, en lo personal, su amistad. Gracias por abrirme las puertas de su hogar y por los buenos convivios que tuvimos comiendo carnitas y cantando. Es usted parte importante de este logro y por el cual siempre voy a agradecerle. Espero contar siempre con su amistad y apoyo.

Al Dr. José Octavio: le agradezco la oportunidad que me brindó para realizar este trabajo en el ingenio azucarero, porque sin ella no hubiera sido posible este logro. Gracias por su paciencia, por sus conocimientos compartidos, por guiarme en este trabajo. Le agradezco su apoyo y comprensión en todo momento. Me llevo de usted su profesionalismo y aprendí que con esfuerzo y mucha dedicación se pueden lograr las cosas. Espero contar siempre con su amistad y apoyo.

Al Maestro Mortera: le agradezco sus enseñanzas y el apoyo que siempre me brindó a lo largo de la maestría. Lo admiro como persona y como maestro. Gracias por el tiempo que le dedicó a la elaboración de este trabajo, sus aportaciones, su paciencia y sobre todo su amistad. Agradezco haber trabajado a su lado maestro y espero que siempre cuente con su amistad y apoyo incondicional.

Al Dr. Mario: te agradezco el tiempo y apoyo que siempre tuviste hacia mí. Te agradezco todo el conocimiento que compartiste conmigo y las aportaciones que realizaste a este trabajo. Gracias por tu amistad; te admiro y respeto Mario.

Al Maestro Magno: gracias por su apoyo y confianza para ingresar a la maestría.

A Sebas, Bere, Mau, Javier y Lechuga: por su apoyo y amistad incondicional que siempre me han brindado. Hemos pasado muchos momentos juntos que no cambiaría por nada y siempre serán parte de cada momento de mi vida.

A Mariana, Fátima, Claudia, Rocío, Ricardo, Hoa, José Luis y Leopoldo: les agradezco su amistad incondicional. Siempre me han apoyado a lo largo de estos años, en la carrera y en lo personal. Su amistad es muy valiosa para mí, lo saben, y se que será para siempre.

A Luisa, Yuri, Mayra, Aracely, Cari, Chava, Missa y Jason: por recorrer juntos la maestría. Me llevo lo mejor de cada uno de ustedes. Me ensañaron muchas cosas, tanto personales como profesionales. Nunca los olvidaré y los considero a todos grandes amigos.

A Maritza, Anabel, Zaire, Betty, Mildred, Bely, Alonso, Germán, Kirtan, Luis Eduardo: agradezco haberlos conocido a cada uno de ustedes. La maestría me ha dejado buenos amigos y obviamente ustedes forman parte de ellos. Espero siempre contar con su amistad.

A Silvia, Tamara, Amy, Itzel, Noé, Héctor: agradezco haberlos conocido. En muy poco tiempo formamos una buena amistad y espero que así sea por mucho tiempo.

A la señora Laura y Gina: por brindarme su amistad y apoyo en la biblioteca. Gracias siempre por sus palabras de aliento para que terminara la maestría.

Al Grupo Azucarero: gracias por las atenciones prestadas en las visitas que realice al ingenio azucarero y su confianza en la elaboración del presente trabajo. Este agradecimiento incluye a todo el personal del ingenio y a las personas que amablemente me recibieron y brindaron su apoyo, amistad y confianza en las oficinas corporativas.

Resumen

La industria azucarera a nivel mundial tiene grandes retrasos en materia de productividad, competitividad e innovación; la industria azucarera mexicana no es la excepción. Sin embargo, en la última década algunos grupos empresariales, en México, que poseen ingenios azucareros han realizado proyectos de clase mundial y puesto en marcha prácticas innovadoras.

Un grupo azucarero¹, formado por cuatro ingenios, desea ser parte de esos grupos empresariales, particularmente, un ingenio azucarero ubicado en el [REDACTED] estado de Veracruz mostró interés por mejorar la administración y control del mantenimiento del tándem de molinos con el objetivo de reducir el tiempo de sus actividades.

Para reducir el tiempo de las actividades de mantenimiento del tándem de molinos se utilizaron técnicas de ingeniería industrial, tales como la Estructura de Descomposición del Trabajo (*WBS*) para representar las relaciones entre las actividades de mantenimiento y el proyecto, el Método del Camino Crítico (*CPM*) para planificar el proyecto, la Técnica de Evaluación y Revisión de Proyectos (*PERT*) para estimar los tiempos de las actividades de mantenimiento y la simulación de Monte Carlo para expresar como distribuciones de probabilidad valores inciertos de las estimaciones de los tiempos.

Se desarrolló una propuesta de mejora la cual consistió en agregar otra grúa viajera para colaborar en el mantenimiento del tándem. Con la mejora propuesta y las técnicas de ingeniería industrial mencionadas se logró reducir el tiempo en un 28.67%, es decir, 33 días hábiles.

Para la validación de los resultados obtenidos se utilizó una prueba de hipótesis para comparar el tiempo actual de las actividades de mantenimiento y el tiempo de las actividades de mantenimiento después de implementar la mejora propuesta.

¹ Por motivos de privacidad, no se mencionó el nombre del grupo azucarero que es dueño del ingenio azucarero donde se realizó el presente trabajo.

Abstract

The sugar industry worldwide has great delays in terms of productivity, competitiveness and innovation; Mexican sugar industry is not the exception. However, in the last decade some business groups, in Mexico, that own sugar mills have done world-class projects and implemented innovative practices.

A sugar group², formed by four sugar mills, wants to be part of these business groups, particularly, a sugar mill located in the [REDACTED] state of Veracruz showed interest in improving the administration and control of maintenance of the mill tandem with the objective of reduce the time of his activities.

To reduce the time of mill tandem maintenance activities, industrial engineering techniques were used, such as the Work Breakdown Structure (*WBS*) to represent the relationships between maintenance activities and the project, the Critical Path Method (*CPM*) to plan the project, the Project Evaluation and Review Technique (*PERT*) to estimate the times of the maintenance activities and the Monte Carlo simulation to express as probability distributions uncertain values of the estimates of the times.

An improvement proposal was developed which consisted in adding another traveling crane to collaborate in the maintenance of the tandem. With the proposed improvement and the mentioned industrial engineering techniques, the time was reduced by 28.67%, that is, 33 working days.

For the validation of the results obtained, a hypothesis test was used to compare the current time of the maintenance activities and the time of the maintenance activities after implementing the proposed improvement.

² For reasons of privacy, the name of the sugar group that owns the sugar mill where the present work was done was not mentioned.

Resumen	<i>i</i>
Abstract	<i>ii</i>
Contenido	<i>iii</i>
Índice de Figuras	<i>vii</i>
Índice de Tablas	<i>xi</i>
Introducción	1
Objetivo general	2
Objetivos particulares	2
Justificación	3
Hipótesis	4
Contenido de la tesis	5
Capítulo 1 Descripción del ingenio azucarero	6
1.1 La caña de azúcar	6
1.1.1 La industria azucarera en México	7
1.1.2 Proceso de producción de azúcar	9
1.2 Generalidades del ingenio azucarero	12
1.2.1 Antecedentes del ingenio azucarero	12
1.2.2 Misión	13
1.2.3 Visión	13
1.2.4 Valores y virtudes	14
1.2.5 Sustentabilidad	14
1.2.6 Ubicación geográfica	15
1.2.7 Organigrama general	17
1.2.8 Productos del ingenio azucarero	17
1.2.9 Distribución del ingenio azucarero	20
1.3 Área de molinos del ingenio azucarero	20
1.3.1 Importancia del área de molinos	22
1.3.2 Tándem de molinos	22
1.3.3 Molinos de caña de azúcar	24
1.3.4 Componentes principales del molino de caña de azúcar	25
1.3.4.1 Virgenes	25
1.3.4.2 Mazas	26
1.3.4.3 Cuchilla central	29
1.4 Conclusión	30

Capítulo 2 Marco teórico	32
2.1 Método de la ruta crítica (CPM)	32
2.1.1 Breve historia del CPM	32
2.1.2 Definición del CPM	33
2.1.3 Aplicaciones y beneficios del CPM	34
2.1.4 Fases del CPM	36
2.1.4.1 Planificación del proyecto	36
2.1.4.2 Programación del proyecto	38
2.1.5 Matriz de secuencias	38
2.1.6 Red de actividades	39
2.1.6.1 Definición de red	39
2.1.6.2 Elementos que conforman una red	40
2.1.6.3 Método de diagramación por precedencias (PDM)	41
2.1.6.4 Método de Diagramación de Flechas (ADM)	42
2.1.7 Costos en CPM	47
2.1.8 Limitaciones en la ejecución de un proyecto	48
2.1.8.1 Definición de limitación	48
2.1.8.2 Tipos de limitación	49
2.1.8.3 Pasos para limitar un proyecto	50
2.2 Técnica de Evaluación y Revisión de Proyectos (PERT)	50
2.2.1 Breve historia de PERT	51
2.2.2 Definición y características de PERT	51
2.2.3 Objetivos de PERT	52
2.2.4 Matriz de tiempos	53
2.2.4.1 Estimación por tres valores y la distribución de probabilidad	53
2.2.4.2 Cálculo del tiempo estandar, la desviación estándar y la varianza	54
2.2.5 Cálculo de la ruta crítica	55
2.2.5.1 Definición y cálculo de los tiempos más próximos y más lejanos	56
2.2.5.2 Holgura en los cálculos de la ruta crítica	58
2.2.6 Probabilidad de terminación de un proyecto	60
2.3 Estructura de descomposición del trabajo (WBS)	62
2.3.1 Definición de la WBS	62
2.3.2 Antecedentes de la WBS	62
2.3.3 Niveles y representación de la WBS	63
2.3.4 Consideraciones en la WBS	65
2.3.5 Beneficios de la WBS	66
2.4 Simulación de Monte Carlo	67
2.4.1 Definición de simulación de Monte Carlo	67
2.4.2 Antecedentes	68
2.4.3 Tipos de software para la simulación de Monte Carlo	68
2.5 Software para administración de proyectos Project	70
2.5.1 Herramientas de Project	71
2.5.2 Interfaz de Project	72

2.5.3 Terminología de Project _____	73
2.6 Prueba de hipótesis _____	75
2.6.1 Clasificación de la prueba de hipótesis _____	75
2.6.2 Elementos de una prueba de hipótesis _____	76
2.6.3 Errores en la prueba de hipótesis _____	78
2.6.4 Prueba de hipótesis para la comparación de medias con varianzas desconocidas pero iguales _____	79
2.7 Conclusión _____	81
Capítulo 3 Reducción del tiempo de las actividades de mantenimiento del tándem de molinos _____	82
3.1 Metodología para la reducción del tiempo de las actividades de mantenimiento del tándem de molinos _____	82
3.2 Seleccionar un proyecto _____	83
3.2.1 Solicitud de entrevista para realizar un proyecto _____	83
3.2.2 Presentación de situaciones del ingenio azucarero _____	84
3.2.3 Planteamiento de objetivos _____	84
3.2.4 Definición de posibles proyectos _____	85
3.2.4.1 Identificar los componentes que conforman un molino _____	86
3.2.4.2 Definir posibles herramientas y técnicas de ingeniería industrial a utilizar _____	86
3.2.4.3 Definir posibles tipos de software factibles a utilizar _____	87
3.2.4.4 Definir posibles proyectos _____	88
3.2.5 Presentación de argumentos a situaciones planteadas y posibles proyectos _____	88
3.2.6 Selección del proyecto _____	89
3.3 Determinar la situación actual de las actividades de mantenimiento del tándem de molinos _____	90
3.3.1 Comprender la importancia del área de molinos _____	91
3.3.2 Conocer el área de molinos _____	92
3.3.2.1 Conocer la ubicación del tándem de molinos. _____	92
3.3.2.2 Conocer al personal del área de molinos. _____	92
3.3.2.3 Familiarizarse con los componentes del tándem de molinos _____	94
3.3.3 Conocer el proceso actual del mantenimiento del tándem de molinos _____	94
3.3.3.1 Describir el proceso de mantenimiento del tándem de molinos _____	94
3.3.3.2 Definir las principales etapas del mantenimiento del tándem de molinos _____	96
3.3.4 Conocer documentos para el control del mantenimiento del tándem de molinos _____	99
3.3.4.1 Formatos de control para mantenimiento _____	99
3.3.4.2 Orden y avance de las actividades de mantenimiento _____	103
3.3.5 Conocer factores significativos en la realización de las actividades de mantenimiento _____	108
3.4 Establecer las técnicas de ingeniería industrial _____	109
3.5 Desarrollar la Estructura de Descomposición del Trabajo (WBS) _____	110
3.5.1 Identificar las fases y etapas del mantenimiento del tándem de molinos _____	111
3.5.2 Desarrollar la Estructura de Descomposición del Trabajo (WBS) _____	112

3.6 Determinar el tiempo de terminación de las actividades de mantenimiento, antes de la mejora propuesta	114
3.6.1 Definir consideraciones para la planificación del proyecto	115
3.6.2 Realizar una lista de paquetes de actividades de mantenimiento	116
3.6.3 Establecer precedencias y secuencias de los paquetes de actividades de mantenimiento con Project	119
3.6.3.1 Definir periodo laboral del proyecto	119
3.6.3.2 Introducir las actividades y paquetes de actividades de mantenimiento a la hoja de Project	122
3.6.3.3 Establecer precedencias y secuencias de los paquetes de actividades de mantenimiento	129
3.6.4 Crear la red de los paquetes de actividades de mantenimiento con Project	138
3.6.5 Obtener estimaciones de tiempos óptimos, medios y pésimos de los paquetes de actividades de mantenimiento	140
3.6.6 Determinar la ruta crítica del proyecto con Project	143
3.6.7 Realizar simulación de Monte Carlo	146
3.6.7.1 Crear un modelo de simulación	146
3.6.7.2 Preparar el modelo para correr la simulación de Monte Carlo	148
3.6.7.3 Ejecutar la simulación de Monte Carlo	151
3.6.7.4 Analizar los resultados de la simulación de Monte Carlo	155
3.7 Determinar el tiempo de terminación de las actividades de mantenimiento, después de la mejora propuesta	159
3.7.1 Definir consideraciones para la planificación del proyecto con la mejora propuesta	159
3.7.2 Establecer precedencias y secuencias de los paquetes de actividades de mantenimiento de la mejora propuesta en Project	160
3.7.3 Determinar la ruta crítica del proyecto, en Project, de la mejora propuesta	161
3.7.4 Realizar simulación de Monte Carlo de la mejora propuesta	162
3.7.4.1 Crear un modelo de simulación	162
3.7.4.2 Preparar el modelo para correr la simulación de Monte Carlo	163
3.7.4.3 Ejecutar la simulación de Monte Carlo	163
3.7.4.4 Analizar los resultados de la simulación de Monte Carlo	163
3.8 Comparar resultados de tiempos de terminación totales antes y después de la mejora, mediante el uso de una prueba estadística	168
3.9 Análisis de resultados	171
3.10 Conclusión	174
<i>Conclusiones y recomendaciones</i>	175
<i>Fuentes de información</i>	179
<i>Anexo 1 Distribución de probabilidad beta</i>	183
<i>Anexo 2 Formato para registrar estimaciones de los tiempos óptimos, medios y pésimos</i>	186
<i>Anexo 3 Formato para estimar tiempos óptimos, medios y pésimos de las actividades “Fabricación interna y/o externa” y “Mantenimiento”</i>	187
<i>Anexo 4 Pasos para desarrollar el modelo de simulación</i>	188
<i>Anexo 5 Descripciones de archivos</i>	197

Índice de Figuras

Figura 1. 1 Estados de México donde se produce caña de azúcar (Elaboración propia).	7
Figura 1. 2 Diagrama de flujo del proceso de producción de azúcar (Elaboración propia).	10
Figura 1. 3 Estados de México donde está presente el grupo azucarero (Elaboración propia).	16
Figura 1. 4 Ubicación de ingenios azucareros en la región del Papaloapan (Elaboración propia).	16
Figura 1. 5 Organigrama del ingenio azucarero (Elaboración propia).	18
Figura 1. 6 Azúcar de mesa Dulcinea (Ingenio azucarero, 2016).	19
Figura 1. 7 Distribución del ingenio azucarero en estudio (Elaboración propia).	21
Figura 1. 8 Tándem de molinos (Elaboración propia).	22
Figura 1. 9 Parte del tándem de molinos del ingenio azucarero en estudio.	23
Figura 1. 10 Molino de caña de azúcar con sus componentes (Ingenio azucarero, 2016).	24
Figura 1. 11 Virgen de molino y elementos que la conforman (Ingenio azucarero, 2016).	26
Figura 1. 12 Elementos complementarios de las mazas (Elaboración propia).	28
Figura 1. 13 Cuchilla central (Ingenio azucarero, 2016).	30
Figura 1. 14 Puente de cuchilla central (Ingenio azucarero, 2016).	31
Figura 1. 15 Soporte del puente de cuchilla central (Ingenio azucarero, 2016).	31
Figura 2. 1 Evento inicial i y evento final j (Montaño, 1990).	40
Figura 2. 2 Tipos de flechas (Montaño, 1990).	41
Figura 2. 3 Actividad ficticia (Montaño, 1990).	41
Figura 2. 4 Diagrama de red utilizando el PDM (Elaboración propia).	42
Figura 2. 5 Diagrama de red utilizando el ADM (Olalde, 2016).	44
Figura 2. 6 Actividades que unen dos nodos (Ahuja & Walsh, 1995).	45
Figura 2. 7 Uso de actividad ficticia (Ahuja & Walsh, 1995).	45
Figura 2. 8 Partir una actividad de una parte intermedia de otra actividad (Montaño, 1990).	46
Figura 2. 9 Derivación de actividades secundarias (Montaño, 1990).	46
Figura 2. 10 Eventos sueltos al terminar la red (Montaño, 1990).	46
Figura 2. 11 Relación de los nodos con el evento inicial o final (Montaño, 1990).	46
Figura 2. 12 Distribución de probabilidad beta (Antill & Woodhead, 1993).	54
Figura 2. 13 Notación de los tiempos más próximos y más lejanos (Krajewski, Ritzman, & Malhotra, 2008).	57
Figura 2. 14 Red de actividades con tiempos más próximos y más lejanos (Elaboración propia).	58
Figura 2. 15 Ruta crítica conformada por las actividades A, C y E (Elaboración propia).	60
Figura 2. 16 Ejemplo de WBS para la puesta en marcha de una empresa (Krajewski, Ritzman, & Malhotra, 2008).	64
Figura 2. 17 Elementos de la interfaz de Project (Chatfield & Johnson, 2013).	72
Figura 2. 18 Región de rechazo, nivel de significancia y valor crítico (Elaboración propia).	78
Figura 3. 1 Acciones para la selección de un área de oportunidad (Elaboración propia).	83
Figura 3. 2 Ubicación del tándem de molinos (Elaboración propia).	93
Figura 3. 3 Etapas de las actividades de mantenimiento (Elaboración propia).	97
Figura 3. 4 Actividades de mantenimiento del año 2011 (Elaboración propia).	106
Figura 3. 5 Actividades de mantenimiento del año 2013 (Elaboración propia).	107
Figura 3. 6 WBS gráfica, en forma de organigrama (Elaboración propia).	113
Figura 3. 7 Pestaña Herramientas resaltando la opción Cambiar calendario laboral (Elaboración propia).	120
Figura 3. 8 Ventana Cambiar calendario laboral con las opciones Crear calendario (paso 2), Semanas laborales y Detalles (paso 3) y Opciones (paso 4) (Elaboración propia).	121

<i>Figura 3. 9 Ventana Crear nuevo calendario base (Elaboración propia).</i>	121
<i>Figura 3. 10 Ventana Detalles con días y horario laboral (Elaboración propia).</i>	121
<i>Figura 3. 11 Ventana “Opciones y horario laboral del nuevo calendario base del proyecto (Elaboración propia).</i>	122
<i>Figura 3. 12 Opción Información del proyecto (Elaboración propia).</i>	123
<i>Figura 3. 13 Selección de la fecha de comienzo y calendario base del proyecto (Elaboración propia).</i>	123
<i>Figura 3. 14 Escala de tiempo del proyecto y el pop up emergente resaltando “Escala temporal” (Elaboración propia).</i>	123
<i>Figura 3. 15 Ventana “Escala temporal” (Elaboración propia).</i>	123
<i>Figura 3. 16 Campo Nombre de tarea y nivel 1 “Reducción del tiempo de las actividades de mantenimiento” de la estructura del proyecto (Elaboración propia).</i>	124
<i>Figura 3. 17 Actividades de planeación, receso, ejecución e inicio de zafra (Elaboración propia).</i>	124
<i>Figura 3. 18 Opción Aplicar sangría y actividades: planeación, receso, ejecución e inicio de zafra; del nivel 2 de la estructura (Elaboración propia).</i>	125
<i>Figura 3. 19 Opción Nueva tarea para ingresar filas entre las actividades de planeación, receso, ejecución e inicio de zafra (Elaboración propia).</i>	126
<i>Figura 3. 20 Filas creadas con la opción Nuevas tareas (Elaboración propia).</i>	126
<i>Figura 3. 21 Resultado final para las actividades del nivel 3 (Elaboración propia).</i>	126
<i>Figura 3. 22 Parte de las actividades del nivel 4 de la estructura del proyecto (Elaboración propia).</i>	127
<i>Figura 3. 23 Parte de las actividades del nivel 5 de la estructura del proyecto (Elaboración propia).</i>	128
<i>Figura 3. 24 Parte de las actividades del nivel 6 de la estructura del proyecto (Elaboración propia).</i>	129
<i>Figura 3. 25 Campo Nombre de tarea y el pop up emergente con la opción Insertar columna (Elaboración propia).</i>	130
<i>Figura 3. 26 Ventana Definición de columna y selección de columna “Predecesoras” (Elaboración propia).</i>	131
<i>Figura 3. 27 Columna “Predecesoras” y columna “Sucesoras” (Elaboración propia).</i>	132
<i>Figura 3. 28 Paquetes de actividades con sus precedencias (Elaboración propia).</i>	132
<i>Figura 3. 29 Pestaña Ventana resaltando la opción Dividir (Elaboración propia).</i>	134
<i>Figura 3. 30 Pantalla de Project dividida en una sección superior (vista “Diagrama de Gantt”) y una sección inferior (Elaboración propia).</i>	134
<i>Figura 3. 31 Pestaña Ver resaltando la opción Más vistas (Elaboración propia).</i>	134
<i>Figura 3. 32 Ventana Más vistas y selección de vista “Diagrama de relaciones” (Elaboración propia).</i>	135
<i>Figura 3. 33 Vista “Diagrama de Gantt” (sección superior de la pantalla) y vista “Diagrama de relaciones” (sección inferior de la pantalla) resaltando los paquetes de actividades predecesores y sucesores de un paquete de actividad seleccionado.</i>	136
<i>Figura 3. 34 Bloque con el número de identificación, nombre y tipo de dependencia de cada paquete de actividad (Elaboración propia).</i>	137
<i>Figura 3. 35 Algunas de las actividades de “Ejecución” con precedencia y secuencia (Elaboración propia).</i>	137
<i>Figura 3. 36 Parte de la red de los paquetes de actividades de mantenimiento en la vista “Diagrama de red” (Elaboración propia).</i>	139
<i>Figura 3. 37 Opción Hojas de entradas PERT, ubicada en la barra de herramientas (Elaboración propia).</i>	143
<i>Figura 3. 38 Columnas “Nombre de tarea”, “Duración”, “Dur. Optimista”, “Dur. Esperada” y “Dur. Pesimista”, activadas con la opción Hojas de entradas PERT (Elaboración propia).</i>	143
<i>Figura 3. 39 Algunos paquetes de actividades de mantenimiento con las estimaciones de sus tiempos óptimos, medios y pésimos (Elaboración propia).</i>	144
<i>Figura 3. 40 Opción Calcular PERT y tiempos de terminación de paquetes de actividades (Elaboración propia).</i>	144

<i>Figura 3. 41 Pestaña Proyecto resaltando la opción Filtro para y el pop up Tareas críticas (Elaboración propia).</i>	145
<i>Figura 3. 42 Algunos paquetes de actividades en la ruta crítica (color rojo) (Elaboración propia).</i>	146
<i>Figura 3. 43 Pantalla de @RISK con comando Define distribution, destacando la selección de la distribución de probabilidad PERT (Elaboración propia).</i>	149
<i>Figura 3. 44 Ventana Define Distribution donde se destaca la introducción de los tiempos óptimos, medios y pésimos como parámetros de la distribución de probabilidad PERT (Elaboración propia).</i>	150
<i>Figura 3. 45 Comando Add Output y ventana Add/Edit Output para introducir la función RiskOutput (Elaboración propia).</i>	151
<i>Figura 3. 46 Comando y ventana Simulation Settings para configurar el número de iteraciones y simulaciones y seleccionar, en la pestaña Sampling, el tipo de muestreo “Latino hipercúbico” (Elaboración propia).</i>	152
<i>Figura 3. 47 Ventana Simulation Settings para habilitar la prueba de convergencia y seleccionar el 1% de tolerancia de convergencia y un 95% de nivel de confianza (Elaboración propia).</i>	153
<i>Figura 3. 48 Gráfica de densidad de probabilidad de la variable de salida “Tiempos de terminación total (días)” (@RISK for Excel, 2009).</i>	156
<i>Figura 3. 49 Gráfica de tornado de coeficientes de correlación entre variables de entrada y variable de salida (@RISK for Excel, 2009).</i>	157
<i>Figura 3. 50 Variables de entrada más significativas en determinar el tiempo de terminación total actual del proyecto (Elaboración propia).</i>	158
<i>Figura 3. 51 Opción Calcular PERT y tiempos de terminación de paquetes de actividades (Elaboración propia).</i>	162
<i>Figura 3. 52 Gráfica de densidad de probabilidad de la variable de salida tiempo de terminación total de la mejora (@RISK for Excel, 2009).</i>	165
<i>Figura 3. 53 Gráfica de tornado de coeficientes de correlación entre variables de entrada y variable de salida de la mejora propuesta (@RISK for Excel, 2009).</i>	166
<i>Figura 3. 54 Variables de entrada más significativas en determinar el tiempo de terminación total de la mejora del proyecto (Elaboración propia).</i>	167
<i>Figura 3. 55 Región de rechazo (Elaboración propia).</i>	170
<i>Figura A2. 1 Formato de registro de las estimaciones de los tiempos óptimos, medios y pésimos (Elaboración propia).</i>	186
<i>Figura A3. 1 Formato para estimar tiempos óptimos, medios y pésimos de las actividades “Fabricación interna y/o externa” y “Mantenimiento” (Elaboración propia).</i>	187
<i>Figura A4. 1 Información principal del modelo de simulación en la hoja “MATRIZ PRINCIPAL” (Elaboración propia).</i>	188
<i>Figura A4. 2 Pestaña Programador y comando Visual Basic (Elaboración propia).</i>	189
<i>Figura A4. 3 Interfaz del Editor de Visual Basic (Elaboración propia).</i>	190
<i>Figura A4. 4 Parte de la macro escrita para automatizar la creación de las 543 columnas de la matriz, destacando el comando Ejecutar (Elaboración propia).</i>	190
<i>Figura A4. 5 Matriz de la red del proyecto y de precedencias (Elaboración propia).</i>	191
<i>Figura A4. 6 Macro escrita para automatizar la introducción de un “1” en las celdas de la matriz (Elaboración propia).</i>	192
<i>Figura A4. 7 Matriz con números 1 los cuales representan las precedencias de los paquetes de actividades (Elaboración propia).</i>	192
<i>Figura A4. 8 Botones de opción “Días” y “Horas” (Elaboración propia).</i>	193
<i>Figura A4. 9 Procedimiento “Private Sub OptionButton1_Click()”, llamando al módulo “Calculo_Dia (Elaboración propia)”.</i>	193

Figura A4. 10 Macro escrita para automatizar el cálculo de los tiempos óptimos, medios, pésimos y estándar en días (Elaboración propia). _____ 193

Figura A4. 11 Procedimiento “Private Sub OptionButton1Click()”, llamando al módulo “Calculo_Dia (Elaboración propia)”. _____ 194

Figura A4. 12 Macro escrita para automatizar el cálculo de los tiempos óptimos, medios, pésimos y estándar en horas (Elaboración propia). _____ 194

Índice de Tablas

<i>Tabla 1.1 Producción mundial del ciclo 2015/2016 (CONADESUCA, 2016a).</i>	8
<i>Tabla 2. 1 Tipos de dependencias del PDM (Project Management Institute, 2013)</i>	43
<i>Tabla 2. 2 Resumen de los tiempos más próximos y más lejanos (Elaboración propia).</i>	59
<i>Tabla 2. 3 Resumen del cálculo de holguras (Elaboración propia).</i>	60
<i>Tabla 2. 4 WBS para un proyecto de contabilidad (Onofre, 2000)</i>	65
<i>Tabla 2. 5 WBS por medio de una tabla (Smartsheet, 2017).</i>	65
<i>Tabla 2. 6 Estadísticos de prueba comunes en pruebas de hipótesis (Elaboración propia).</i>	77
<i>Tabla 2. 7 Situaciones posibles al realizar una prueba de hipótesis (Walpole et al, 2012)</i>	79
<i>Tabla 3. 1 Problemáticas y objetivos en el proyecto (Elaboración propia).</i>	85
<i>Tabla 3. 2 Argumentos para las problemáticas en el área de molinos (Elaboración propia).</i>	89
<i>Tabla 3. 3 Argumentos para los posibles proyectos a desarrollar (Elaboración propia).</i>	90
<i>Tabla 3. 4 Personal en el periodo de zafra y periodo de mantenimiento (Elaboración propia).</i>	93
<i>Tabla 3. 5 Formato de control para mantenimiento de maza cañera (Ingenio azucarero, 2016).</i>	100
<i>Tabla 3. 6 Formato de control para mantenimiento de silletas de molino (Ingenio azucarero, 2016).</i>	101
<i>Tabla 3. 7 Formato de control para mantenimiento de maza superior (Ingenio azucarero, 2016).</i>	101
<i>Tabla 3. 8 Formato de control para mantenimiento de bridas (Ingenio azucarero, 2016).</i>	102
<i>Tabla 3. 9 Formato de control para mantenimiento de cuarta maza (Ingenio azucarero, 2016).</i>	103
<i>Tabla 3. 10 Formato de control para mantenimiento de las vírgenes (Ingenio azucarero, 2016).</i>	104
<i>Tabla 3. 11 Parte de las actividades de mantenimiento del tándem (montaje) (Ingenio azucarero, 2016).</i>	105
<i>Tabla 3. 12 Factores significativos en las actividades de mantenimiento (Elaboración propia)</i>	109
<i>Tabla 3. 13 Lista de algunas actividades de mantenimiento (Elaboración propia).</i>	117
<i>Tabla 3. 14 Ejemplo de agrupación de actividades de mantenimiento en paquetes (Elaboración propia).</i>	118
<i>Tabla 3. 15 Ejemplo de paquetes de actividades de mantenimiento (Elaboración propia).</i>	119
<i>Tabla 3. 16 Niveles, actividades y paquetes de actividades de la estructura del proyecto (Elaboración propia).</i>	130
<i>Tabla 3. 17 Parte de los paquetes de actividades de mantenimiento con tiempos óptimos, medios y pésimos (Elaboración propia).</i>	141
<i>Tabla 3. 18 Promedios de los tiempos para componentes fabricados (Elaboración propia).</i>	142
<i>Tabla 3. 19 Promedios de los tiempos de componentes a dar mantenimiento (Elaboración propia).</i>	142
<i>Tabla 3. 20 Concentración de tiempos de terminación optimistas, medios, pesimistas y estándar de los paquetes de actividades de mantenimiento, con Project (Elaboración propia).</i>	145
<i>Tabla 3. 21 Resultados de las 10 corridas piloto independientes, la media y la varianza (Elaboración propia).</i>	154
<i>Tabla 3. 22 Cálculo del número de corridas óptimas (Elaboración propia).</i>	155
<i>Tabla 3. 23 Probabilidades de terminación del proyecto (Elaboración propia).</i>	157
<i>Tabla 3. 24 Resultados de los tiempos de terminación optimistas, medios, pesimistas y estándar de los paquetes de actividades de mantenimiento, con Project (Elaboración propia).</i>	161
<i>Tabla 3. 25 Resultados de las 10 corridas óptimas independientes, la media y la varianza, de la mejora propuesta (Elaboración propia).</i>	164
<i>Tabla 3. 26 Probabilidades de terminación del proyecto de la mejora propuesta (Elaboración propia).</i>	165
<i>Tabla 3. 27 Comparación de resultados antes de la mejora vs después de la mejora propuesta (Elaboración propia).</i>	168

Introducción

La industria azucarera tiene grandes retos en materia de productividad y competitividad (Aguilera *et al*, 2010). En los últimos 30 años, países como Estados Unidos, Brasil, Guatemala y Colombia han modernizado sus procesos de elaboración de azúcar, implementando tecnologías para diversificar sus productos. González *et al* (2009), mencionan que las industrias desarrollan estrategias para la creación de proyectos como respuesta a los acelerados avances tecnológicos, la globalización de los mercados y la alta competitividad. En este contexto, una buena gestión de proyectos pueden ser una ventaja competitiva importante para las industrias (Pampliega, 2014).

Por su parte, la industria azucarera mexicana ha tenido retrasos con respecto a la modernización tecnológica de sus procesos en comparación con países mejor desarrollados. Sin embargo, en la última década, algunos grupos empresariales que poseen ingenios azucareros han realizado proyectos tecnológicos de clase mundial y puesto en marcha prácticas innovadoras para mejorar la administración y control de sus procesos.

Un grupo azucarero -formado por cuatro ingenios azucareros en México: dos en Veracruz, uno en Chipas y otro en Michoacán- desea ser parte de esos grupos empresariales, sobre todo en la mejora de la administración y control del mantenimiento del tándem de molinos de sus cuatro ingenios. Esta situación da la oportunidad de realizar un proyecto de tesis de maestría, en particular en un ingenio azucarero [REDACTED] del estado de Veracruz, ubicado [REDACTED]; debido a su interés manifestado al Instituto Tecnológico de Orizaba y a la disponibilidad de información.

Cada año el ingenio azucarero antes y después del periodo de zafra debe dar mantenimiento al tándem de molinos, cuya función es extraer el jugo de caña. La problemática principal que tiene el ingenio azucarero es que el tiempo de mantenimiento del tándem de molinos es muy elevado, el cual se ejecuta actualmente en 5 meses. Algunas de las situaciones que ocasionan esta problemática son las siguientes:

- La parte operativa sólo planea el mantenimiento del tándem de molinos sin tener en cuenta las actividades y los tiempos del área administrativa.
- El ingenio azucarero, administrativamente, no cuenta con un despiece completo de los componentes en su activo fijo para llevar a cabo un buen control.
- Deficiente planeación que involucra múltiples actividades secuenciadas y dependientes del mantenimiento del tándem de molinos.
- Falta de utilización de herramientas que permitan controlar las actividades y los componentes para mejorar la programación de las actividades de mantenimiento a realizar en el menor tiempo posible.

Con base en lo anterior, se decidió desarrollar un proyecto de tesis con el objetivo de reducir los tiempos de las actividades de mantenimiento del tándem de molinos del ingenio azucarero. Para ello, se utilizará la Estructura de Descomposición del Trabajo (*WBS*) para representar las relaciones entre las actividades de mantenimiento y el proyecto, la ruta crítica (*CPM*), para planificar el proyecto, la Técnica de Evaluación y Revisión de Proyectos (*PERT*), para estimar los tiempos de las actividades de mantenimiento y la simulación de Monte Carlo para introducir incertidumbre a las actividades de mantenimiento, mediante distribuciones de probabilidad.

Objetivo general

El objetivo general del presente trabajo es el siguiente:

Reducir el tiempo de las actividades de mantenimiento del tándem de molinos de un ingenio azucarero, mediante la aplicación de técnicas y herramientas de ingeniería industrial.

Objetivos particulares

Los objetivos particulares para el presente trabajo son los siguientes:

- Conocer los elementos que integran el tándem de molinos.
- Definir las actividades principales del mantenimiento del tándem de molinos.

- Determinar las causas principales que provocan tiempos elevados en el mantenimiento del tándem de molinos.
- Asignar los componentes que integran el tándem de molinos a las actividades de mantenimiento.
- Realizar un programa de actividades para ejecutar las actividades de mantenimiento del tándem de molinos.
- Definir el área de oportunidad para la mejora del tándem de molinos.
- Identificar problemática en el área de oportunidad.
- Identificar técnicas y herramientas de ingeniería industrial adecuadas para mejorar el área de oportunidad.
- Obtener una validación de resultados de la implementación de las mejoras propuestas.

Justificación

El ingenio azucarero -que es uno de los cuatro ingenios azucareros que forman parte de un grupo azucarero- presenta una problemática con el tiempo de mantenimiento del tándem de molinos, el cual se ejecuta actualmente en 5 meses. Para la gerencia, el tiempo de mantenimiento del tándem de molinos es muy elevado lo que ocasiona un aumento en los costos del área donde se ejecuta el mantenimiento.

Con base en este escenario, el ingenio azucarero tiene el interés de reducir el tiempo de mantenimiento del tándem de molinos mejorando su administración y control, permitiendo identificar un área de oportunidad para el presente trabajo.

La presente investigación se ve justificada por lo siguiente:

- Por el interés del ingenio azucarero de ordenar las actividades relacionadas con el mantenimiento del tándem de molinos, reducir el tiempo requerido para el mantenimiento del tándem de molinos y contar con un programa de actividades básicas para ejecutar actividades de mantenimiento.

- Por la necesidad del ingenio azucarero en mejorar la administración y control en el mantenimiento de su tándem de molinos.
- Porque de acuerdo con la búsqueda de campo realizada, sobre actividades de arme y desarme de tándem de molinos, no se encontró documentación de que en México se haya desarrollado este tipo de trabajo en grupos empresariales que poseen ingenios azucareros. Lo que se encontró fue información de que en países como Estados Unidos, Brasil, Guatemala y Colombia han modernizado sus procesos de elaboración de azúcar de caña, implementando tecnologías para diversificar sus productos.
- Porque se espera que el presente trabajo sirva como herramienta para otros proyectos en la industria azucarera, ya que a partir de los resultados y la metodología utilizada en la solución de la problemática del ingenio azucarero, propuesta en este trabajo, dé pauta para futuros trabajos destinados a la administración y control de los procesos, específicamente en el mantenimiento de tándems de molinos.
- Porque se desea mantener vigente al ingenio azucarero en el mercado competitivo al implementar mejores prácticas en sus procesos.

Finalmente, el desarrollo del trabajo permitirá al tesista emplear conocimientos adquiridos durante su desarrollo académico en el Instituto Tecnológico de Orizaba, combinando los aspectos tecnológicos con los administrativos.

Hipótesis

Se espera que la mejora propuesta para la reducción del tiempo de las actividades de mantenimiento del tándem de molinos del ingenio azucarero tenga resultados favorables, manteniendo el siguiente supuesto:

- El tiempo de mantenimiento del tándem de molinos del sistema propuesto es menor al tiempo de mantenimiento del tándem de molinos del sistema actual.

Contenido de la tesis

El contenido del presente trabajo de tesis se encuentra dividido en tres capítulos, los cuales se describen de manera general para dar una breve introducción al lector acerca de su contenido.

El Capítulo uno describe de manera breve el ingenio azucarero donde se realizó el presente trabajo, mostrando una descripción de la caña de azúcar, de las generalidades del ingenio azucarero y del área específica donde se realizó el presente trabajo: el área de molinos del ingenio.

El Capítulo dos muestra las generalidades de las herramientas de ingeniería industrial a utilizar en el presente trabajo, para proporcionar un marco teórico que sirva de referencia en la implementación de cada una de ellas.

El Capítulo tres presenta la aplicación de la metodología utilizada en el desarrollo del presente trabajo, desde la selección del proyecto hasta la comparación de resultados mediante una prueba estadística.

El presente trabajo termina con la conclusión, las fuentes de información utilizadas y los anexos.

Capítulo 1

Descripción del ingenio azucarero

En el presente capítulo se muestra la descripción del ingenio azucarero donde se realiza el presente trabajo. Se inicia con una descripción general de la caña de azúcar, la industria azucarera en México y el proceso de producción de azúcar; posteriormente se realiza una descripción de las generalidades del ingenio: antecedentes del ingenio azucarero, misión, visión, valores y virtudes, sustentabilidad, ubicación geográfica, organigrama general, productos del ingenio y su distribución. Por último, se describe el área específica donde se llevó a cabo la realización del presente trabajo: el área de molinos. Del área de molinos se describe su importancia para el ingenio y se describen los principales componentes de un molino.

1.1 La caña de azúcar

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum*, por su especie) es una especie de planta con un tallo de hasta cinco metros de altura y seis centímetros de diámetro. En su tallo se acumula un jugo rico en sacarosa que se extrae y se cristaliza en la industria para formar el azúcar. La caña sintetiza la sacarosa en la fotosíntesis; además es indispensable que cuente con una adecuada cantidad de agua que permita la absorción, transporte y asimilación de los nutrientes (SIAP, 2014).

Desde la antigüedad la caña de azúcar fue muy importante en la vida de las civilizaciones al tener diversos usos: medicinales, comestibles, artículo de lujo, etc. Se considera que el origen de la caña de azúcar comprende países como India, China y Nueva Guinea por encontrarse ahí el mayor número de especies. En el continente americano la caña de azúcar fue introducida por Cristóbal Colón en República Dominicana y Haití, posteriormente la caña de azúcar se expandió a países como México, Colombia, Cuba, Brasil, entre otros.

Hoy en día la producción de la caña de azúcar es de gran importancia a nivel mundial por la contribución al desarrollo industrial y agrícola en diversas regiones del mundo y por la capacidad de generar gran cantidad de empleo.

1.1.1 La industria azucarera en México

En México, la industria azucarera es una de las actividades de mayor importancia en el desarrollo económico y social en diversas regiones del país. La caña de azúcar se produce en 15 estados del país (Figura 1.1): Campeche, Chiapas, Colima, Guerrero, Jalisco, Michoacán, Morelos, Nayarit, Oaxaca, Puebla, Quintana Roo, San Luis Potosí, Tabasco, Tamaulipas y Veracruz; debido a su clima y suelo idóneos para su cultivo (CONADESUCA, 2016b).

La industria azucarera en México, a través del tiempo, ha sufrido lentamente una profunda crisis económica y atraso tecnológico, en dos sectores (García y Escalante, 1997):

1. En el sector cañero destacan los siguientes problemas:
 1. Baja calidad de la materia prima.
 2. Altos costos de producción.
 3. Altos costos de transporte desde los campos de cultivos hasta los ingenios.
2. En el sector productivo se presentan los siguientes problemas:
 1. Maquinaria y equipo obsoleto.



Figura 1. 1 Estados de México donde se produce caña de azúcar (Elaboración propia).

2. Falta de capacitación del personal.
3. Deficiencias en la administración de los recursos humanos y materiales.
4. Dificultades en la ejecución del mantenimiento de la fábrica.

Por los problemas detectados en los sectores cañero y productivo, la industria azucarera mexicana requiere cambios en los procesos productivos y administrativos en los ingenios azucareros. García y Escalante mencionan que la industria azucarera mexicana requiere un modelo de protección mientras el grado de eficiencia de los ingenios y del campo no corresponda a las exigencias de la competencia, además de emprender acciones de política económica en infraestructura de servicio a la producción y comercialización, así como en materia de precios y desarrollo tecnológico.

A pesar de todos los problemas existentes, actualmente México es el sexto mayor productor de azúcar a nivel mundial con 6.18 millones de toneladas, en comparación con países como Brasil, India y Tailandia que ocupan el primer, segundo y tercer lugar con 36, 25.5 y 9.70 millones de toneladas, respectivamente (CONADESUCA, 2016a). Los datos anteriores se muestran en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Producción mundial del ciclo 2015/2016 (CONADESUCA, 2016a).

Posición	País	Producción mundial (millones de toneladas)	Participación (%)
1	Brasil	36.00	22.0
2	India	25.50	15.6
3	Tailandia	9.70	5.9
4	China	8.90	5.4
5	EUA	7.50	4.6
6	México	6.18	3.8
7	Pakistán	5.33	3.2
8	Rusia	5.20	3.2
9	Australia	4.80	2.9
10	Francia	4.00	2.4
	Los demás	50.71	31.0
	TOTAL MUNDIAL	163.91	100.0

1.1.2 Proceso de producción de azúcar

El proceso de producción de azúcar (Figura 1.2) es muy extenso e implica la aplicación de varios elementos para convertir el jugo de caña en azúcar; generalmente, el proceso de producción es el mismo para todo ingenio azucarero, pero con ciertas particularidades para cada uno. El proceso de producción de caña es el siguiente (Guerrero, 2014):

1. **Transporte y recepción de caña.** El transporte de la caña de azúcar es a granel mediante camiones y tractores; llegando al ingenio la caña se pesa en básculas y se conduce al patio de batey donde se prepara la caña para la molienda. En el batey se decide si la caña se almacena temporalmente o se ingresa a las mesas transportadoras. De las mesas transportadoras, la caña se dirige por una banda conductora a las desfibradoras³ para mejorar la alimentación de caña a los molinos, asegurando un aumento de la capacidad de los molinos y reduciendo la pérdida de sacarosa en el bagazo⁴.
2. **Molienda.** La caña proveniente de las desfibradoras llega a un tándem de molino⁵ que se encarga de extraer el jugo de caña. En esta etapa se obtiene un jugo mezclado, el cual es turbio y ácido. En el recorrido de la caña por el tándem de molinos se le agrega agua caliente para extraer al máximo la cantidad de sacarosa que contiene (maceración). Del último molino del tándem sale bagazo que se seca y pasa a las calderas como combustible, produciendo el vapor de alta presión que se emplea para mover las turbinas de los molinos.
3. **Clarificación y filtración.** En estos procesos se busca obtener un jugo brillante y clarificado, empleando cal y calor como agentes clarificantes. La cal se adiciona en forma de lechada al jugo de caña para neutralizar su acidez (formando sales insolubles de calcio). La elevación de la temperatura de la cal, que se logra con un sistema de calentadores, se realiza para acelerar su poder coagulante. El uso de la cal y el calor produce sólidos en forma de lodo que posteriormente se separan del jugo claro por sedimentación y filtración.

³ Máquina que desgarrar los pedazos de caña de azúcar provenientes de las cuchillas picadoras, convirtiéndolas en tiras; sin extraer el jugo de caña.

⁴ Residuo fibroso que se obtiene después de triturar y comprimir la caña de azúcar.

⁵ Se le denomina así al conjunto de seis molinos.

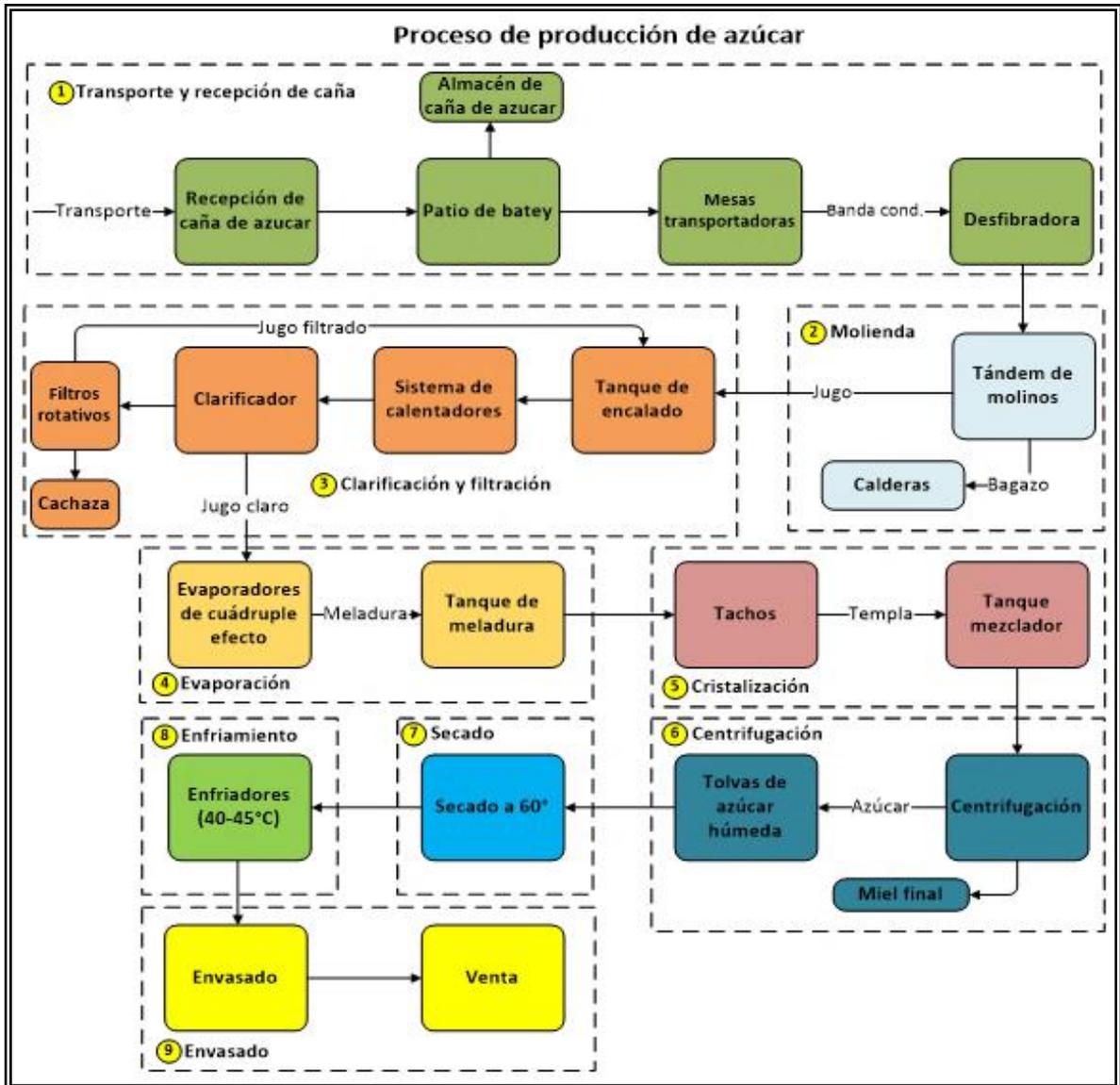


Figura 1. 2 Diagrama de flujo del proceso de producción de azúcar (Elaboración propia).

El jugo filtrado regresa al proceso de clarificación y el residuo sólido de la filtración, conocido como cachaza, se lleva al campo cañero donde se utiliza como fertilizante después de un tratamiento de compostaje.

4. **Evaporación.** El jugo claro proveniente de los procesos de clarificación y filtración se evapora mediante evaporadores de cuádruple efecto. En el proceso de evaporación el jugo claro entra a un pre evaporador donde se calienta hasta el punto de ebullición generando vapores que sirven para calentar el jugo en el siguiente evaporador; logrando

- un menor punto de ebullición en cada evaporador. Del último evaporador sale un jugo concentrado llamado meladura, con 65% de sólidos y 35% de agua, aproximadamente.
5. **Cristalización.** La meladura pasa a la operación de cristalización, la cual se lleva a cabo en evaporadores al vacío de simple efecto, conocidos como tachos, donde la meladura se evapora hasta su punto de saturación para depositar la sacarosa sobre los cristales de azúcar. El material resultante contiene líquido (miel) y cristales (azúcar) llamada masa cocida o templa. Posteriormente pasa a un tanque mezclador o cristizador que se encarga de disminuir la temperatura de la masa cocida. En la cristalización se usan tres cocimientos para lograr la mayor concentración de sacarosa.
 6. **Centrifugación.** La masa cocida proveniente del tanque mezclador pasa una centrífuga de alta velocidad que permite fácilmente la salida de la miel. En el proceso de centrifugación se lava y semi seca el azúcar por fuerza centrífuga. El azúcar (aún húmeda) se descarga a un gusano de azúcar que la lleva por medio de una banda transportadora a las tolvas de azúcar húmeda. La miel desprendida de la centrifugación se envía a los tachos para continuar con la cristalización. La miel que sale de la última centrifugación se llama miel final y es un subproducto importante en la elaboración de azúcar y otros productos como el alcohol etílico.
 7. **Secado.** La azúcar húmeda que se ubica en las tolvas de azúcar húmeda se transporta por elevadores y bandas para alimentar unas secadoras en las cuales el azúcar se pone en contacto con el aire caliente que entra a contracorriente. El azúcar se seca con una temperatura cercana a 60°C.
 8. **Enfriamiento.** El azúcar pasa por unos enfriadores rotatorios inclinados que llevan el aire frío a contracorriente, en donde se disminuye su temperatura aproximadamente a 40-45°C para conducir al envase.
 9. **Envasado.** El azúcar llega a una zaranda ubicada en la parte superior de una tolva para evitar el paso del azúcar de grano grueso a la misma. En la parte inferior de la tolva se pesa el azúcar, con una báscula automática, y se envasa en sacos con un contenido de 50 kg. -en ocasiones se empaca en sacos de diferentes pesos y presentaciones dependiendo del mercado-. Los sacos de azúcar se llevan a la bodega de producto terminado para su posterior venta.

1.2 Generalidades del ingenio azucarero

En esta sección se muestran aspectos generales del ingenio azucarero, donde se realiza el presente trabajo, con el objetivo de conocer puntos importantes del mismo los cuales se describen a detalle en las siguientes secciones.

1.2.1 Antecedentes del ingenio azucarero

El ingenio azucarero, en estudio, inicia sus operaciones en el año de 1820 con molinos que funcionaban con la fuerza motriz de los animales. Fue hasta el año de 1893 que su existencia quedó registrada como propiedad del señor Federico Miller, cuya producción en su momento era aguardiente y pinoles de azúcar. Para conocer de forma cronológica los antecedentes del ingenio azucarero a continuación se enlistan los eventos más importantes que han influido en la formación de uno de los ingenios más importantes a nivel nacional (Ingenio azucarero, 2016):

- **1820.** Fundación del ingenio.
- **1893.** Registro del ingenio como propiedad del señor [REDACTED]
- **1898.** El ingenio es adquirido por el señor [REDACTED]. Se realizaron importantes inversiones, instalando cinco molinos y equipos de destilación.
- **1913.** El ingenio es adquirido por el Banco [REDACTED] Veracruz que pertenecía a los señores [REDACTED] y [REDACTED]
- **1928.** El ingenio azucarero se considera incosteable. Se detiene la molienda y es expropiado.
- **1936.** Se reanuda la molienda con crédito del Banco Nacional [REDACTED]
- **1940.** Se incrementa la capacidad de molienda con apoyo de un crédito otorgado por el Banco Nacional [REDACTED].
- **1944.** Se forma el Sindicato de Obreros con 29 socios.
- **1956 a 1966.** Se amplía y moderniza el ingenio alcanzando la capacidad de molienda a 10,000 toneladas por día de zafra.
- **1966 a 1971.** El ingenio es administrado por Financiera Nacional Azucarera (FINASA).

- **1971 a 1991.** El ingenio pasa a ser administrado por la Operadora Nacional de Ingenios (ONISA) dependiente de la Comisión Nacional de la Industria Azucarera (CNIA, luego AZUCAR S.A.).
- **1991.** El ingenio es puesto a la venta y adquirido por Empresas Grupo [REDACTED], propiedad del Ing. [REDACTED].
- **1996.** El ingenio es puesto a la venta nuevamente y el Grupo [REDACTED] (GAM) lo adquiere.
- **2001.** El ingenio es expropiado por el Gobierno Federal.
- **2009.** El ingenio es adquirido por el grupo⁶ azucarero que actualmente lo administra.

1.2.2 Misión

El ingenio azucarero, como cualquier otra empresa, trabaja incansablemente por satisfacer a sus clientes cumpliendo con lo expresado en su misión (Ingenio azucarero, 2016):

“Ser una agroindustria de caña de azúcar y sus derivados, rentable y socialmente responsable; a través del compromiso e integración de su capital humano, la innovación y eficiencia de sus procesos dando cumplimiento al marco legal y requisitos de sus clientes”

1.2.3 Visión

El ingenio azucarero cuenta con una visión a futuro buscando la mejora continua, razón por la cual enfoca sus esfuerzos al cumplimiento de lo siguiente (Ingenio azucarero, 2016):

“Ser el mejor grupo agropecuario de México proporcionando:

- 1. El mejor producto en calidad y servicio para nuestros clientes.*
- 2. El mejor crecimiento y desarrollo para nuestro personal.*
- 3. El mejor trato para nuestros proveedores.*
- 4. El mejor crecimiento y rentabilidad para nuestros accionistas.*

Los cuatro puntos anteriores se lograrán siendo un grupo socialmente responsable”.

⁶ Por motivos de privacidad no se hace mención del grupo azucarero, que es dueño del ingenio azucarero, donde se realizó el presente trabajo.

1.2.4 Valores y virtudes

El ingenio azucarero fomenta valores y virtudes que reflejan la esencia e identidad de este. Los valores que fomentan son los siguientes (Ingenio azucarero, 2016):

- *“Confiabilidad. Se fomenta en los trabajadores para generar un ambiente de confianza en la empresa y de esta forma hacerla más competitiva.*
- *Trabajo en equipo. Con el aporte de todos los trabajadores se busca el logro de las metas que persigue la empresa.*
- *Desarrollo integral de la persona. Ayuda a los trabajadores a desarrollar sus potenciales físicos, emocionales, sociales, etc.”.*

Las virtudes que guían a los individuos que trabajan en el ingenio azucarero hacia el desarrollo personal y profesional son las siguientes (Ingenio azucarero, 2016):

- *“Honestidad. Los trabajadores deben realizar todas las operaciones con transparencia y rectitud.*
- *Integridad. Los trabajadores deben tener un comportamiento de rectitud y justicia.*
- *Espíritu de servicio. Mejora la calidad y ofrece un crecimiento en el ambiente de trabajo de las personas.*
- *Austeridad. El trabajador debe ser firme en las decisiones que tome”.*

1.2.5 Sustentabilidad

Para el ingenio azucarero, sustentabilidad significa tener un balance con tres componentes principales: sociedad, ambiente y economía. El ingenio azucarero busca tener un balance entre estos tres componentes, a través de las siguientes acciones (Ingenio azucarero, 2016):

- Ser equitativo para definir su aportación a la sociedad.
- Desarrollar una integración balanceada de la comunidad con el ambiente.
- Desarrollar un balance entre los componentes que no represente daño o impacto adverso de uno sobre el otro.



Figura 1. 3 Estados de México donde está presente el grupo azucarero (Elaboración propia).

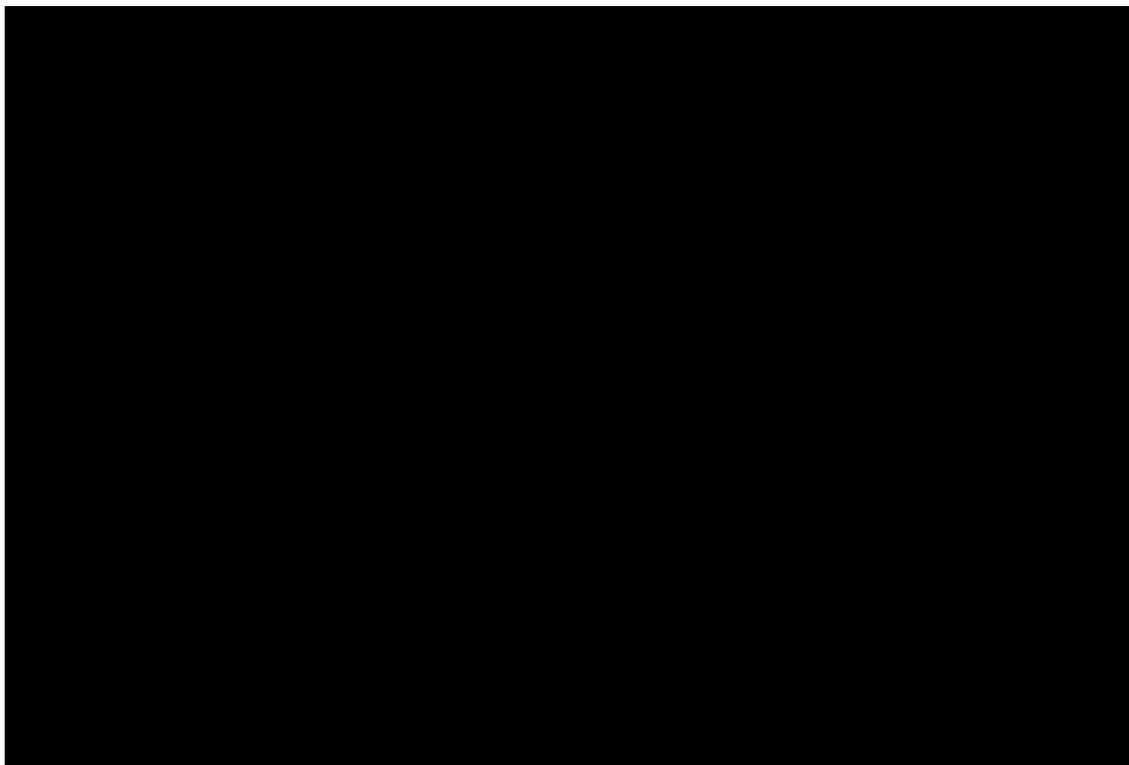


Figura 1. 4 Ubicación de ingenios azucareros en la región (Elaboración propia).

1.2.7 Organigrama general

El ingenio azucarero cuenta con diferentes áreas distribuidas de acuerdo con los recursos requeridos por el proceso. En cada una de ellas existe una comunicación interna y un flujo de trabajo entre el personal, de esta forma se agilizan los procesos en el ingenio azucarero. Para establecer un enlace entre las diferentes áreas del ingenio y el personal existe una estructura que permite visualizar líneas de autoridad, responsabilidades y comunicación en la organización: un organigrama. El organigrama establecido en el ingenio azucarero se muestra en la Figura 1.5 el cual se compone de los siguientes siete puestos principales:

1. Gerente general.
2. Superintendente general de fábrica.
3. Superintendente de elaboración.
4. Superintendente de mantenimiento preventivo y predictivo.
5. Superintendente de maquinaria.
6. Superintendente de calderas.
7. Superintendente eléctrico.

Cabe mencionar que el presente trabajo se realizará en coordinación con el superintendente de maquinaria debido a que es responsable del mantenimiento del tándem de molinos (área donde se centra el presente trabajo).

1.2.8 Productos del ingenio azucarero

El ingenio azucarero es una agroindustria que se dedica a la producción de azúcar y sus derivados. Entre los productos que posee el ingenio se muestran los siguientes:

- **Azúcar de mesa.** La azúcar de mesa  (Figura 1.6) ha estado presente en la cocina tradicional desde hace más de dos siglos. Su producción se obtiene de la caña de azúcar cosechada en tierras mexicanas, garantizando su origen 100% natural. Se elabora cumpliendo con las normas oficiales de la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial y su calidad es de exportación. No contiene ningún tipo de aditivos, conservadores o sustancias químicas.

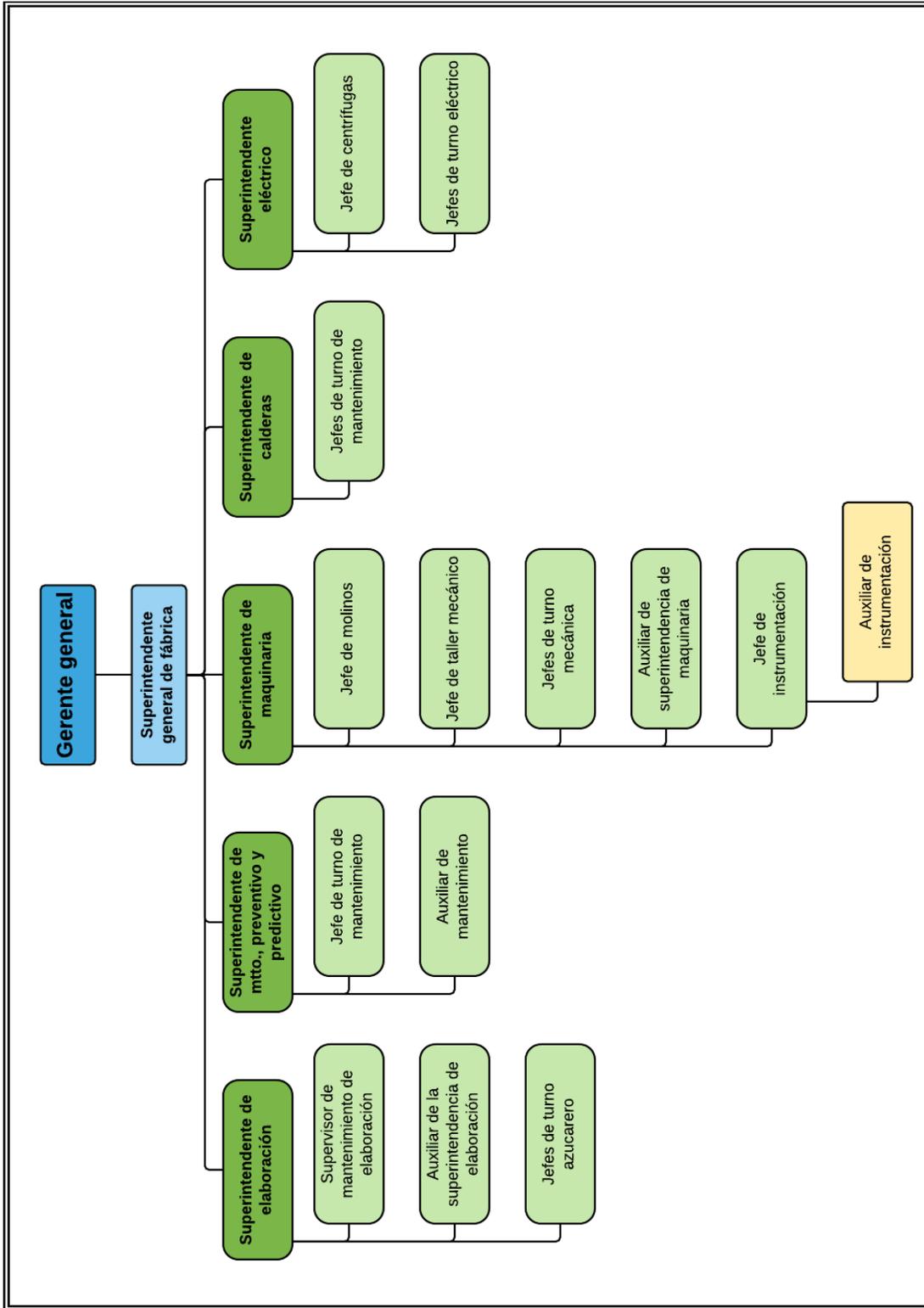


Figura 1. 5 Organigrama del ingenio azucarero (Elaboración propia).



Figura 1. 6 Azúcar de mesa [redacted]
(Ingenio azucarero, 2016).

- **Biomasa.** La biomasa describe a toda materia orgánica (materia viva) procedente del reino animal y vegetal obtenida de manera natural o procedente de las transformaciones artificiales. Toda esta materia se convierte en energía si le aplican procesamientos químicos.
- **Azúcar industrial.** El azúcar industrial tiene dos tipos de presentaciones: sacos de 50 kg. y maxi sacos de 1 tonelada. Este tipo de azúcar está destinada a las industrias de refresco, tequila, chocolates, jarabes y helados.
- **Energía eléctrica.** Una manera de aprovechar todo el bagazo resultante del proceso de molienda de la caña del ingenio azucarero es generando su propia energía eléctrica a partir de éste, a fin de fomentar la aplicación de tecnologías basadas en el uso de recursos renovables (biomasa) en lugar de recursos no renovables (combustibles fósiles) para la generación de energía eléctrica. De esta forma, se contribuye en la reducción de emisión global de gases de efecto invernadero y se estimula la inversión en proyectos eléctricos permitiendo consumir el excedente de bagazo.
- **Miel final.** Es un subproducto importante en la elaboración de azúcar. La miel cuanto más oscura sea, más sabor y nutrientes tendrá. La miel se utiliza como endulzante de té, infusiones o jugos.

1.2.9 Distribución del ingenio azucarero

La superficie total construida del ingenio azucarero es de 30,237 m² sobre un terreno de 385,815 m². Dentro de la superficie total construida se encuentra el área de elaboración del ingenio azucarero, la cual se integra por cinco áreas principales para la producción de azúcar (Figura 1.7):

1. **Patio de Batey.** En esta área se pesa y deposita la materia prima (caña de azúcar), proveniente del campo cañero en donde, a través de un sistema de grúas, se descarga a las mesas de alimentación que la conducen al tándem de molinos.

El patio de batey se ubica al este y sureste del área de fábrica.

2. **Fábrica.** En esta área se ejecutan algunos de los procesos para la producción de azúcar. Entre ellos se encuentran los procesos de molienda, clarificación y filtración, evaporación, cristalización y centrifugación. El área de fábrica se ubica al oeste del patio de batey.

En el área de fábrica resalta una de las áreas de mayor importancia en el proceso de producción: el área de molinos. Esta área es en donde se desarrolló el presente trabajo.

3. **Calderas.** Esta área se encarga de suministrar el vapor de agua, en diferentes presiones, necesario para mover las turbinas de los molinos; se utiliza el bagazo proveniente del área de molinos como combustible.

El área de calderas se ubica al noroeste del área de fábrica.

4. **Bodega de azúcar.** En esta área se ejecutan otros procesos para la producción de azúcar, los cuales no se realizan en el área de fábrica. Entre ellos se encuentran los procesos de secado, enfriamiento y envasado.

La bodega de azúcar se ubica al suroeste del área de fábrica.

5. **Fábrica de alcohol.** Para la producción de alcohol se utiliza la miel final, producto que se genera en el proceso de centrifugación (Sección 1.1.2). Los procesos para la producción de alcohol son tres: fermentación, destilación y deshidratación.

1.3 Área de molinos del ingenio azucarero

En esta sección se menciona la información referente al área de molinos del ingenio azucarero, área donde se desarrolló el presente trabajo.

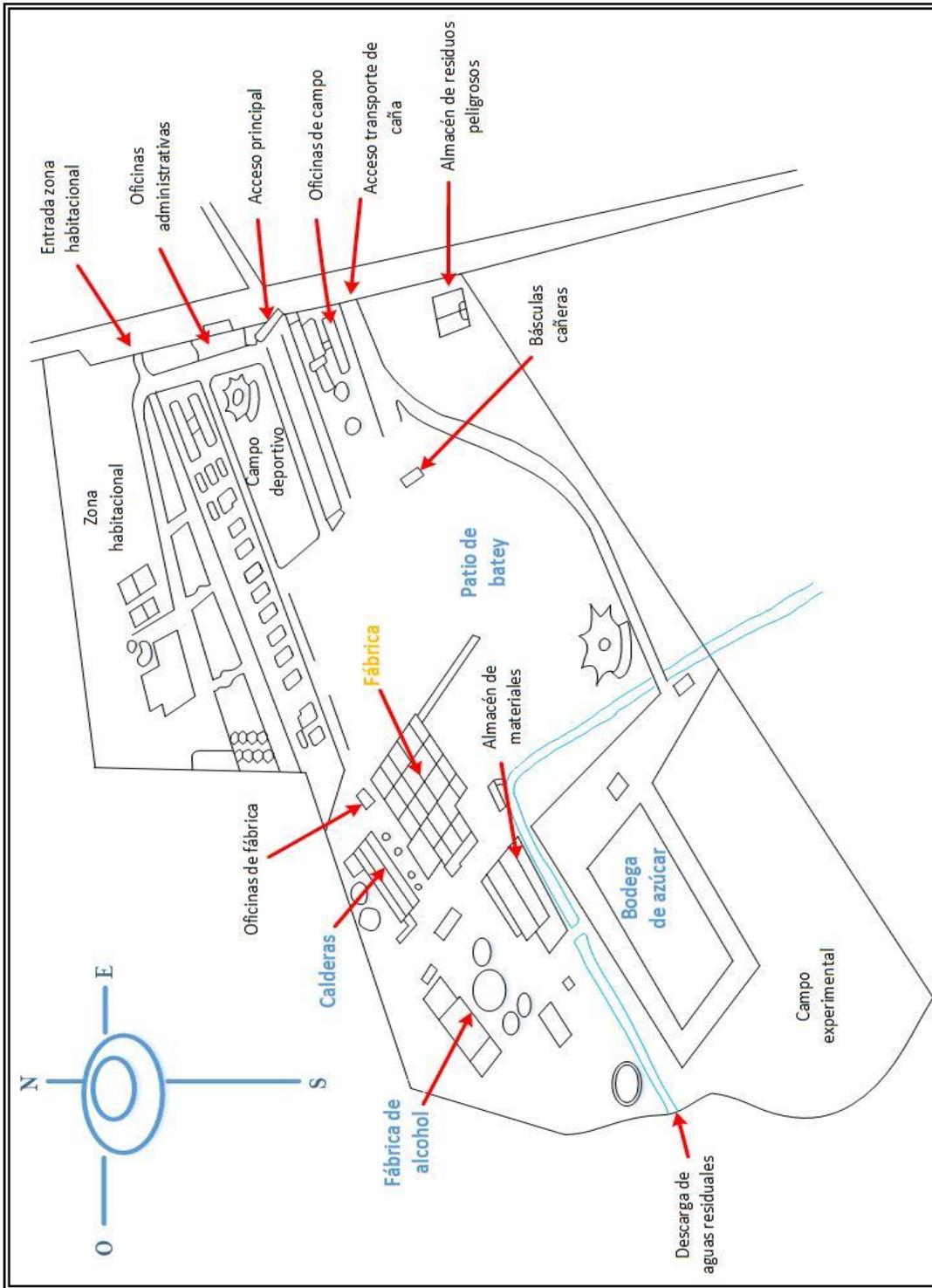


Figura 1. 7 Distribución del ingenio azucarero en estudio (Elaboración propia).

1.3.1 Importancia del área de molinos

Como se mencionó en la Sección 1.2.9, una de las áreas de mayor importancia en el proceso de producción de azúcar es el área de molinos por los siguientes cuatro motivos:

1. Es responsable de gran parte de la estabilidad del ingenio.
2. Es responsable de un correcto inicio del proceso de producción de azúcar.
3. Aporta el combustible para la generación de vapor en las calderas (bagazo).
4. Es donde se define, en gran parte, el trabajo posterior del ingenio.

Para cumplir con los cuatro puntos anteriores, el ingenio cuenta con personal y diversos equipos capacitados para proporcionar un máximo rendimiento durante el proceso de molienda. El personal y los equipos son piezas fundamentales para el correcto funcionamiento del área de molinos.

1.3.2 Tándem de molinos

Un tándem es la configuración de un conjunto de molinos destinados a extraer la mayor cantidad de jugo de caña por medio de compresión (Figura 1.8). Las funciones básicas que desempeña el tándem de molinos son las siguientes:

- Moler una cantidad de caña de acuerdo con su capacidad.

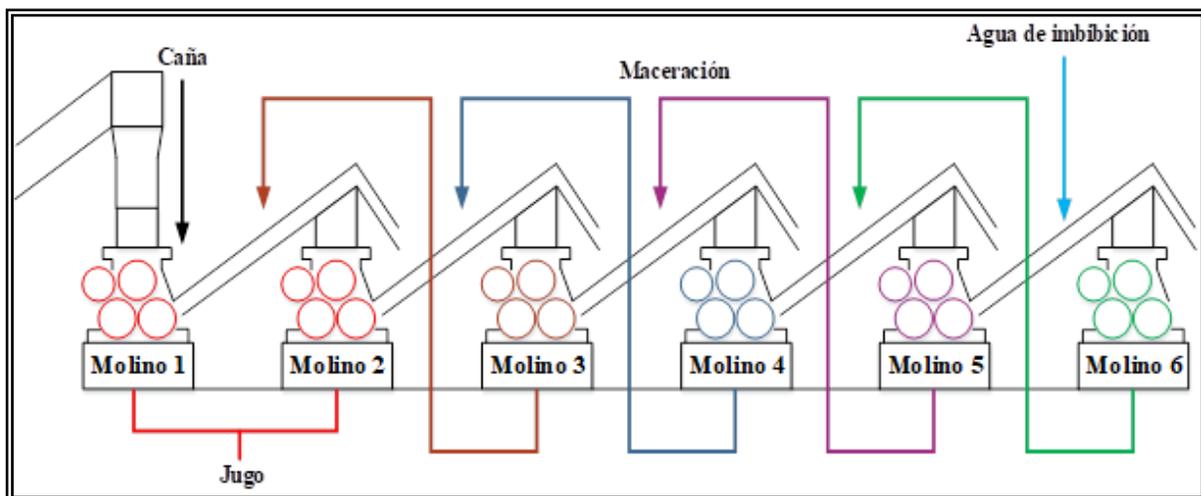


Figura 1. 8 Tándem de molinos (Elaboración propia).

- Extraer el contenido de jugo y sacarosa de la caña.
- Entregar bagazo para el funcionamiento de las calderas.

La Figura 1.9 muestra parte del tándem de molinos que se encuentra en el ingenio azucarero en estudio, donde se muestra el conductor *donelly* 3 (azul), el conductor *donelly* 4 (naranja) y, al fondo, el conductor *donelly* 5 (rojo).

El grado de eficiencia en las operaciones del tándem de molinos depende de muchas variables presentes en el proceso de molienda, entre las cuales se encuentran las siguientes:

1. Ajuste de los molinos.
2. Velocidad de los equipos motrices (motores, turbinas, etc.).
3. Presiones hidráulicas.
4. Agua de imbibición y maceración.
5. Alimentación de caña al tándem.
6. Lubricación.
7. Limpieza y desinfección.



Figura 1. 9 Parte del tándem de molinos del ingenio azucarero en estudio.

1.3.3 Molinos de caña de azúcar

Los molinos son maquinarias destinadas a comprimir la caña de azúcar por medio de una fuerza hidráulica haciendo pasar el bagazo a través de unas mazas y así poder extraer la mayor cantidad de sacarosa. Los seis molinos de caña del ingenio azucarero, en estudio, tienen la combinación clásica de cuatro mazas: superior, bagacera, cañera y cuarta maza.

La Figura 1.10 muestra las cuatro mazas y algunos componentes que conforman el molino de caña de azúcar:

- Cabezote hidráulico.
- Chumacera soporte 4ª maza.
- Corona superior.
- Corona cañera.
- Corona bagacera.
- Excéntrica.
- Virgen de molino.

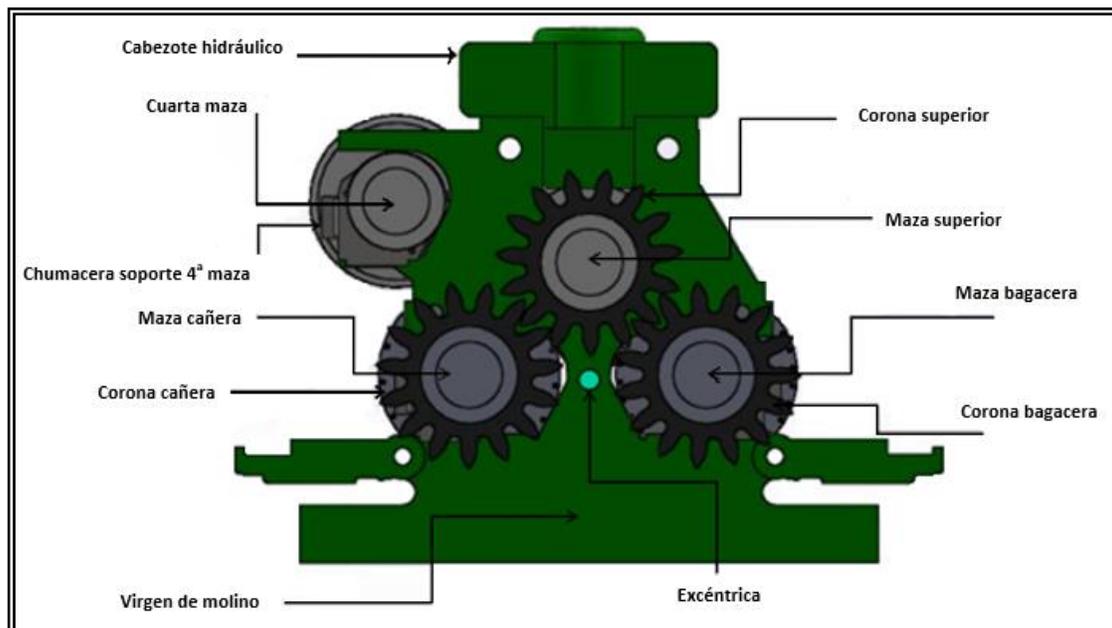


Figura 1. 10 Molino de caña de azúcar con sus componentes (Ingenio azucarero, 2016).

Otros elementos que no se observan en la Figura 1.10, que conforman la estructura del molino de caña de azúcar, son los siguientes:

- Flechas (superior, bagacera, cañera y de cuarta maza).
- Corona de cuarta maza y corona para el movimiento de cuarta maza.
- Chumacera integral y chumacera de reposo.
- Líneas de presión hidráulica, lubricación y enfriamiento.
- Raspador superior tipo L.
- Raspador inferior bagacero.
- Silletas.
- Chumaceras cañeras y chumaceras bagaceras.
- Cuchilla central.
- Puente de cuchilla central.
- Soporte de cuchilla central.
- Botas.
- Bridas.
- Sellos.

1.3.4 Componentes principales del molino de caña de azúcar

Como se mencionó en la Sección 1.3.3 el molino cuenta con diferentes elementos que constituyen su estructura y que son fundamentales para su funcionamiento. Los principales componentes con los que cuenta el molino de caña de azúcar se describen en esta sección.

1.3.4.1 Virgenes

Cada molino del ingenio azucarero tiene dos vírgenes de acero fundido (o hierro fundido). Las vírgenes soportan todos los componentes que constituyen el molino (Sección 1.3.3) y se colocan paralelas entre sí a una distancia especificada. El diseño de las vírgenes define el número de mazas del molino; las vírgenes del ingenio azucarero, en estudio, tienen un diseño para cuatro mazas.

Las vírgenes del molino de caña de azúcar se constituyen de los siguientes tres componentes básicos (Figura 1.11):

- Soporte de cuarta maza.
- Bisagra de maza cañera.
- Bisagra de maza bagacera.

1.3.4.2 Mazas

Las mazas son estructuras cilíndricas capaces de soportar fuertes cargas de compresión. Son cuatro las mazas (Figura 1.10) que constituyen el molino del ingenio azucarero, en estudio:

- La maza superior, que proporciona el movimiento de transmisión a las otras mazas.
- La maza cañera, que es una de las primeras en realizar la extracción de jugo de caña.
- La maza bagacera, que se encuentra a la salida del bagazo.
- La cuarta maza, que introduce y da dirección a la caña hacia la maza superior y maza cañera.

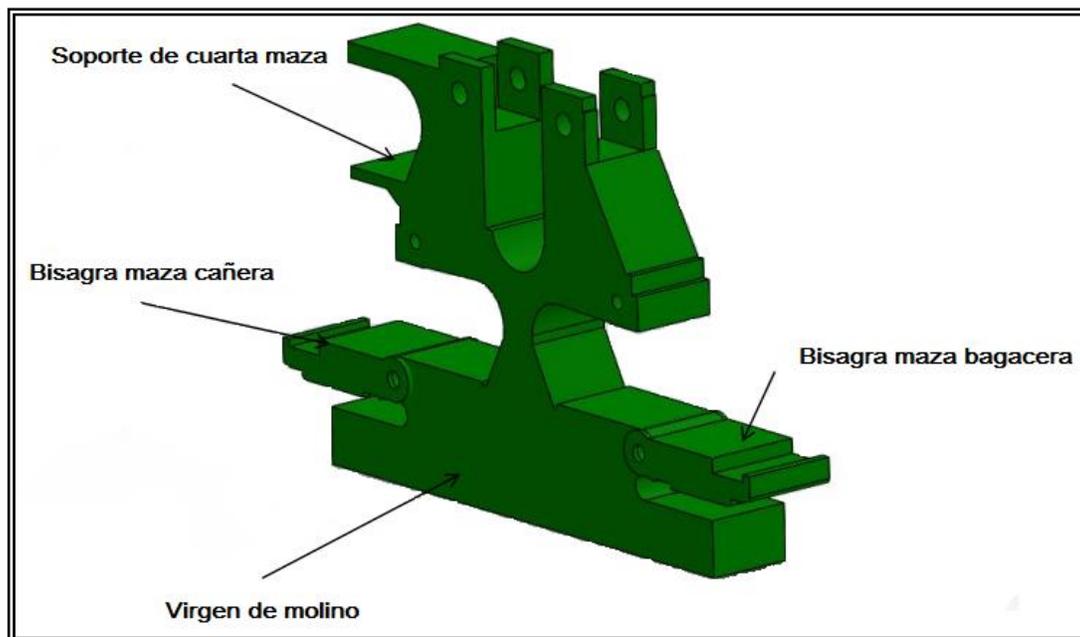


Figura 1. 11 Virgen de molino y elementos que la conforman (Ingenio azucarero, 2016).

Las mazas se constituyen de cuatro componentes complementarios para comprimir la caña de azúcar (Figura 1.12):

- **Flecha.** Es un eje cilíndrico de acero forjado, calidad SAE 1045⁷ con diferentes secciones a lo largo de su longitud:

- Una sección cilíndrica, donde va montada la corona.
- Dos secciones de muñones, que asientan sobre las chumaceras de la flecha.
- Una sección donde va montada la camisa.

Otras secciones se tienen cuando la flecha está diseñada para la maza superior las cuales se ubican en los extremos de la flecha:

- La sección cuadrada, que recibe el movimiento de la transmisión.
- La sección de menor diámetro, donde va montada la corona para el movimiento de la cuarta maza.

- **Corona.** Es un engrane de acero fundido que se encarga de transmitir el movimiento de una maza a otra. Las coronas son las siguientes:

1. La corona cañera, corona bagacera y corona superior están montadas en el extremo derecho (de transmisión) de sus respectivas mazas y se conforman de 15 dientes.
2. La corona de cuarta maza se localiza en el extremo izquierdo (o extremo libre) de la cuarta maza y tiene 23 dientes.
3. La corona para el movimiento de la cuarta maza está montada en el lado izquierdo de la maza superior y tiene 27 dientes.

- **Camisa.** Es un cilindro fabricado de hierro fundido que se acopla a la flecha por presión. La camisa se fabrica con ranuras distribuidas a lo largo de ella; cada ranura tiene forma de triángulo, llamado diente, que se caracteriza por tener un ángulo de rayado, una profundidad y una distancia del centro de un diente a otro. Se acostumbra a poner soldadura, en forma de puntos (o granos), en las puntas de los dientes con el fin de obtener una mejor extracción de jugo de caña.

⁷ Es un acero a medio carbono. Es utilizado para la fabricación de componentes de maquinaria.

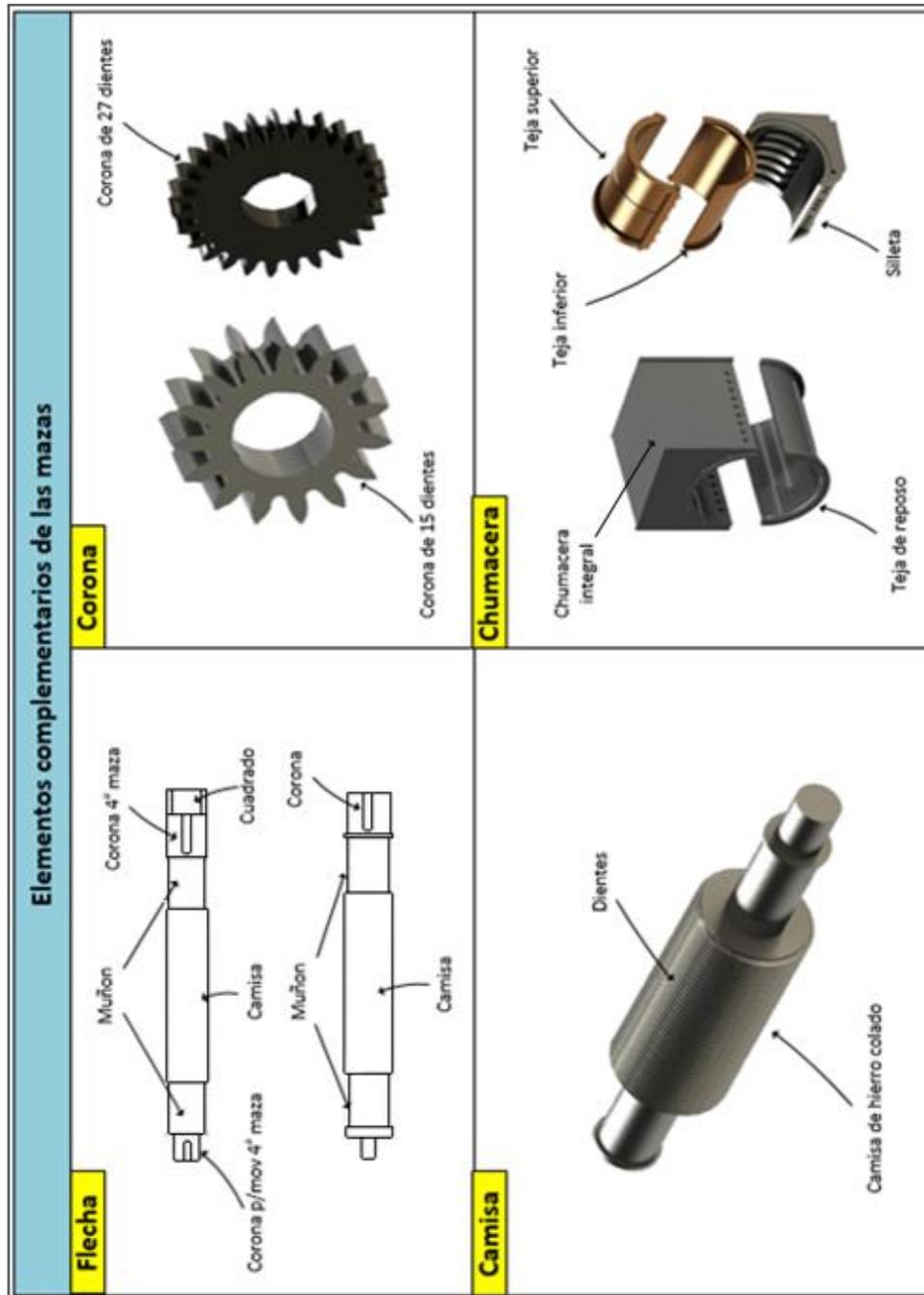


Figura 1. 12 Elementos complementarios de las mizas (Elaboración propia).

- **Chumacera.** Es un soporte sobre el cual se apoyan y giran los muñones de la flecha. Existen tres tipos de chumaceras:
 - La chumacera superior se utiliza para la maza superior y se compone de dos partes: chumacera integral y chumacera de reposo.
 - La chumacera inferior se utiliza para la maza cañera y bagacera. Se compone de tres partes: tapa superior, teja inferior y silleta.
 - La chumacera de cuarta maza forma un cilindro completo y es de menor tamaño, a comparación de las otras dos chumaceras.

A las mazas se les efectúa un ajuste de posición para obtener mejores resultados en la extracción del jugo, para ello, se sigue un trazo (dibujo) que involucra a las tres mazas y a la cuchilla central. El trazo siempre va a depender del ajuste de cada molino, la flotación de la maza superior, el rayado de las mazas y la secuencia o posición de los molinos en el tándem. El trazo se realiza ejecutando los siguientes pasos:

1. Medir del centro de la maza superior, al centro de la cuchilla central.
2. Medir del centro de la maza superior, a la punta y cola de la cuchilla central.
3. Asegurar el perno excéntrico y los soportes.
4. Medir la altura y el centro, de la maza cañera al centro de la maza superior. La medición va a depender del diámetro de la misma.
5. Repetir el paso anterior para la maza bagacera.

1.3.4.3 Cuchilla central

La cuchilla central (Figura 1.13) es una pieza de acero forjado, calidad SAE 1045, que se ubica debajo de la maza superior. Algunas de las funciones de la cuchilla central son las siguientes:

- Transferir el bagazo desde la maza cañera hasta la maza bagacera, por un espacio que se forma entre la superficie inferior de la maza superior y la superficie cóncava de la cuchilla central.
- Actuar como raspador de la maza cañera y maza bagacera, ya que la cuchilla tiene una dentadura que engrana con ambas mazas.

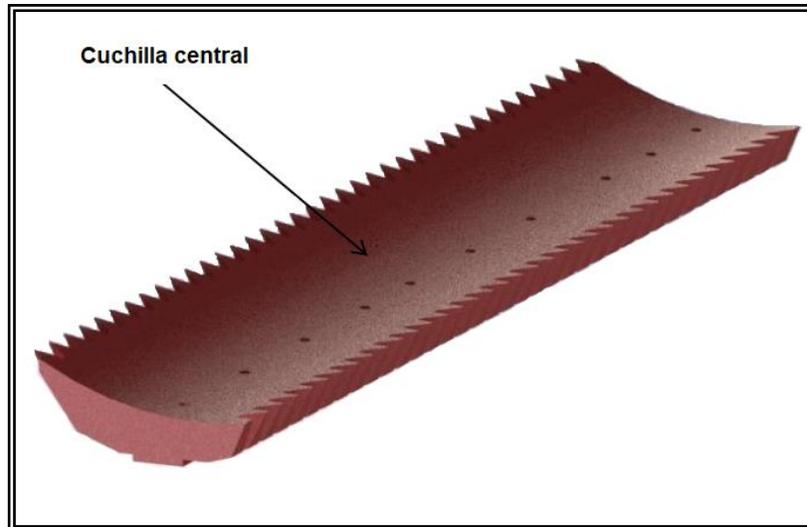


Figura 1. 13 Cuchilla central (Ingenio azucarero, 2016).

Por su ubicación, la cuchilla central debe soportar una carga hidráulica aplicada a la maza superior. Para resistir toda esa carga, la cuchilla se conecta a una pieza sólida de acero llamada puente (Figura 1.14), que va atornillado en sus extremos inferiores a un soporte (Figura 1.15).

Después del ajuste y montaje de la cuchilla (Sección 1.3.4.2), se realiza un blindaje⁸ con el fin de soportar la agresividad del proceso: acidez, corrosión y abrasión. Sino se aplica el blindaje a la cuchilla sólo duraría dos meses, afectando gravemente el proceso de molienda de la caña de azúcar.

1.4 Conclusión

La descripción del ingenio azucarero permitió conocer las principales características de la empresa: antecedentes del ingenio azucarero, misión, visión, valores y virtudes, sustentabilidad, ubicación geográfica, organigrama general, productos del ingenio y su distribución. Todas éstas características son indispensables para conocer el funcionamiento del ingenio, en estudio, y determinar, con ello, las mejores propuestas para la implementación de las técnicas y herramientas para la resolución del problema.

⁸ El blindaje es un método de agregación, de dos o tres capas, de soldadura.

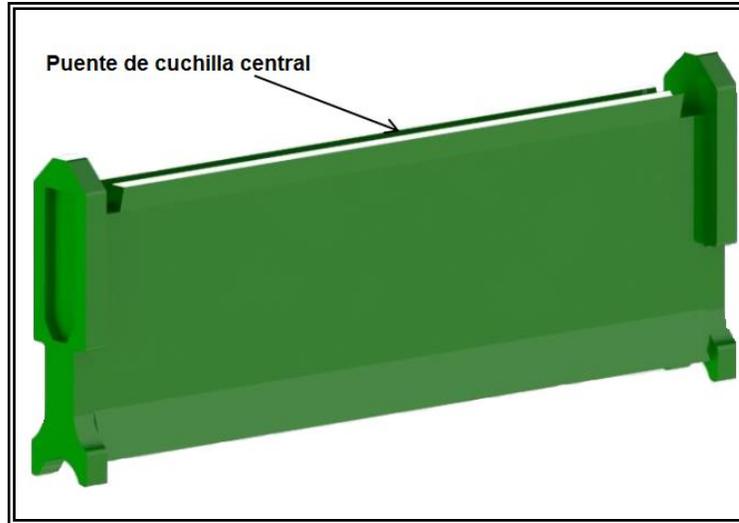


Figura 1. 14 Puente de cuchilla central (Ingenio azucarero, 2016).

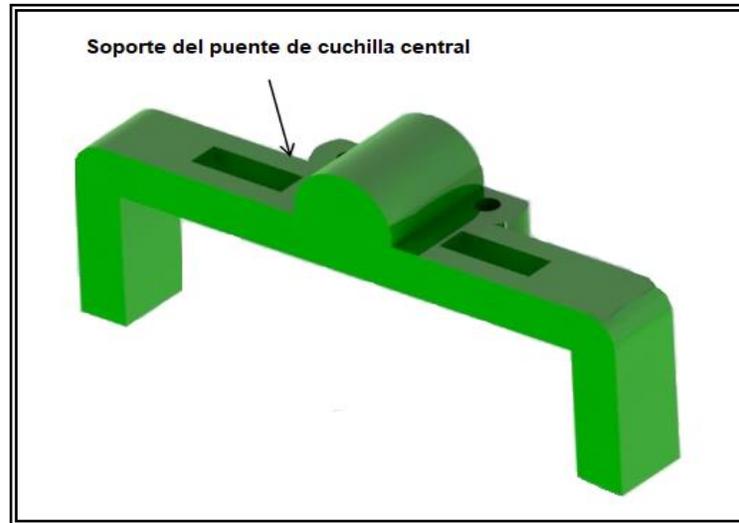


Figura 1. 15 Soporte del puente de cuchilla central (Ingenio azucarero, 2016).

Capítulo 2

Marco teórico

En el presente capítulo se presenta una breve descripción de las técnicas de ingeniería industrial utilizadas para cumplir con el objetivo: reducir el tiempo de las actividades de mantenimiento del tándem de molinos. Para visualizar el proyecto y jerarquizar las actividades de mantenimiento se utilizó la Estructura de Descomposición de Trabajo (*WBS*), la Ruta Crítica (*CPM*) y la Técnica de Evaluación y Revisión de Proyectos (*PERT*) se utilizaron para planificar las actividades de mantenimiento y estimar la duración total del proyecto con ayuda de un *software* para administración de proyectos: *Project*; la simulación de Monte Carlo se utilizó para estimar la probabilidad del tiempo de terminación de las actividades de mantenimiento. Se presentan también pruebas estadísticas las cuales son utilizadas para validación de los resultados obtenidos (prueba de hipótesis).

2.1 Método de la ruta crítica (*CPM*)

En la industria moderna cada día se vuelve más variable y compleja la ejecución de un proyecto debido a que se multiplica el número de elementos (individuos, factores y diferentes recursos) que hay que coordinar y relacionar.

Para solucionar esta dificultad se han desarrollado técnicas de planificación y control de proyectos con el objetivo de ayudar al administrador a ejecutar de manera eficiente su trabajo; entre estas técnicas ha destacado la que utiliza el diagrama de redes tal como el Método de la Ruta Crítica (*CPM*, por las siglas en inglés de *Critical Path Method*).

2.1.1 Breve historia del *CPM*

Catalytic Construction Company (1970) afirma que el *CPM* tuvo su origen como resultado de exhaustivos estudios sobre investigación de operaciones en el año de 1957 y su finalidad inmediata era tratar de perfeccionar las técnicas entonces existentes de planeación y programación.

En 1957 la empresa DuPont, ubicada en los Estados Unidos, tenía un proyecto en mente que consistía en ampliar cerca de 300 fábricas. Este proyecto implicaba un gran número de actividades las cuales no podían ser planeadas fácilmente en un diagrama de Gantt y requerían que el tiempo y el costo fueran estimados con bastante precisión. Fue por ello que en ese mismo año los señores James E. Kelly, de Remington Rand, y Morgan R. Walker, de DuPont, crearon el *CPM* con la finalidad de poder controlar y optimizar los costos de operación mediante una planeación y programación adecuada de las actividades (González *et al*, 2010).

Morgan R. Walker fue el autor de la lógica del *CPM*, mientras que James E. Kelly formuló y desarrolló el aspecto matemático. Posteriormente, el Dr. Rocco L. Martino, de la empresa consultora Mauchly Associates, trabajó en los refinamientos de la técnica original aplicándola en la programación de obras relacionadas entre sí y en la programación del nivel de mano de obra (Melendez, 1969).

2.1.2 Definición del *CPM*

El *CPM* es una técnica eficaz en la planificación y administración de todo tipo de proyectos. Según Ahuja y Walsh (1995), el *CPM* es una técnica de elaboración de una red o diagrama que permite planificar un proyecto. Antill y Woodhead (1993) lo definen como:

“La representación del plan de un proyecto en un diagrama o red, que describe la secuencia e interrelación de todos los componentes del proyecto, así como el análisis lógico y la manipulación de esta red, para la completa determinación del mejor programa de operación”.

El *CPM*, en cualquier proyecto, trae como resultado una considerable reducción del tiempo y del costo de los mismos; esto es posible porque esta técnica tiene una gran flexibilidad y adaptabilidad a cualquier proyecto, grande o pequeño, lo que permite una planificación más económica y en forma tal que las operaciones de cualquier proyecto son terminadas en las fechas deseadas.

Para obtener una considerable reducción del tiempo y del costo en un proyecto, éste debe tener las siguientes características (Montaño, 1990):

1. El proyecto debe ser único y no repetitivo.
2. El proyecto debe ejecutarse en un tiempo mínimo, es decir, en tiempo crítico.
3. El proyecto debe desarrollarse con un costo de operación óptimo dentro de un tiempo disponible.

En general, el *CPM* es una técnica administrativa que planifica, programa, ejecuta y controla todas las actividades que conforman un proyecto.

2.1.3 Aplicaciones y beneficios del *CPM*

El *CPM* es aplicable en cualquier situación en la que se tenga que llevar una serie de actividades o tareas, relacionadas entre sí, para alcanzar un objetivo determinado. Los beneficios derivados de la aplicación del *CPM* se presentarán en relación con la habilidad con la que se haya aplicado la técnica, es decir, si el *CPM* es utilizado correctamente se obtendrá un proyecto ordenado que podrá ser ejecutado de la manera más eficiente y en menor tiempo.

La aplicación del *CPM* ofrece los siguientes beneficios (Catalytic Construction Company, 1970):

- Resume en un solo documento la imagen general de todo el proyecto lo cual ayuda a identificar contradicciones en la planeación de actividades y, en general, ayuda a que el proyecto se logre con un mínimo de errores.
- Permite la planeación y programación de los recursos disponibles (mano de obra, materiales, equipo y capital de trabajo) para realizar un proyecto.
- Permite la simulación de caminos alternativos en un proyecto al comparar y examinar los costos, recursos, ventajas y desventajas de alternativas favorables para alcanzar el objetivo deseado.

- Ayuda en la capacitación del personal, ya que se convierte en un medio práctico que muestra la importancia de cada actividad y las interdependencias en la ejecución de las tareas.
- Guía el proceso de un proyecto. A medida que se progresa, aparecen sugerencias y oportunidades para hacer más eficiente la ejecución de un proyecto.
- Reduce al mínimo las diversas circunstancias que impiden la realización de un proyecto (fenómenos meteorológicos, falta de materiales o mano de obra, etcétera), que alteran la programación del proyecto.
- Permite el estudio de diversas circunstancias, mencionadas en el punto anterior, y ayuda a seguir un procedimiento para la óptima solución de los problemas que pudieran presentarse.

Para Melendez (1969), el *CPM* proporciona entre otros beneficios los siguientes:

- Coordina las diferentes actividades de los grupos de trabajo que intervienen en la ejecución de un proyecto.
- Permite prever, con suficiente anticipación, las dificultades que pudieran presentarse en la ejecución del proyecto y fija las responsabilidades a quien corresponda.
- Da una idea muy clara de la magnitud del problema y de la importancia del conjunto de actividades.
- Permite enfocar la atención en aquellas actividades que presenten mayor dificultad y que, por consiguiente, requieran mejor supervisión.
- Facilita la información a los nuevos dirigentes, cuando ocurren cambios en el personal.
- Señala los tiempos óptimos de todas y cada una de las actividades que intervienen en un proyecto.

Los beneficios anteriores son algunas de las maneras como el *CPM* puede ayudar al administrador de un proyecto a tomar decisiones sobre bases objetivas, obteniendo grandes resultados al aplicar esta técnica de la manera correcta pues proporciona una visión general del proyecto. Sin embargo, el *CPM* no es un remedio que resuelva todos los problemas de

planificación, programación y control de un proyecto; cualquier aplicación incorrecta de la técnica producirá resultados adversos.

2.1.4 Fases del CPM

En virtud de que el *CPM* se aplica a la planificación y programación de las actividades en un proyecto, deberá seguirse una serie de procedimientos lógicos. Estos procedimientos pueden ser agrupados en las siguientes dos fases (Antill & Woodhead, 1993):

1. Planificación del proyecto.
2. Programación del proyecto.

2.1.4.1 Planificación del proyecto

La planificación es el proceso de seleccionar un método y orden, dentro de todas las posibilidades y secuencias en que podría efectuarse un proyecto, señalando su forma de realización. Para llevar a cabo la planificación del proyecto se ejecutan los siguientes pasos (Antill & Woodhead, 1993):

1. Realizar una lista las actividades.

El primer paso de la planificación de un proyecto es realizar una lista de todos los procesos que conforman el proyecto. En términos generales, a los procesos se les llama comúnmente actividad (consumen tiempo) y la terminación de una actividad se le llama evento (separados unos de otros por actividades). De acuerdo con Montaña (1990), se deben tener en cuenta los siguientes factores para realizar la lista de actividades:

- La información necesaria para realizar la lista de actividades se obtiene de las personas que intervienen en la ejecución del proyecto
- Al tomar la información no es necesario que las actividades se listen en el orden de ejecución del proyecto.
- No es necesario indicar la cantidad de trabajo ni las personas que ejecutarán las actividades, sólo es suficiente con nombrar las actividades.
- Es conveniente numerar, progresivamente, las actividades para su identificación o, en algunos casos, denominarse en clave.

- Las actividades pueden ser físicas o mentales (trámites, inspecciones, dibujos, etcétera).
2. Establecer la secuencia lógica de las actividades.

Después de que se ha realizado la lista de actividades, se establece su secuencia lógica. A pesar de que muchas actividades se pueden realizar de manera simultánea otras deben realizarse de acuerdo con una secuencia. La secuencia se determina por la dependencia en la realización de las actividades, es decir, la terminación de una actividad señala el inicio de otra que depende de ella; esta dependencia se hace evidente cuando se sujeta cada una de las actividades a las siguientes preguntas (Ahuja & Walsh, 1995):

1. ¿Qué actividades deben quedar terminadas antes de que se pueda iniciar esta actividad?
2. ¿Cuáles actividades se pueden llevar a cabo simultáneamente?
3. ¿Cuáles actividades dependen de la terminación de esta actividad?

Dando respuesta a las tres preguntas anteriores se obtiene la secuencia lógica de las actividades, para ello, se utilizan dos procedimientos: por antecedentes y por secuencias. En la Sección 2.1.5 se explican a detalle estos dos procedimientos. Además de las preguntas anteriores, existen otros factores que determinan la secuencia de las actividades los cuales se muestran en la Sección 2.1.8.

3. Construir la red de actividades.

Una vez establecidas las relaciones de las actividades se construye una red cuyo propósito es la representación de la secuencia correcta de las actividades. Existen dos métodos para construir una red de actividades: Método de Diagramación por Precedencia (*PDM*, por las siglas en inglés de *Precedence Diagramming Method*) y Método de Diagramación de Flecha (*ADM*, por las siglas en inglés de *Arrow Diagramming Method*). En la Sección 2.1.6 se desarrollará de manera más amplia este paso.

En otras palabras, en la planificación del proyecto se establecen y se listan todas las actividades que intervienen en un proyecto para ponerlas en secuencia apropiada, esto es, en el orden en que se van sucediendo o pueden ocurrir, tomando en cuenta la simultaneidad en su ejecución y su dependencia entre ellas.

2.1.4.2 Programación del proyecto

La programación es la determinación de los tiempos de realización de las diferentes actividades que comprende el proyecto a fin de poder calcular la duración total del mismo. Para llevar a cabo la programación del proyecto se ejecutan los siguientes pasos (Render, 2012):

1. Asignar la estimación del tiempo. Para proyectos especiales, proporcionar una estimación del tiempo para cada una de las actividades no resulta ser sencillo, debido a que muchas veces se tiene incertidumbre acerca de los tiempos (en muchas ocasiones no se tienen datos históricos sólidos); por ello se utiliza una distribución de probabilidad basada en tres estimaciones de tiempo:
 1. Tiempo optimista.
 2. Tiempo pesimista.
 3. Tiempo más probable.

La descripción de estos tiempos se desarrollará en la Sección 2.2.4.

2. Determinar la ruta crítica. Una vez asignados los tiempos a cada actividad se determina la ruta crítica, agregando los tiempos de las actividades en cada secuencia, que indica la duración total del proyecto (trayectoria más larga del proyecto); cualquier retraso que sufriera alguna de las actividades en la red provocaría un retraso en todo el proyecto. En la Sección 2.2.5 se desarrollará de manera más amplia este paso.

2.1.5 Matriz de secuencias

La parte más importante en la preparación de un programa es determinar la secuencia en la cual las actividades serán terminadas. De acuerdo con Montaña (1990), los siguientes dos procedimientos se utilizan para conocer la secuencia de las actividades:

- El procedimiento por antecedentes pregunta a los responsables de la ejecución de las actividades cuales de ellas deben quedar terminadas al iniciar cada una de las actividades que aparecen en la lista. Cada una de las actividades debe tener al menos una actividad antecedente y en el caso de la actividad inicial su antecedente será cero.
- El procedimiento por secuencias pregunta a los responsables de la ejecución de las actividades cuales de ellas deben realizarse al terminar cada una de las actividades que

están en la lista, para ello, se inicia con la actividad cero que indicará el punto de partida de las demás actividades.

La matriz de secuencias puede llevarse a cabo mediante la utilización de un *software* de gestión de proyectos o mediante técnicas manuales o automatizadas. Al determinar la secuencia de las actividades se deben entender tres situaciones (Tovar, 2001):

1. Tener conocimiento del proyecto que se está desarrollando.
2. Tener amplia experiencia en el proceso.
3. Saber que habrá más de una secuencia correcta para terminar un proyecto.

Se debe tener en cuenta que la matriz de secuencias no es definitiva, generalmente se realizan ajustes posteriores debido a que las actividades se ven afectadas por las dependencias entre ellas y otras restricciones.

2.1.6 Red de actividades

En esta sección se describirá lo siguiente para conocer con mayor detalle una red de actividades:

- Definición de red.
- Elementos que conforman una red.
- Método de Diagramación por Precedencias (*PDM*).
- Método de Diagramación de Flechas (*ADM*).

2.1.6.1 Definición de red

El *CPM* utiliza un lenguaje gráfico cuya parte central es la red que forman las actividades que conforman un proyecto y que definen la duración del mismo. Montaña (1990), define a la red como:

“La representación gráfica de las actividades que muestran sus eventos, secuencias, interrelaciones y el camino crítico”.

Para Antill y Woodhead (1993), una red se define como:

“Una serie de flechas y nudos, dispuestos en forma tal, que proporcionen una representación visual detallada de un proyecto”.

2.1.6.2 Elementos que conforman una red

Para construir una red se deben conocer los siguientes elementos que la conforman (Montaño, 1990):

- Un evento, también conocido como nodo, que es una actividad que tiene un inicio y una terminación. El evento inicial se denomina i y el evento final se denomina j (Figura 2.1); el evento final de una actividad será el evento inicial de la actividad siguiente, exceptuando el último evento que no tiene otra actividad que le siga.
- Una flecha, que señala la relación entre cada evento y representa el avance del tiempo en el sentido de la misma. Al dibujar una flecha se debe tener en cuenta lo siguiente:
 - La flecha no es un vector.
 - La flecha no representa algún tipo de medida.
 - La longitud de la flecha no tiene significado.
 - La forma de la flecha no importa al momento de construir la red de actividades.

Como se muestra en la Figura 2.2, las flechas pueden ser horizontales, verticales, ascendentes, descendentes, curvas, rectas, quebradas, etcétera.

- Una actividad ficticia, o liga, que se utiliza cuando se tiene la necesidad de indicar que una actividad tiene una continuación con otra. Para dibujar la actividad ficticia se utilizará una línea punteada (Figura 2.3), trazada entre dos eventos, con una duración de cero. La actividad ficticia también puede presentar un tiempo de espera para poder comenzar la actividad siguiente.

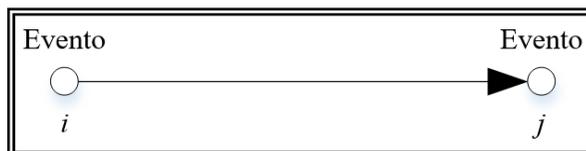


Figura 2. 1 Evento inicial i y evento final j (Montaño, 1990).

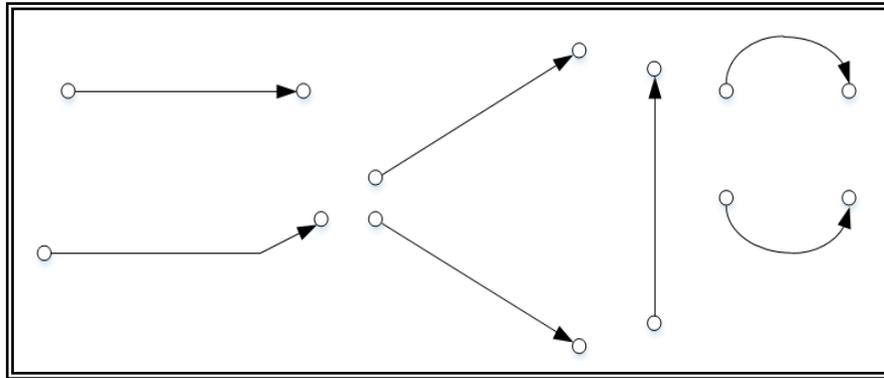


Figura 2. 2 Tipos de flechas (Montaño, 1990).

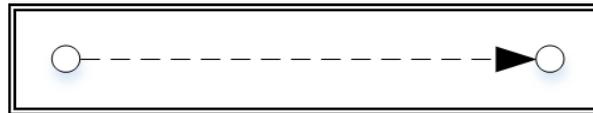


Figura 2. 3 Actividad ficticia (Montaño, 1990).

2.1.6.3 Método de diagramación por precedencias (*PDM*)

PMI (2013), define al método de diagramación por precedencias como:

“Una técnica utilizada para construir un modelo de programación en el cual las actividades se representan mediante nodos y se vinculan gráficamente mediante una o más relaciones lógicas para indicar la secuencia en que deben ser ejecutadas”.

El *PDM* también es conocido como el Método de Actividad en el Nodo (*AON*, por las siglas en inglés de *Activity On Node*) en el cual los nodos representan las actividades, como también se precisa en la definición anterior, y las flechas indican las relaciones de precedencia entre ellas. El *PDM* es el utilizado por la mayoría de los paquetes de *software* de gestión de proyectos. La Figura 2.4 muestra un diagrama de red utilizando el *PDM* en donde las actividades están representadas por medio de círculos (nodos), con flechas que indican la siguiente secuencia:

1. Las actividades A y E emanan de un nodo inicial porque no tienen predecesores inmediatos.
2. Las flechas que conectan la actividad A con la actividad C y D indican que las dos requieren que la actividad A finalice antes de que ellas puedan comenzar.

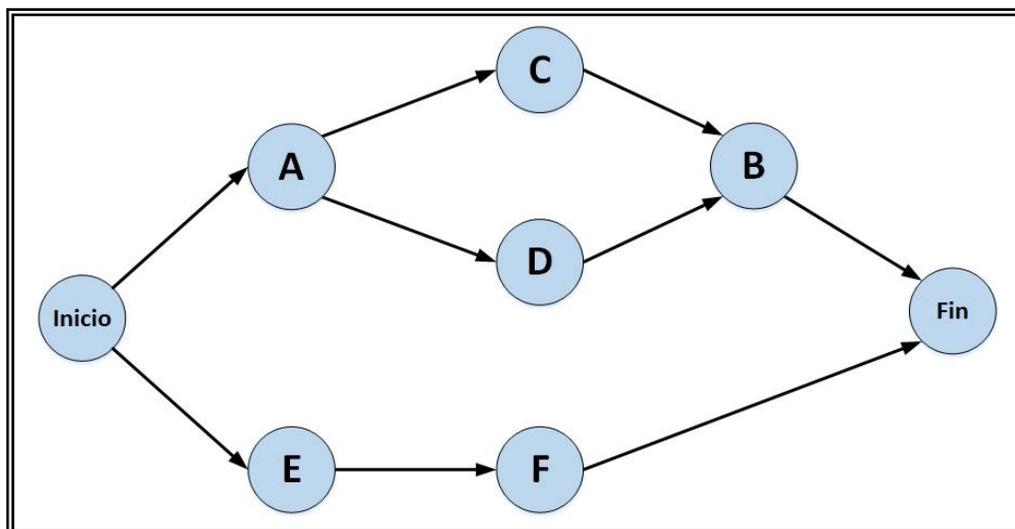


Figura 2. 4 Diagrama de red utilizando el *PDM* (Elaboración propia).

3. En forma similar, la actividad E deberá completarse antes de que la actividad F pueda empezar.
4. Las actividades B y F están conectadas con un nodo final porque no hay más actividades por realizar después de ella.

Los nodos de inicio y fin no representan, en realidad, actividades pues solamente proporcionan los puntos de inicio y terminación para el diagrama de red.

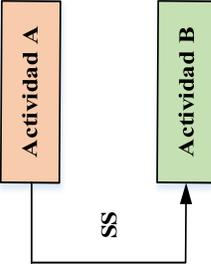
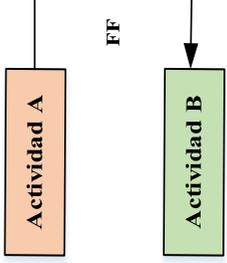
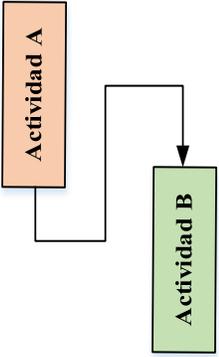
En la red de la Figura 2.4 se observa que una actividad no puede comenzar hasta que la anterior no haya finalizado; sin embargo, el *PDM* incluye otros tipos de dependencias o relaciones de precedencia las cuales se muestran en la Tabla 2.1. El tipo de relación de precedencia más común es la de fin a inicio.

2.1.6.4 Método de Diagramación de Flechas (*ADM*)

Olalde (2016), define al método de diagramación de flechas como:

“Un método para crear un diagrama de red del cronograma del proyecto que utiliza flechas para representar las actividades, que se conectan en nodos para mostrar sus dependencias”.

Tabla 2. 1 Tipos de dependencias del PDM (Project Management Institute, 2013)

Tipo de precedencia	Dibujo de la precedencia	Descripción
<p>Final a inicio (FS)</p>		<p>El inicio de la actividad sucesora (B) depende de la finalización de la actividad predecesora (A).</p>
<p>Inicio a inicio (SS)</p>		<p>El inicio de la actividad sucesora (B) depende del inicio de la actividad predecesora (A).</p>
<p>Final a final (FF)</p>		<p>La finalización de la actividad sucesora (B) depende de la finalización de la actividad predecesora (A).</p>
<p>Inicio a fin (SF)</p>		<p>La finalización de la actividad sucesora (B) depende del inicio de la actividad predecesora (A).</p>

El *ADM* también es conocido como el Método de Actividad en el Arco (*AOA*, por las siglas en inglés de *Activity On Arc*) en el cual utiliza arcos para representar a las actividades y nodos para representar eventos (Figura 2.5). En este caso, las relaciones de precedencia requieren que un evento no se realice hasta que todas las actividades precedentes hayan sido completadas. La Figura 2.5 muestra un diagrama de red utilizando el *ADM* en donde se desarrolla la siguiente secuencia:

1. Las actividades A, H y K emanan de un nodo inicial porque no tienen predecesores inmediatos; los eventos 1, 3 y 2 indican la terminación de estas actividades, respectivamente.
2. Las actividades C, F e I dependen de la finalización de las actividades A y K, además de la finalización de la actividad H; esto requiere el uso de una flecha de conexión llamada actividad ficticia (Sección 2.1.6) para mantener la secuencia lógica de eventos.
3. La actividad L requiere de la previa finalización de la actividad K.
4. La actividad J requiere de la finalización de las actividades I y L.
5. Similarmente, las actividades D y G requieren de la finalización de las actividades C y F, respectivamente, y la actividad E de la previa terminación de la actividad D.
6. Las actividades B, E, G y J están conectadas con un nodo final porque no hay más actividades por realizar después de ella.

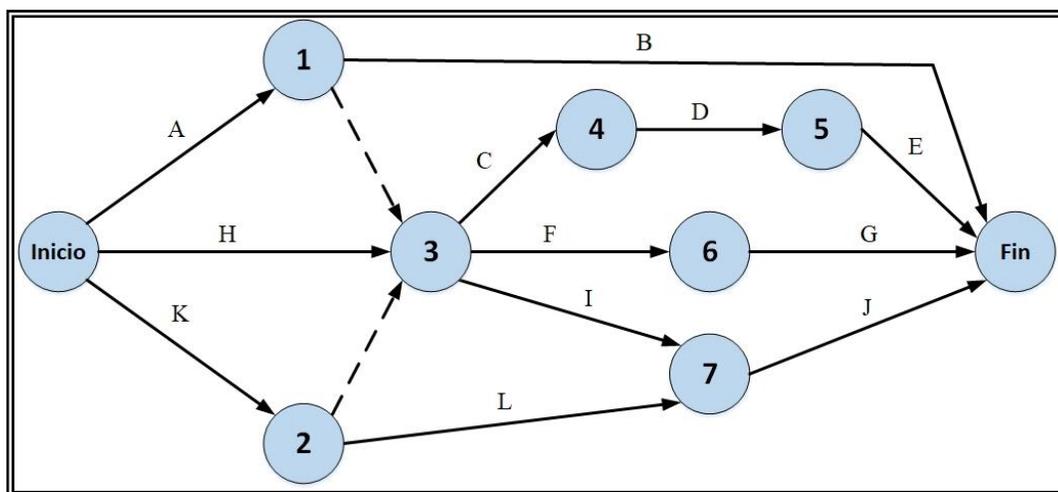


Figura 2. 5 Diagrama de red utilizando el *ADM* (Olalde, 2016).

El *ADM*, en comparación con el *PDM*, sólo utiliza la dependencia final a inicio y puede requerir el uso de actividades ficticias, como se observó en la Figura 2.5. Los eventos, por su parte, se deben numerar para identificación en la red; esta numeración debe ser tal que el número en la punta de la flecha sea siempre mayor que el número que se encuentra en su inicio.

Montaño (1990), menciona que al trazar una red con el *ADM* se debe evitar lo siguiente:

1. Dos actividades que parten y terminan en un mismo nodo (Figura 2.6). Debe abrirse el evento inicial o el evento final en dos eventos y unirlos con una actividad ficticia (Figura 2.7).
2. Partir una actividad de una parte intermedia de otra actividad (Figura 2.8). Toda actividad debe empezar en un evento y terminar en otro. Cuando se presenta este caso, la actividad inicial se divide y se derivan de ellos las actividades secundadas (Figura 2.9).
3. Dejar eventos sueltos al terminar la red (Figura 2.10). Todos los eventos deben relacionarse con el evento inicial o con el evento final (Figura 2.11).

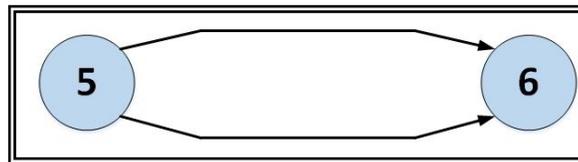


Figura 2. 6 Actividades que unen dos nodos (Ahuja & Walsh, 1995).

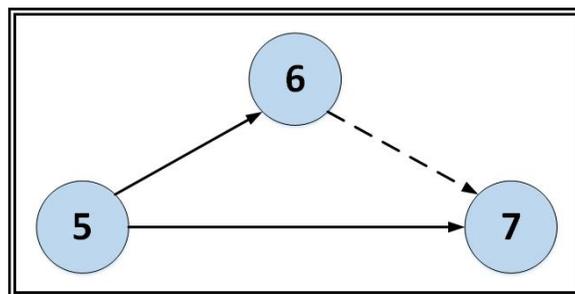


Figura 2. 7 Uso de actividad ficticia (Ahuja & Walsh, 1995).

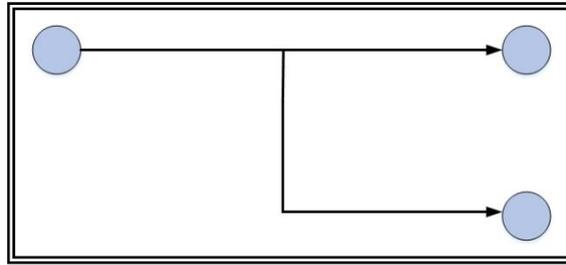


Figura 2. 8 Partir una actividad de una parte intermedia de otra actividad (Montaño, 1990).

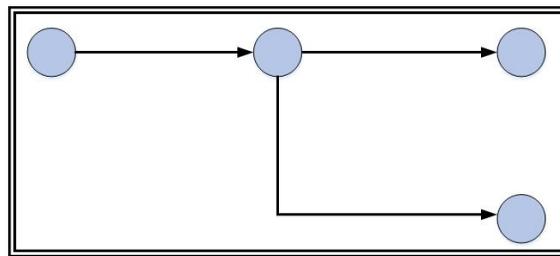


Figura 2. 9 Derivación de actividades secundarias (Montaño, 1990).

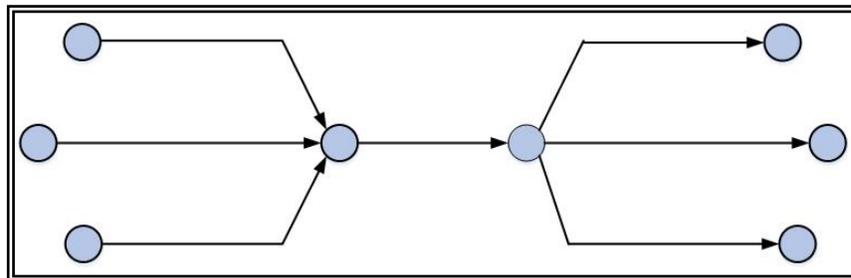


Figura 2. 10 Eventos sueltos al terminar la red (Montaño, 1990).

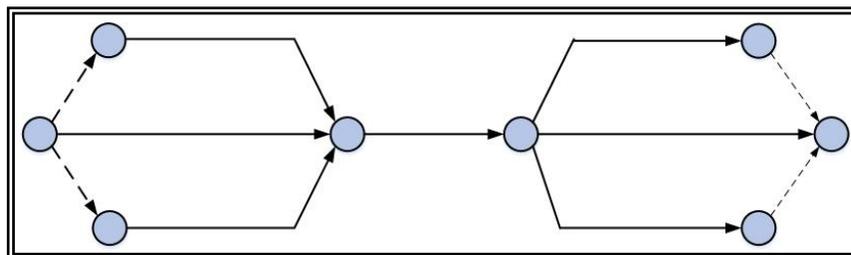


Figura 2. 11 Relación de los nodos con el evento inicial o final (Montaño, 1990).

Tanto el *PDM* como el *ADM* representan con exactitud todas las actividades y relaciones de precedencia de un proyecto. Cada uno de los métodos tiene sus ventajas, por ejemplo, el *ADM* requiere menos nodos que el *PDM*, en cambio el *PDM* no necesita de actividades ficticias. Cualquiera que sea el método que se utilice la tarea de representar un diagrama de red para un proyecto, grande o pequeño, obliga a los involucrados a identificar todas las actividades necesarias para su realización y relacionar todas sus precedencias.

2.1.7 Costos en *CPM*

El *CPM* fue el primero en relacionar costo y tiempo en proyectos, de manera específica para comprimir la red de las actividades.

De acuerdo con Montaña (1990), la manera de incluir los costos a una red de actividades es solicitando los costos de cada actividad realizada en tiempo estándar y tiempo óptimo (tiempos que se desarrollarán en la Sección 2.2.4) al personal responsable de la ejecución de las actividades, de acuerdo a un presupuesto. Los costos, de acuerdo a los tiempos estándar y óptimo, se nombrarán de la siguiente manera:

- Costo normal (\$N), para las actividades realizadas en un tiempo estándar (*t*).
- Costo límite (\$L), para las actividades realizadas en un tiempo óptimo (*o*).

Con los dos costos anteriores y los tiempos estándar y óptimo, se calcula la pendiente de cada actividad, es decir, la relación que existe entre el incremento del costo y la compresión del tiempo. El cálculo de la pendiente se muestra en la Ecuación 2.1.

$$\text{pendiente}(m) = \frac{\text{costo}}{\text{tiempo}} = \frac{\$L - \$N}{t - o} \dots\dots\dots \text{Ec. 2. 1}$$

Por ejemplo, una actividad tiene un costo de \$600 si se realiza en un tiempo estándar de 3 días, y un costo de \$800 si se ejecuta en un tiempo óptimo de 1 día, entonces, de acuerdo la Ecuación 2.1, la pendiente de esta actividad será la siguiente:

$$m = \frac{800 - 600}{3 - 1} = 100$$

El resultado de la pendiente significa que la actividad sufrirá un incremento de \$100 por cada día que se comprima su tiempo estándar, es decir, si la actividad se ejecuta en 2 días su costo normal será de \$700, si se ejecuta en 1 día su costo normal será de \$800. De la misma forma se calculan las pendientes de las actividades que se encuentren en una red y que esta se requiera comprimir.

2.1.8 Limitaciones en la ejecución de un proyecto

Cada proyecto implica ciertas restricciones o limitaciones que podrían causar problemas en la planificación o programación del mismo (sobre todo en la secuencia de las actividades de un proyecto). El *CPM* identifica estas limitaciones y prevé los momentos del proyecto en que éstas incidirían en la ejecución, por lo tanto, en esta sección se describirá la definición de limitación, los tipos de limitación y los pasos para limitar un proyecto.

2.1.8.1 Definición de limitación

El hombre siempre ha buscado la forma de enfrentar aquellos obstáculos que le impiden realizar con éxito proyectos de gran envergadura, por tal razón, el administrador de un proyecto debe de tomar en cuenta que las restricciones o las limitaciones en la ejecución de proyectos siempre van a estar presentes, de una forma u otra.

González *et al* (2010), definen una limitación como:

“Cualquier elemento que te impide que una actividad, proceso o proyecto alcance su meta o se realice conforme lo estipulado”.

Las limitaciones pueden presentarse en todas sus formas a la vez; ya sea en lo económico, lo material, de tiempo, el recurso humano, entre otros.

2.1.8.2 Tipos de limitación

Según González *et al* (2010), las limitaciones, o restricciones, en un proyecto son las siguientes:

- Limitaciones humanas. El factor humano es indispensable en toda actividad o proceso por lo que puede darse el caso de tener recursos humanos limitados, pues casi todas las actividades dentro de una empresa se ejecutan por el hombre y muchas veces se requiere de un personal altamente calificado para poder ser ejecutadas.
- Limitaciones de recurso. Las limitaciones de recursos son las más comunes puesto que pueden escasear si es el caso de materiales y dañarse si es el caso de maquinarias, equipos o herramientas. Puede darse el caso de tener dos actividades que se deban hacer en el mismo lapso, con personal diferente o maquinaria diferente, pero no puedan ejecutarse ya que los recursos que se van a usar para ejecutarlas se deben utilizar en las dos actividades, por lo que se tendría que terminar una actividad para poder comenzar la otra.
- Limitaciones de tiempo. La limitación de tiempo la pone el cliente quien es el que exige o quiere que el proyecto se ejecute en un lapso menor al programado o estimado originalmente.

Para Antill y Woodhead (1993), las limitaciones en un proyecto son las siguientes:

- Las limitaciones físicas, que obligan a realizar las actividades de un proyecto en secuencia, por ejemplo, el colado de una trabe de concreto presupone la construcción de la cimbra y la colocación de acero de refuerzo.
- Las limitaciones de seguridad, que obligan a realizar en secuencia actividades que en otras condiciones podrían hacerse simultáneamente.
- Las limitaciones de recursos, que aparecen cuando es necesario aplazar una actividad porque los recursos para realizarla no están disponibles.
- Las limitaciones de mano de obra, que aparecen cuando no se tiene el suficiente personal, por lo que se tienen que realizar las actividades en secuencia cuando se podrían realizar simultáneamente.

- Las limitaciones administrativas, que aparecen cuando la secuencia de actividades es controlada por una decisión de la gerencia, o cuando actividades que normalmente son ejecutadas simultáneamente, son ordenadas para efectuarse en cierta secuencia porque la gerencia desea que se realice de esa manera.

2.1.8.3 Pasos para limitar un proyecto

Para limitar un proyecto, o cubrirse de los posibles escenarios que puedan presentarse a la hora que se esté ejecutando un proyecto, se debe de planificar y programar utilizando el *CPM* y *PERT*. Estas técnicas parten del supuesto de que los recursos (humanos, materiales y equipos) son limitados y que no están disponibles en la ejecución del proyecto, es decir, que aquellas actividades que podían realizarse juntas sin limitaciones de recursos ahora deberán realizarse de forma dependiente, una seguida de la otra.

Los pasos para limitar un proyecto son los siguientes (González *et al*, 2010):

1. Se dibuja la red de actividades del proyecto, sin limitaciones.
2. Se estudia sobre esa misma red qué actividades conviene limitar.
3. Se ajusta la matriz de secuencias con las nuevas precedencias y secuencias.
4. Se dibuja la red de actividades con los ajustes anteriores.
5. Se toma en cuenta qué tanto cuestan, en lo económico, estas limitaciones.
6. Se realizan estudios de optimización de tiempos y costos.
7. Se determina el costo óptimo para conocer si puede hacerse el proyecto con los recursos económicos disponibles. Si puede hacerse, se buscará el tiempo total más favorable para las necesidades y objetivo del cliente o del proyecto.

Al limitar un proyecto existe la posibilidad de que aparezcan una o más rutas críticas en la red de actividades limitada o que aumente el tiempo de duración del proyecto.

2.2 Técnica de Evaluación y Revisión de Proyectos (*PERT*)

Con el desarrollo de proyectos complejos, a medida que avanza el tiempo, es evidente la necesidad de una técnica que logre la planificación y gestión de las múltiples actividades que se

ejecutan en el proyecto y la estimación de tiempos de las mismas, es decir, una técnica depurada y flexible para las actividades gerenciales.

Por lo anterior, la Técnica de Evaluación y Revisión de Proyectos (*PERT*, por sus siglas en inglés de *Project Evaluation and Review Techniques*) ofrece un modelo para la planificación y gestión de proyectos la cual ha sido ampliamente usada en la industria de la construcción, pero su uso se ha sido expandido a diversos ámbitos industriales.

2.2.1 Breve historia de *PERT*

Catalytic Construction Company (1970) menciona que simultáneamente a las investigaciones del método de la ruta crítica, la Marina de los Estados Unidos trabajaba en un proyecto de construcción de submarinos atómicos llamado “Polaris”, donde tendría la responsabilidad de coordinar y controlar a 250 empresas, 9000 subcontratistas y numerosas agencias gubernamentales para llevarlo a cabo.

Debido al alto grado de complejidad, la Marina de los Estados Unidos pidió la colaboración al fabricante de proyectiles balísticos *Lockheed Aircraft* y al despacho de consultores Booz, Allen y Hamilton, para desarrollar una técnica que permitiera coordinar el progreso de las personas involucradas en el proyecto; ésta técnica fue bautizada con el nombre de *PERT*.

En un principio, *PERT* era una técnica coordinadora orientada hacia los hechos de un proyecto, es decir, hacia la terminación o inicio de las actividades. Además, tenía la capacidad de introducir el cálculo de probabilidades en las estimaciones de la duración de las actividades.

2.2.2 Definición y características de *PERT*

Antill y Woodhead (1993), definen *PERT* como:

“Un enfoque probabilístico de los problemas de planeación y control de proyectos, apropiados para la información sobre trabajos en los que existe mayor grado de incertidumbre”.

La técnica *PERT* es utilizada en proyectos únicos o en proyectos en donde la determinación del tiempo para las actividades no puede ser hecha, es decir, que presentan incertidumbre en los tiempos estimados para las duraciones de las actividades del proyecto. Además, la técnica *PERT* presenta las siguientes características (Sharma, 2006):

- Asume una distribución de probabilidad beta⁹ para la duración de cada actividad.
- Hace énfasis en la finalización de una tarea, en vez de las actividades orientadas a un evento o actividad particular.
- Utiliza actividades de carácter no repetitivo en las que las estimaciones de tiempos son inciertas.
- Ayuda en la identificación de áreas críticas en un proyecto para que el ajuste necesario pueda ser hecho para cumplir con la fecha de finalización programada del proyecto.

La técnica *PERT*, por lo tanto, es conveniente para aquellas situaciones en donde no haya antecedentes suficientes para especificar con exactitud los datos de tiempo, costo o donde las actividades del proyecto requieran investigación y experimentación.

2.2.3 Objetivos de *PERT*

PERT persigue en un proyecto los siguientes objetivos (Baron, 2012):

- Establecer las actividades necesarias del proyecto.
- Buscar el plazo óptimo de ejecución del proyecto.
- Conocer las relaciones entre las actividades del proyecto.
- Identificar las actividades críticas.
- Identificar el camino o ruta crítica.
- Identificar las holguras de las actividades no críticas.
- Identificar las actividades que deben modificarse para cambiar el tiempo total del proyecto.

⁹ La distribución beta se describe en el Anexo 1.

- Determinar cuáles actividades pueden modificarse, sin alterar el tiempo total del proyecto.

2.2.4 Matriz de tiempos

Estimar la duración de las actividades es el proceso de establecer la cantidad de tiempo necesario para finalizar cada una de las actividades. De acuerdo con Project Management Institute (2013), existen las siguientes tres técnicas para estimar la duración de las actividades:

1. La estimación análoga, que permite estimar la duración de una actividad o proyecto mediante la utilización de datos históricos, de una actividad o proyecto similar, como base para estimar los mismos parámetros o medidas para un proyecto futuro. La estimación análoga es menos costosa y requiere menos tiempo que otras técnicas, pero también es menos exacta.
2. La estimación paramétrica, que utiliza un algoritmo para calcular la duración sobre la base de los datos históricos y los parámetros (costos, presupuestos, duraciones, etc.) del proyecto. Con esta técnica pueden lograrse niveles superiores de exactitud, dependiendo de la sofisticación y de los datos que se utilicen.
3. La estimación por tres valores, que utiliza tres estimaciones de tiempo para definir un rango aproximado de duración de una actividad. Esta técnica es útil cuando no se dispone de mucha información, o datos históricos, y se deben obtener las estimaciones de los tiempos de las actividades desde el punto de vista de los responsables de un proyecto.

2.2.4.1 Estimación por tres valores y la distribución de probabilidad

En algunos proyectos proporcionar las estimaciones de los tiempos para las actividades no siempre resulta sencillo. Sin datos históricos, los responsables de un proyecto tienen incertidumbre acerca de los tiempos de las actividades, por ello, se utiliza una distribución de probabilidad basada en los siguientes tres tiempos (Montaño, 1990):

- El tiempo medio (m) es el tiempo normal que se necesita para la ejecución de las actividades, basado en la experiencia personal del administrador.

- El tiempo óptimo (*o*) es el que representa el tiempo mínimo posible sin importar el costo o cuantía de elementos materiales y humanos que se requieran; es simplemente la posibilidad física de realizar la actividad en el menor tiempo.
- El tiempo pésimo (*p*) es un tiempo muy grande que pudiera presentarse en el peor escenario posible para esa actividad.

Una curva de distribución de probabilidades que puede representar la incertidumbre empleando los tres tiempos anteriores es la distribución beta. La Figura 2.12 muestra una distribución de probabilidad beta cuyos parámetros son el tiempo optimista (límite inferior de la distribución), pesimista (límite superior de la distribución) y medio (moda de la distribución).

2.2.4.2 Cálculo del tiempo estándar, la desviación estándar y la varianza

Los tres tiempos mencionados en la sección anterior sirven para promediarlos mediante la fórmula *PERT* (Ecuación 2.2) y obtener un tiempo resultante llamado tiempo estándar (*t*) (Figura 2.12), que recibe la influencia del tiempo óptimo y tiempo pésimo a la vez (Montaño, 1990).

$$t = \frac{o + 4m + p}{6} \dots\dots\dots Ec. 2. 2$$

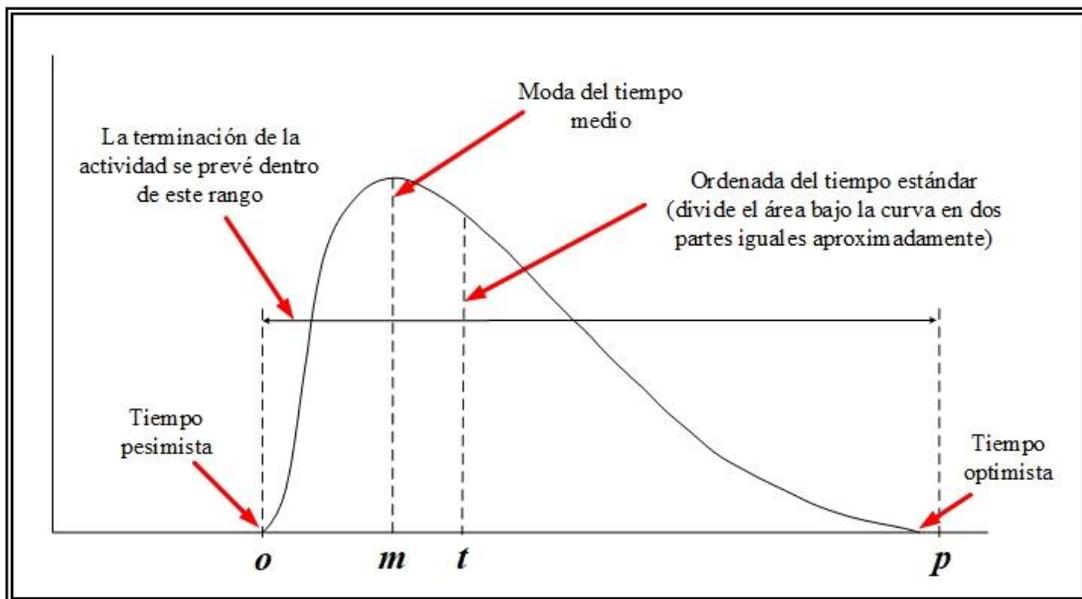


Figura 2. 12 Distribución de probabilidad beta (Antill & Woodhead, 1993).

Básicamente, el tiempo estándar (t) es igual al tiempo óptimo (o), más cuatro veces el tiempo medio (m), más el tiempo pésimo (p), y esta suma dividida entre seis. *PERT* emplea el tiempo estándar junto con una medida asociada de incertidumbre (desviación estándar o varianza de la duración) para expresar este tiempo. En la curva de la Figura 2.12 se pueden hacer aproximaciones para el tiempo estándar de la actividad y su desviación estándar. El cálculo de la desviación estándar se realiza a partir de la Ecuación 2.3.

$$\sigma = \frac{p-o}{6} \dots\dots\dots Ec. 2. 3$$

Respecto a la varianza, ésta se define como el cuadrado de la desviación estándar como se muestra en la Ecuación 2.4.

$$\sigma^2 = \left(\frac{p-o}{6} \right)^2 \dots\dots\dots Ec. 2. 4$$

Los cálculos anteriores se hacen bajo el supuesto que los tiempos de las actividades se conocen. A medida que el proyecto avanza, los tiempos estimados se utilizan para controlar y evaluar el progreso del proyecto.

2.2.5 Cálculo de la ruta crítica

La ruta crítica es la trayectoria con el tiempo más largo en la red de actividades; cualquier demora de una actividad en la ruta crítica retrasará la terminación de todo el proyecto (Render, 2012). Para calcular la ruta crítica de un proyecto, en esta sección se describirán los siguientes puntos:

- Definición y cálculo de los tiempos más próximos y más lejanos.
- Holgura en los cálculos de la ruta crítica.

2.2.5.1 Definición y cálculo de los tiempos más próximos y más lejanos

Los cálculos de ruta crítica implican dos pasos: el paso hacia adelante, que determina los tiempos más próximos de los eventos, y el paso hacia atrás, que calcula los tiempos más lejanos de ocurrencia. Se necesitan calcular los tiempos de inicio y terminación, más próximos y más lejanos, de cada actividad en la red para encontrar la ruta crítica. Krajewski, Ritzman y Malhotra (2008), definen éstos tiempos de la siguiente forma:

1. El tiempo de inicio más próximo (*ES*, por las siglas en inglés de *Earliest Start*) de una actividad es el tiempo de terminación más próximo (*EF*) de la actividad inmediatamente precedente. Cuando se trata de actividades que tienen más de una actividad precedente, el tiempo de inicio más próximo es el tiempo más lejano de los tiempos de terminación más próximos de las actividades precedentes.
2. El tiempo de terminación más próximo (*EF*, por las siglas en inglés de *Earliest Finish*) de una actividad es igual al tiempo de inicio más próximo más su duración estándar (*t*), como se muestra en la Ecuación 2.5. Para calcular la duración de todo el proyecto se determina el tiempo de terminación más próximo de la última actividad de la ruta crítica.

$$EF = ES + t \dots\dots\dots Ec. 2. 5$$

3. El tiempo de terminación más lejano (*LF*, por las siglas en inglés de *Latest Finish*), de una actividad es el tiempo de inicio más lejano (*LS*) de la actividad que sigue inmediatamente. Si las actividades tienen más de una actividad que las siga de forma inmediata, el tiempo de terminación más lejano será el más próximo de los tiempos de inicio más lejanos de esas actividades.
4. El tiempo de inicio más lejano (*LS*, por las siglas en inglés de *Latest Start*), de una actividad es igual al tiempo de terminación más lejano menos la duración estándar (*t*) de esa actividad, como se muestra en la Ecuación 2.6.

$$LS = LF - t \dots\dots\dots Ec. 2. 6$$

Los cuatro tiempos anteriores se representan usando una notación (Figura 2.13) en los nodos de una red de actividades (Figura 2.14); el nombre y la duración de la actividad (el tiempo estándar t) complementan la notación.

Utilizando la red de la Figura 2.14, el cálculo de los tiempos más próximos, de inicio y de terminación, se ejecuta de la siguiente manera:

1. El cálculo se empieza desde el inicio de la red, hasta el final de la misma.
2. La actividad A tiene un ES de 0 ya que su precedente "Inicio" tiene un tiempo de 0; el ES de la actividad actual siempre es el EF de la actividad precedente.
3. Para calcular el EF de la actividad A, se utiliza la Ecuación 2.5:

$$EF = ES + t = 0 + 4 = 4$$

4. Las acciones realizadas en los puntos 2 y 3 se ejecutan con todas las actividades en la red, de inicio a fin.

En el caso de actividades que presenten más de un precedente, el ES de la actividad actual toma el EF mayor entre éstas.

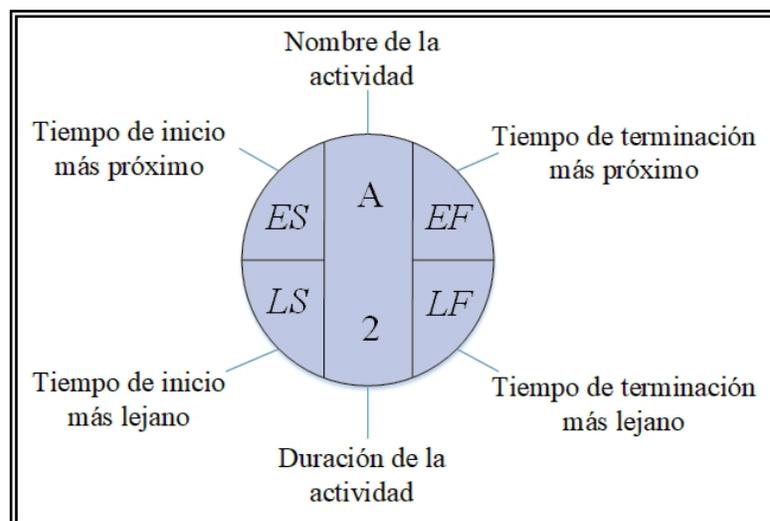


Figura 2. 13 Notación de los tiempos más próximos y más lejanos (Krajewski, Ritzman, & Malhotra, 2008).

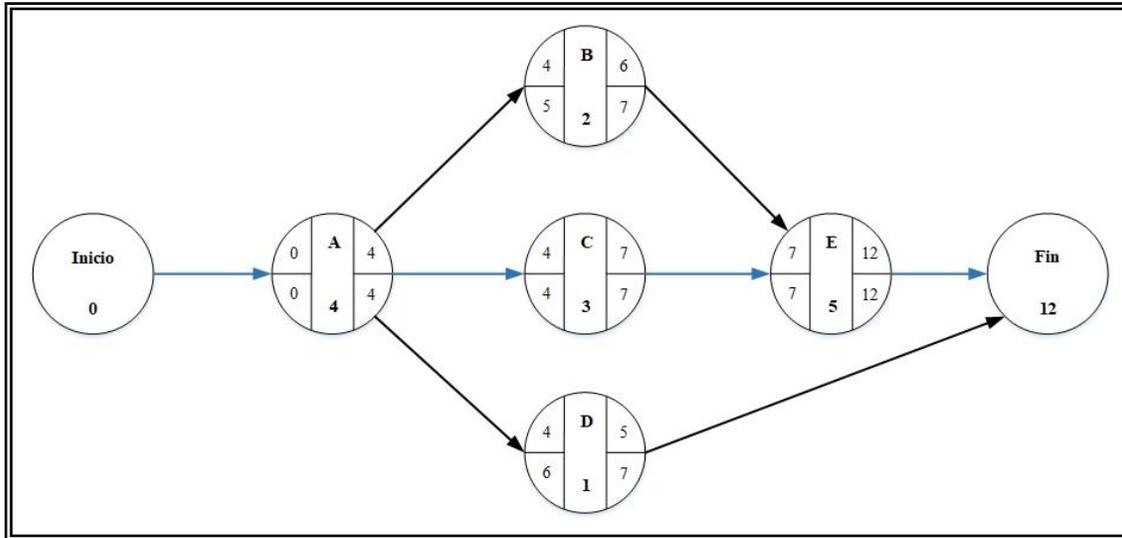


Figura 2. 14 Red de actividades con tiempos más próximos y más lejanos (Elaboración propia).

Para calcular los tiempos más lejanos de inicio y terminación en la red en la Figura 2.14, se realiza lo siguiente:

1. El cálculo se empieza desde el final de la red, hasta el inicio de la misma.
2. La actividad E tiene un *LF* de 12 ya que su actividad inmediata, o sucesora, es el nodo “*Fin*”. Si las actividades tienen más de una actividad que las siga de forma inmediata, el *LF* será el *LS* menor de esas actividades.
3. Para calcular el *LS* de la actividad E, se utiliza la Ecuación 2.6:

$$LS = LF - t = 12 - 5 = 7$$

4. Las acciones realizadas en los puntos 2 y 3 se ejecutan con todas las actividades en la red, de fin a inicio.

La Tabla 2.2 resume los resultados de los tiempos de inicio y terminación más próximos y más lejanos de las actividades que se mostraron en la Figura 2.14.

2.2.5.2 Holgura en los cálculos de la ruta crítica

Una vez que se realizan los cálculos de los tiempos de inicio y terminación más próximos y más lejanos, se encuentra la cantidad de tiempo de holgura que tiene cada actividad.

Tabla 2. 2 Resumen de los tiempos más próximos y más lejanos (Elaboración propia).

Actividad	ES	EF	LS	LF
A	0	4	0	4
B	4	6	5	7
C	4	7	4	7
D	4	5	11	12
E	7	12	7	12

De acuerdo con Montaña (1990), una holgura se define como:

“La libertad que tiene una actividad para alargar su tiempo de ejecución sin perjudicar otras actividades o el proyecto total.”

Matemáticamente, la holgura se define como:

$$H = LS - ES \dots\dots\dots Ec. 2. 7$$

También se puede definir como:

$$H = LF - EF \dots\dots\dots Ec. 2. 8$$

Utilizando la red de la Figura 2.14, en la Tabla 2.3 se resumen los tiempos calculados de las holguras de cada una de las actividades, aplicando la fórmula de la Ecuación 2.7. Se observa, por ejemplo, que la actividad B tiene una holgura de 1, lo que significa que se podría retrasar hasta 1 día (hora, semana, etc.) su ejecución sin ocasionar que el proyecto dure más de lo esperado. Por otro lado, las actividades A, C y E tienen un tiempo de holgura igual a cero, lo que indica que son parte de la ruta crítica (actividades críticas) y ninguna puede demorarse ya que atrasaría todo el proyecto. La ruta crítica se muestra, con color rojo, en la Figura 2.15. El tiempo total de terminación de la red es de 12.

Tabla 2. 3 Resumen del cálculo de holguras (Elaboración propia).

Actividad	ES	EF	LS	LF	Holgura
A	0	4	0	4	0
B	4	6	5	7	1
C	4	7	4	7	0
D	4	5	11	12	7
E	7	12	7	12	0

2.2.6 Probabilidad de terminación de un proyecto

El cálculo de la ruta crítica ayuda a determinar el tiempo estándar de terminación de un proyecto, sin embargo, existe una variación significativa en las estimaciones de los tiempos para diversas actividades. La variación en las actividades que están en la ruta crítica llega a afectar la terminación del proyecto completo y quizás retrasarlo.

Antill y Woodhead (1993) mencionan que la duración de un proyecto se determina sumando el tiempo estándar de las actividades a lo largo de la ruta crítica. *PERT* utiliza la varianza de las actividades de la ruta crítica para ayudar a determinar la varianza total del proyecto. Como las actividades de la ruta crítica son independientes unas de las otras, la varianza total del proyecto se calcula sumando las varianzas de las actividades críticas; esto se define en la Ecuación 2.9.

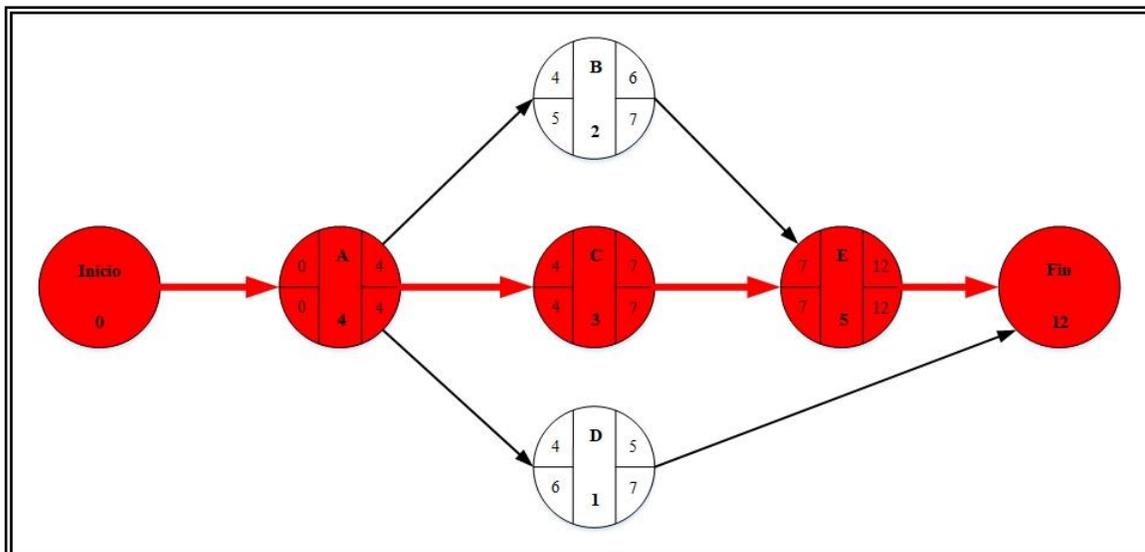


Figura 2. 15 Ruta crítica conformada por las actividades A, C y E (Elaboración propia).

$$V_T = \sum v_i \dots\dots\dots Ec. 2. 9$$

A partir de la Ecuación 2.9, la desviación estándar del proyecto se determina de manera muy fácil obteniendo la suma de las varianzas de las actividades de la ruta crítica.

Si existe más de una ruta crítica, la varianza total del proyecto se toma como la máxima de las sumadas a lo largo de diferentes rutas críticas independientes. A partir de eso, es evidente que la varianza del tiempo estándar de cualquier proyecto es la suma de las varianzas de las actividades a lo largo de la ruta crítica

Una vez determinado el tiempo estándar del proyecto y la desviación estándar es posible calcular, a partir de la teoría de las probabilidades, qué probabilidad hay de encontrar un tiempo programado para un proyecto específico (T_P). Para esto, se considera que el tiempo de terminación de un proyecto tiene una distribución normal de probabilidades con un valor medio T_X y desviación estándar σ_{T_x} a partir de la serie de curvas de distribución beta de las actividades individuales.

De esta manera, para calcular las probabilidades de satisfacer el tiempo T_P , es necesario tabular una curva de distribución normal centrada en el tiempo T_X . Con la curva de distribución normal, las probabilidades de satisfacer el tiempo programado T_P se obtienen determinando el porcentaje de área que comprende este tiempo del área total bajo las curvas de distribución normal.

En lugar de trazar cada vez una curva de distribución normal, se utilizan las tablas estándar de probabilidad. Para emplear las tablas de probabilidad se aplica la ecuación normal estándar, como se muestra en la Ecuación 2.10.

$$Z = \frac{T_P - T_X}{\sigma_{T_x}} \dots\dots\dots Ec. 2. 10$$

De la Ecuación 2.10, Z es el número de desviaciones estándar a las que el tiempo programado del proyecto se separa de la media o valor medio (T_X).

2.3 Estructura de descomposición del trabajo (WBS)

El desglose de un proyecto en actividades es una forma de organizar un proyecto, en módulos, para su realización, gestión y planificación. Una herramienta muy utilizada para el desglose de proyectos es la Estructura de Descomposición del Trabajo (WBS, por las siglas en inglés de *Work Breakdown Structure*) la cual, como su nombre lo indica, es una estructura jerárquica y descendente formada por actividades secundarias que se irán dividiendo en actividades más específicas.

2.3.1 Definición de la WBS

Krajewski, Ritzman y Malhotra (2008) mencionan que la WBS es una declaración de todo el trabajo que tiene que realizarse en un proyecto. Tovar (2001), por su parte, define a la WBS como:

“Una estructura que identifica el trabajo o la red de actividades para asegurar que todo el proyecto sea reconocido y viable de acuerdo al plan de trabajo”.

La WBS para un proyecto es un esquema del trabajo, no es el trabajo en sí. En general, la WBS es una herramienta para la gestión y planificación de proyectos cuyo propósito es documentar el alcance del mismo, de manera jerárquica, lo que permite una fácil identificación de las actividades o trabajos.

2.3.2 Antecedentes de la WBS

La WBS no es un nuevo concepto en la gestión de proyectos. En el año de 1961, un ejemplo de WBS fue incluido en un artículo publicado dentro de la empresa *General Electric* que explicó la importancia de una WBS en el desarrollo de un sistema de control de gestión eficaz (Haugan, 2013).

Conceptos como WBS y PERT se difundieron rápidamente una vez que se reconoció su eficacia en el programa Polaris y otras disciplinas. En Estados Unidos, el Departamento de Defensa ha sido el mayor usuario de la WBS desde que ésta se conceptualizó, el cual ha desarrollado un

modelo para el uso de la *WBS* y así garantizar la uniformidad en ciertos tipos de proyectos; éste modelo es dirigido en *The Standard Practice Work Breakdown Structures for Defense Material Items*, el cual data de 1968 y está basado en esfuerzos cooperativos de los servicios militares con la ayuda de asociaciones industriales.

2.3.3 Niveles y representación de la *WBS*

La *WBS* está compuesta por diferentes niveles de desglose, es decir, dependiendo de la complejidad del proyecto puede alcanzar un segundo, tercer o más niveles de subdivisión de las actividades. Si la *WBS* se subdivide a un nivel bajo de desglose, puede resultar en un control de las actividades extremadamente detallado (se requeriría un sistema por computadora para la captura y control de las actividades) y si la *WBS* se subdivide a un nivel alto de desglose, puede ocasionar que el control de las actividades sea demasiado general, lo que ocasionaría que se pierda el enfoque organizacional de esta herramienta. Las divisiones del trabajo, en diferentes niveles, dependerán de los siguientes factores (Ariza, 2008):

- La complejidad del trabajo. Es favorable subdividir las actividades hasta un nivel de detalle que identifique la secuencia y relaciones de precedencia entre las actividades que componen un flujo lógico de ejecución.
- El equipo de trabajo asociado al proyecto. Es conveniente agrupar las actividades en un paquete de trabajo, si se requiere obtener una salida o producto con un costo específico.
- La criticidad de una actividad. En la medida en que una actividad sea crítica para el proyecto debería ser una actividad definida, en términos de un paquete de trabajo.

De acuerdo con Onofre (2000), se pueden representar los diferentes niveles de desglose de la *WBS*, de las siguientes dos formas:

1. Por representación gráfica. La Figura 2.16 muestra un ejemplo de *WBS* gráfica (en forma de árbol u organigrama) para la puesta en marcha de una nueva empresa. Las actividades del nivel 1 son los principales componentes del trabajo que pueden dividirse en actividades más pequeñas, por ejemplo, la actividad “*Proceder con el plan de puesta en*

marcha” puede dividirse en tres actividades en el nivel 2, y la actividad “*Establecer la estructura de negocios*” puede subdividirse en cinco actividades en el nivel 3.

2. Por lista de actividades. La Tabla 2.4 muestra una *WBS* por lista de actividades, tomando como ejemplo un proyecto de contabilidad. En la tabla se observa el uso de un código jerárquico en cada actividad, es decir, números de esquema que se pueden aplicar a las actividades para que coincidan con las necesidades específicas de un proyecto. Una actividad del nivel alto puede tener códigos como 1, 2 o 3, y las actividades de nivel bajo pueden tener códigos como 1.1, 1.2 o 1.3.

De acuerdo con *Smartsheet* (2017), otra forma de representar una *WBS* es por medio de una tabla (Tabla 2.5). Este tipo de representación se utiliza para introducir los datos de la *WBS* en paquetes de *software* de gestión de proyectos o para ahorrar espacio en documentos. La *WBS* se conforma por las siguientes cuatro columnas:

1. Nombre del proyecto. Se escribe, en la primera columna, el nombre del proyecto.

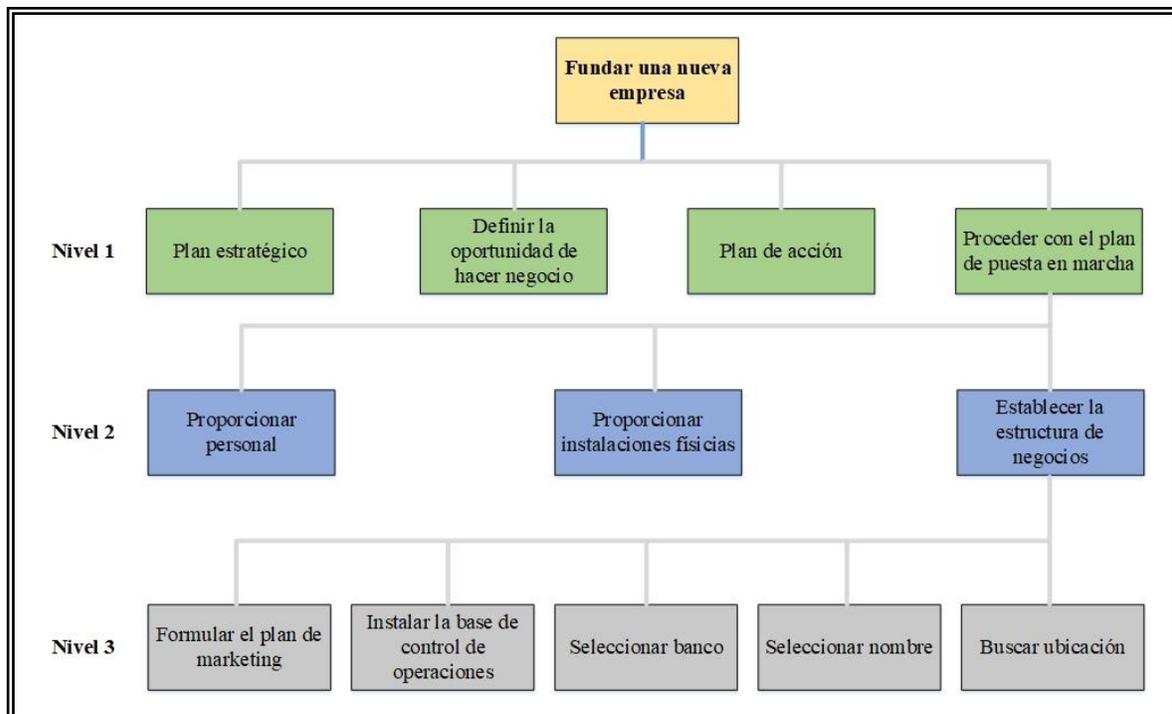


Figura 2. 16 Ejemplo de *WBS* para la puesta en marcha de una empresa (Krajewski, Ritzman, & Malhotra, 2008).

Tabla 2. 4 WBS para un proyecto de contabilidad (Onofre, 2000)

Proyecto de contabilidad
1. Especificar necesidades. 1.1 Estudiar sistema actual. 1.2 Añadir nuevas características.
2. Analizar contabilidad 2.1 Estudiar procesos. 2.2 Estudiar datos.
3. Diseñar aplicación 3.1 Diseño B.D. 3.2 Diseño programas.
4. Codificación 4.1 Construcción del esquema. 4.2 Codificación de los programas.
5. Pruebas 5.1 Prueba de unidades. 5.2 Prueba del sistema.

Tabla 2. 5 WBS por medio de una tabla (Smartsheet, 2017).

Nombre del proyecto	Tarea 1	Subtarea 1.1	Paquete de tareas 1.1.1
			Paquete de tareas 1.1.2
		Subtarea 1.2	Paquete de tareas 1.2.1
		Paquete de tareas 1.2.2	
	Tarea 2	Subtarea 2.1	Paquete de tareas 2.1.1
			Paquete de tareas 2.1.2

2. Tarea. En la segunda columna, se escriben los nombres de las tareas principales del proyecto.
3. Subtarea. Se escriben, en la tercera columna, las subtareas de las tareas principales.
4. Paquete de tareas. En la última columna, se escriben un grupo de actividades combinadas, para asignarse a una sola unidad organizacional.

2.3.4 Consideraciones en la WBS

Después de que es establecida la WBS, ésta debe ser mantenida y actualizada para reflejar los cambios en el proyecto. La configuración y contenido de la WBS varía de proyecto a proyecto, los cuales dependen de las siguientes consideraciones (Haugan, 2013):

- Tamaño y complejidad del proyecto.
- Cultura de la empresa.
- Estructura de las organizaciones involucradas.
- Fase del proyecto.
- Estructura física de los artículos entregables.
- Juicio del administrador del proyecto para asignaciones de trabajo de subcontratistas.
- Grado de incertidumbre y riesgo involucrados.
- Tiempo disponible para la planeación.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores se puede afirmar que la *WBS* puede usarse en su totalidad o en parte para hacer asignaciones de trabajo, ser base para esquemas de organización de datos, explicar el alcance y naturaleza de un proyecto, entre otros.

Utilizar la *WBS* facilita la explicación de muchos aspectos del proyecto y ayuda a las personas quienes son recién asignadas a un proyecto, entendiendo la mayoría de los elementos presentes en ella.

2.3.5 Beneficios de la *WBS*

Los beneficios que aportan el implementar una *WBS* en un proyecto son los siguientes (Tovar, 2001):

- Permite estructurar la planeación y asignación de los responsables técnicos y de administración.
- Apoya al monitoreo de los esfuerzos y control de los proyectos.
- Asegura que todos los subcontratistas estén incluidos en el proyecto.
- Provee la base de comunicación en el proceso de adquisición de los materiales y equipos, siendo enlace con la planeación y programación.
- Genera archivos históricos para futuros proyectos similares. No siempre la *WBS* propuesta resulta ser la mejor, la mejora continua es parte del desarrollo organizacional.

2.4 Simulación de Monte Carlo

En un proceso existen muchas variables que son de naturaleza probabilística y que se pueden simular; ejemplos de estas variables son las siguientes (Render, 2012):

- La demanda de un inventario diario.
- El tiempo de entrega para las órdenes del inventario.
- Los tiempos entre descomposturas de máquinas.
- El tiempo entre llegadas a las instalaciones de servicio.
- Los tiempos de servicio.
- *Los tiempos de terminación de las actividades de un proyecto*¹⁰.
- El número de empleados ausentes en el trabajo cada día.

Algunas de las variables anteriores, como la demanda diaria y el número de empleados, son discretas y deben tener valores enteros (0, 1, 2, etc.). Otras variables, como las relacionadas con el tiempo, son continuas y no necesitan que sean enteras porque pueden tomar cualquier valor.

Con base en lo anterior, se asume que la simulación de Monte Carlo se emplea con variables de índole probabilístico: discretas o continuas. En el caso del presente trabajo la simulación de Monte Carlo se utilizará para estimar la probabilidad del tiempo de terminación de un proyecto.

2.4.1 Definición de simulación de Monte Carlo

En la gestión de proyectos, Azofeifa (2002) define la simulación de Monte Carlo como:

“Una técnica efectiva usada para analizar la ruta crítica de un proyecto, la cuál se usará para estimar la probabilidad de terminar a tiempo un proyecto”.

¹⁰ El objetivo del presente trabajo es reducir el tiempo de las actividades de mantenimiento de un tándem de molinos en un ingenio azucarero.

Para planificar, programar y controlar un gran número de actividades de un proyecto el administrador utiliza *CPM* y *PERT*. Cuando se tiene la necesidad de calcular la probabilidad de terminar a tiempo un proyecto, una manera de obtener buenos resultados es aplicar la simulación de Monte Carlo a la ruta crítica del proyecto la cual resulta necesaria por la alta incertidumbre mostrada en las estimaciones de tiempos de las diferentes actividades del proyecto (Azofeifa, 2002).

Como se observó en la Sección 2.2.6, *PERT* calcula la probabilidad de terminación de un proyecto, sin embargo, *PERT* no proporciona información sobre el error al calcular esta probabilidad y tiende a subestimar la duración del proyecto, por lo cual, la simulación de Monte Carlo se usa para mejorar la aproximación de *PERT*.

2.4.2 Antecedentes

El método de Monte Carlo debe su nombre a la ciudad de Monte Carlo, en Mónaco, donde se juega la ruleta, el juego de azar que genera números aleatorios. Este método surge formalmente en el año 1944; sin embargo, ya existían prototipos y procesos anteriores que se basaban en los mismos principios.

El uso del método de Monte Carlo, como herramienta de investigación, proviene del trabajo realizado en el desarrollo de la bomba atómica durante la Segunda Guerra Mundial en el Laboratorio Nacional de Los Álamos en Estados Unidos. La creación del método de Monte Carlo se liga a los nombres de los matemáticos norteamericanos John von Neumann y Stanislaw Ulam quienes realizaban pruebas para rastrear la generación isótopa de neutrones en el contexto de los estudios para la confección de la bomba atómica (Nielsen, 2016).

2.4.3 Tipos de *software* para la simulación de Monte Carlo

Existen diferentes tipos de *software* que permiten ejecutar la simulación de Monte Carlo y mejorar el cálculo de la probabilidad de terminación de un proyecto hecha por *PERT*; estos tipos de *software* son los siguientes:

- *Excel*. Las hojas de cálculo de *Excel* han adquirido mucha importancia para el cálculo de la simulación de Monte Carlo. La importancia de *Excel* reside en su universalidad, en su facilidad de uso, en su capacidad para calcular valores y, sobre todo, en las posibilidades que ofrece con respecto al análisis de escenarios (qué pasa si). Las últimas versiones de *Excel* incorporan un lenguaje de programación (*Visual Basic for Applications*) con el cual es posible crear auténticas aplicaciones de simulación destinadas al usuario final (Faulin & Juan, 2005).
- *Crystal Ball*. Es un conjunto de aplicaciones basadas en *Excel* que permiten predecir posibles resultados o realizar escenarios complejos de "qué pasa si"; además, permite tomar mejores decisiones basándose en una sólida comprensión de las variables que tendrán el mayor impacto en un proyecto. Los beneficios de utilizar *Crystal Ball* son los siguientes (Oracle, 2008):
 - Aumentar los ingresos. Optimiza la capacidad de reacción ante interrupciones del mercado y eventos aleatorios.
 - Disminuir costos. Genera gráficos de sensibilidad que identifican qué variables tienen el mayor impacto en sus costos.
 - Mejorar la productividad. Ahorra tiempo utilizando simulaciones para modelar y visualizar miles de escenarios de "qué pasa si".
 - Mejorar la calidad. Mediante el uso de resultados de simulación y métricas de capacidad, se determinan especificaciones óptimas de productos y tolerancias de defectos.
- *RiskAMP*. Es una aplicación de simulación de Monte Carlo para *Excel* que agrega análisis de riesgos a modelos en las hojas de cálculo de manera rápida y fácil. Algunas características que posee esta aplicación son las siguientes (RiskAmp, 2017):
 - La distribución *PERT* para el modelado de costos y proyectos.
 - Un asistente fácil de usar para crear tablas y gráficos.
 - Más de 40 distribuciones aleatorias.
 - 20 funciones de análisis estadístico.
 - Integración completa de *Visual Basic for Applications*.
- *@RISK*. Es una aplicación que realiza análisis de riesgos utilizando la simulación de Monte Carlo para mostrar múltiples resultados posibles en un modelo de hoja de cálculo.

Controla, matemáticamente, gran número de escenarios futuros posibles e indica las probabilidades y riesgos asociados a cada uno de ellos, es decir, se puede decidir qué riesgos se desean tomar y cuáles prefieren evitarse tomando la mejor decisión en situaciones de incertidumbre. Algunas características que posee esta aplicación son las siguientes (Palisade, 2017):

- Realiza todos los cálculos para la simulación en *Excel*.
- Posee más de 50 funciones de distribución de probabilidad incorporadas.
- Puede integrarse con *Project*.
- Posee análisis de sensibilidad y de escenarios.

2.5 Software para administración de proyectos *Project*

Project es una poderosa herramienta de administración de proyectos que ayuda a planificar y administrar un amplio rango de proyectos; se puede ser más productivo y obtener mejores resultados usando el grupo de características que ofrece este *software*.

Con *Project* se pueden realizar las siguientes actividades (Chatfield & Johnson, 2013):

- Crear planes con el nivel de detalle que es correcto para un proyecto.
- Controlar qué tareas pueden programarse automáticamente o cuales se programarán manualmente.
- Administrar tareas, costos, trabajo y recursos en cualquier nivel de detalle que sea apropiado a las necesidades de un proyecto.
- Trabajar con información de planificación en una variedad de vistas y reportes.
- Administrar la planificación a lo largo de la vida de un proyecto.
- Colaborar y compartir información con el personal de una organización usando diferentes opciones de formatos.

Básicamente, es una herramienta de trabajo para administradores o jefes de proyectos utilizada para planificar y controlar el desarrollo de un proyecto, con el fin de evitar retrasos en el mismo.

2.5.1 Herramientas de *Project*

Existen muchos tipos de herramientas en *Project*, de forma que la planificación y administración de los datos sea más fácil. Entre las herramientas más relevantes se describen las siguientes (OBS, 2016):

- Ruta crítica. Esta herramienta permite analizar las tareas y la secuencia en que deben realizarse, para reconocer cuáles son esenciales y las relaciones de dependencia entre ellas. Además, sirve para estimar la duración total del proyecto, para determinar el tiempo más corto posible de realización y para prever recursos adicionales necesarios.
- Control de proyecto. Una vez que se dispone de una ruta crítica y la planificación para el proyecto, esta información se puede guardar como línea de base, es decir, como referencia de la programación inicial que servirá para compararla con la ejecución final y así controlar en qué medida y en qué puntos se ha modificado el proyecto.
- Diagrama de *Gantt*. El diagrama de *Gantt* se crea automáticamente con los datos del proyecto. Como en cualquier gráfica de esta clase, el eje de abscisas representa el tiempo, mientras que el eje de ordenadas muestra las actividades. Las barras horizontales en el diagrama marcan el desarrollo de las tareas en el tiempo, su duración y su secuencia. Se diferencian por colores las actividades críticas de las que no lo son, y también aquellas que incluyen tareas de menor rango.
- Sobrecarga de recursos. El programa controla la cantidad de recursos asignados a cada persona y señala si, en algún caso, éstos son excesivos. De una adecuada distribución de los recursos depende también la correcta consecución de las tareas en los plazos previstos.
- Cálculo de costos. Calcula los costes de los recursos y la mano de obra, una vez que han sido distribuidos por tareas. El sistema genera varios tipos de informes, relacionados con los gastos y con los materiales necesarios.
- Resumen de proyecto. Muestra la información clave del proyecto, como las fechas de comienzo y fin, duración, horas totales de trabajo, costes, estado de las tareas, recursos necesarios, etcétera.

2.5.2 Interfaz de *Project*

Como se muestra en la Figura 2.17, la interfaz de *Project* se conforma de los siguientes elementos:

- Las pestañas de la cinta reemplazan los menús desplegables y las barras de herramientas con las que comúnmente se está familiarizado en una interfaz.
- Las barras de herramientas contienen los comandos que se utilizan para realizar acciones en *Project*.
- La hoja de *Project* se utiliza para ingresar, editar y ver información sobre el proyecto.
- El área de diagrama refleja gráficamente la información de las actividades tan pronto como se vayan agregando en la hoja de *Project*.
- La escala de tiempo ayuda a interpretar el tiempo de cada actividad en incrementos de tiempo grandes o pequeños.

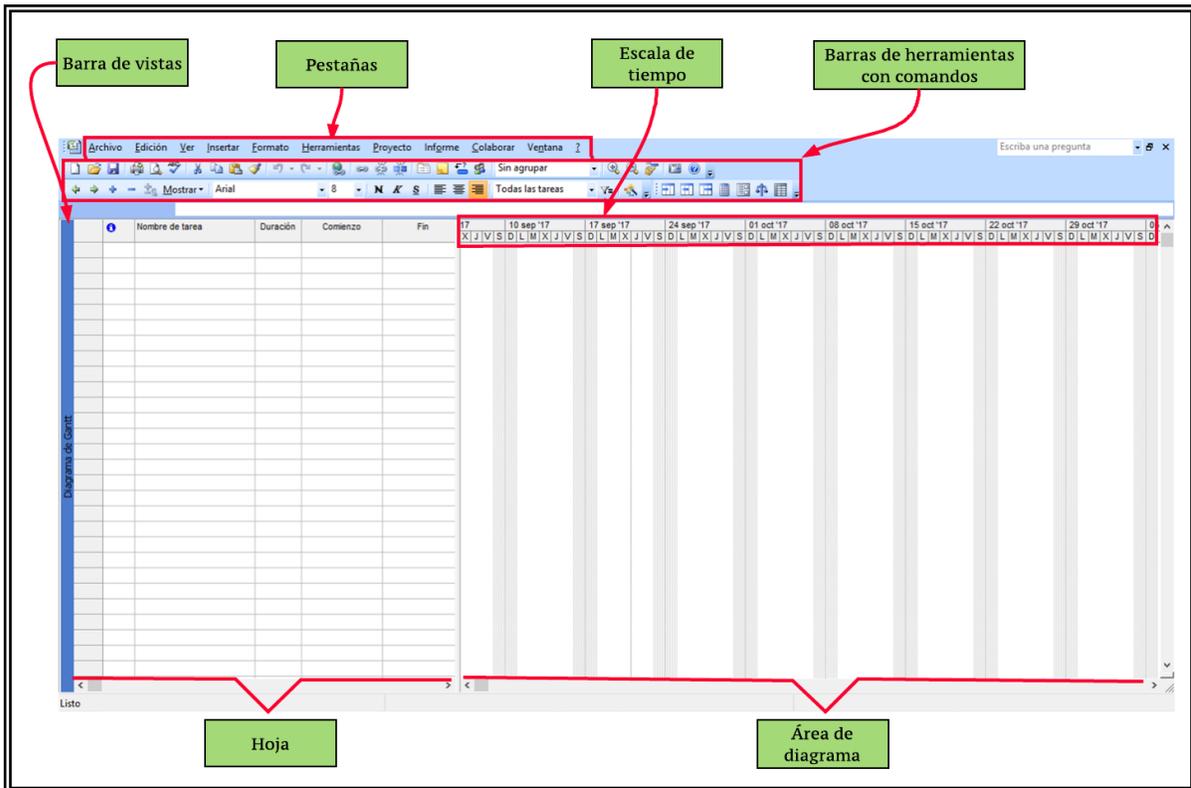


Figura 2. 17 Elementos de la interfaz de *Project* (Chatfield & Johnson, 2013).

- Los comandos son características específicas que se utilizan para realizar acciones en *Project*.
- La barra de vista aparece en la ventana principal de *Project*; éste puede mostrar una sola vista o varias vistas en paneles separados.

2.5.3 Terminología de *Project*

Cada *software* de administración de proyectos utiliza diferente terminología para ejecutar proyectos; a continuación, se presentan los siguientes términos utilizados por *Project* (Chatfield & Johnson, 2013):

- Tarea. Es el elemento más básico en la planificación de cualquier proyecto y representan el trabajo a realizar para lograr las metas del mismo. En *Project* hay varios tipos de tareas; estas son las siguientes:
 - La tarea de resumen es aquella que compone y resume una tarea principal, que se ubica por encima de ella; las fases de trabajo de una planificación están representadas por tareas de resumen.
 - Las subtareas se ubican por debajo de una tarea de resumen. El resumen y las subtareas forman la estructura general de un proyecto.
 - Los hitos son eventos significativos que se alcanza dentro del proyecto o se impone al mismo. En *Project*, los hitos normalmente se representan como tareas con duración cero.
 - Las tareas críticas indican si poseen un margen de retraso en la programación o si una tarea está en la ruta crítica.

En términos generales, lo que se denomina tarea en *Project* a veces se denominan actividad o paquete de trabajo.

- Modo de tarea. Indica si una tarea está programada de las siguientes dos formas:
 - La forma manual, que no establece una fecha de comienzo o fin de manera automática.
 - La forma automática que dinámicamente ajusta las fechas de comienzo o fin de una tarea, para contabilizar cambios de programación en un proyecto.

De forma predeterminada, *Project* programa las tareas manualmente, sin embargo, se pueden cambiar para programarlas automáticamente.

- **Recurso de trabajo.** Son las personas y equipos que hacen el trabajo del proyecto. *Project* se enfoca en los siguientes dos aspectos de los recursos de trabajo:
 - La disponibilidad determina cuándo un recurso específico puede trabajar en tareas y cuánto trabajo pueden desempeñar esos recursos.
 - Los costos se refieren al costo de financiación incurrido por el desempeño del trabajo de los recursos en el proyecto.
- **Vista.** Es una representación visual, o espacio de trabajo, de las tareas o recursos del proyecto; permite organizar y examinar información en una variedad de formatos. *Project* tiene una vista por *default*, que se observa cuando se crea un proyecto nuevo, llamada diagrama de *Gantt* con una vista de la escala de tiempo; sin embargo, incluye muchos tipos de vistas, algunos ejemplos de ellas incluyen tablas con gráficas, tablas con escalas de tiempo, diagramas, hojas, formas, etcétera. Las vistas se pueden personalizar de acuerdo con los requerimientos del proyecto.
- **Escala temporal.** Aparece en una vista, por ejemplo, el diagrama de *Gantt*, como una banda que cruza la parte superior de una red e indica unidades de tiempo. Se puede ajustar la escala temporal de diferentes formas para cambiar qué tanto de tu proyecto puede ser visible.
- **Duración.** Representa la cantidad de tiempo que se llevará completar la tarea. El proyecto puede trabajar con duraciones de tareas que van desde minutos a meses; dependiendo del alcance del proyecto, probablemente se trabaja con una escala de horas, días y semanas. En *Project* se pueden asignar tres tipos de duraciones para las tareas:
 - La duración hábil o normal es la cantidad de tiempo de trabajo desde el comienzo hasta el fin de una tarea, según esté definido en el calendario del proyecto.
 - La duración transcurrida es la cantidad de tiempo que necesitará una tarea para ser completada, tomando como base un día de 24 horas y una semana de 7 días, incluyendo días festivos y días no laborables.
 - La duración estimada es una duración para la cual no se tiene suficiente información para marcar una duración tentativa, no un valor final.

Dar valores de duración a las tareas es uno de los beneficios de usar una herramienta de programación como *Project* sobre una simple lista de comprobación o un enfoque de tareas para organizar el trabajo.

- Comienzo. Es la fecha en que un recurso asignado está programado para comenzar a trabajar en una tarea.
- Fin. Es la fecha en que un recurso está programado para completar el trabajo en todas las tareas asignadas.

2.6 Prueba de hipótesis

Hipótesis es una afirmación (suposición o conjetura) que se hace, en este caso, sobre la distribución o el valor de un parámetro de una o más poblaciones, la cual se busca evaluar en base a la información obtenida de una muestra aleatoria de la(s) población(es) bajo estudio (Arrijoja & Hernández, 2015). Se le llama hipótesis porque no se sabe si es verdadera o no. De acuerdo con Maneiro y Mejías (2010), la prueba de hipótesis se define como:

“El procedimiento que lleva a una decisión acerca de una hipótesis particular”.

Las pruebas de hipótesis han constituido una herramienta básica en la investigación experimental. El procedimiento formal para realizar pruebas de hipótesis se asemeja en muchos aspectos al método científico, dado que el investigador observa la naturaleza, formula una teoría y confronta con lo observado.

2.6.1 Clasificación de la prueba de hipótesis

La prueba de hipótesis puede clasificarse en las siguientes dos partes (Arrijoja & Hernández, 2015):

- Métodos clásicos (paramétricos). Suponen normalidad en la población y requieren estimar parámetros; éstos pueden ser clasificados como se muestra a continuación:
 - Métodos de una población. Dentro de los métodos de una población existen las siguientes pruebas:

- Para μ con varianza conocida.
- Para μ con varianza desconocida.
- Para σ^2 de una población normal.
- Para π de una población binomial.
- Métodos de dos poblaciones. Dentro de los métodos de dos poblaciones existen las siguientes pruebas:
 - Para $\mu_1 - \mu_2$ con varianza conocida.
 - Para $\mu_1 - \mu_2$ con varianza desconocida.
 - Para σ_1^2/σ_2^2 de poblaciones normales.
 - Para $\pi_1 - \pi_2$ de poblaciones binomiales.
- Métodos de más de dos poblaciones. En este método se utiliza el análisis de varianza (ANDEVA).
- Otras pruebas paramétricas y no paramétricas. No necesitan suponer normalidad en la población y no necesariamente requieren estimar parámetros; éstas pueden ser clasificadas como se muestra a continuación:
 - Pruebas de distribución libre. Dentro de estas pruebas se encuentran las siguientes:
 - Prueba de bondad de ajuste.
 - Tablas de contingencia.
 - Pruebas no paramétricas. Algunas pruebas que son no paramétricas son las siguientes:
 - Prueba de Kolmogorov-Smirnov.
 - Prueba de Wilcoxon para muestras independientes.
 - Prueba de los signos.
 - Prueba del orden de los signos.

2.6.2 Elementos de una prueba de hipótesis

Las estructuras de las pruebas de hipótesis son idénticas y están formadas por los mismos elementos esenciales; a continuación, se describen estos elementos (Maneiro & Mejías, 2010):

- Hipótesis nula (H_0). Es la afirmación que se supone al principio como cierta; puede interpretarse como aquella que normalmente sería aceptada mientras los datos no indiquen otra cosa. En general, a esta hipótesis se le considera de investigación o establecida.
- Hipótesis alternativa (H_1). Se expresa matemáticamente en sentido contrario a la hipótesis nula. Cuando los datos se muestran favorables a la hipótesis alternativa, se rechaza la hipótesis nula.
- Estadístico de prueba. Se escoge de acuerdo con el parámetro que se investiga y el estimador correspondiente a dicho parámetro. En general, es un valor calculado a partir de datos muestrales, que se utiliza para determinar si existe evidencia significativa en contra de la hipótesis nula. La Tabla 2.6 muestra los estadísticos de prueba más comunes en las pruebas de hipótesis.
- Región crítica o región de rechazo. Especifica los valores del estadístico de prueba para los cuales H_0 se rechaza a favor de H_1 . Si el valor calculado del estadístico de prueba cae en la región crítica, se rechaza H_0 . En caso contrario, no se tendría suficiente evidencia estadística para rechazar H_0 (Figura 2.18).

Tabla 2. 6 Estadísticos de prueba comunes en pruebas de hipótesis
(Elaboración propia).

Prueba de hipótesis	Estadístico de prueba	Fórmula
Media (varianza conocida)	Z	$Z = \frac{\bar{X} - \mu_0}{\sigma / \sqrt{n}}$
Media (varianza desconocida)	t	$t = \frac{\bar{X} - \mu_0}{S / \sqrt{n}}$
Varianza poblacional	χ^2	$\chi^2 = \frac{(n - 1)S^2}{\sigma^2}$
Proporción	Z	$Z = \frac{p - p_0}{\sqrt{\frac{p(1 - p)}{n}}}$
Varianza (dos poblaciones) o ANDEVA de un factor	F	$F = \frac{S_1^2}{S_2^2}$

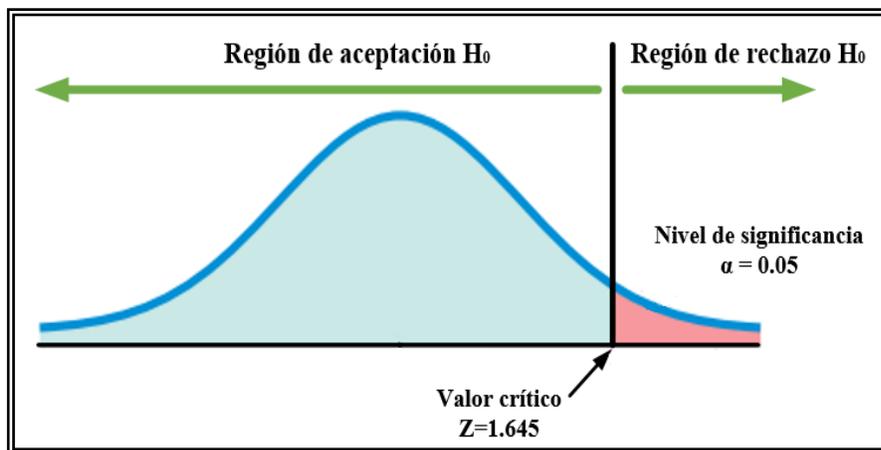


Figura 2. 18 Región de rechazo, nivel de significancia y valor crítico (Elaboración propia).

- Nivel de significancia (α). Es la probabilidad de que el estadístico de prueba caiga en la región crítica, cuando H_0 es verdadero. Si el estadístico de prueba cae en la región crítica, se rechazará H_0 (Figura 2.18).
- Valor crítico. El valor que delimita la región de rechazo de la región de aceptación (Figura 2.18).

2.6.3 Errores en la prueba de hipótesis

En cualquier región crítica, o de rechazo, se pueden cometer dos tipos de errores al tomar una decisión (Levin & Rubin, 2004):

- Los errores de tipo I se presentan al momento de rechazar una hipótesis nula cuando es cierta y su probabilidad se simboliza con α (Sección 2.6.2).
- Los errores de tipo II se presentan al momento de aceptar una hipótesis nula cuando es falsa y su probabilidad se simboliza con β (beta).

Al probar cualquier hipótesis estadística, hay cuatro situaciones posibles que determinan si la decisión tomada es correcta o errónea. Estas cuatro situaciones se resumen en la Tabla 2.7.

Tabla 2. 7 Situaciones posibles al realizar una prueba de hipótesis (Walpole *et al*, 2012)

	H ₀ es verdadera	H ₀ es falsa
No rechazar H ₀	Decisión correcta	Error tipo II
Rechazar H ₀	Error tipo I	Decisión correcta

La probabilidad de cometer un tipo de error puede reducirse sólo si estamos dispuestos a aumentar la probabilidad de cometer el otro tipo de error; es decir, si se tiene una región de aceptación muy pequeña, rara vez se aceptará una hipótesis nula cuando es falsa, pero como consecuencia, frecuentemente se rechazará una hipótesis nula cuando sea cierta. Por fortuna, la probabilidad de cometer ambos tipos de errores se puede reducir aumentando el tamaño de la muestra (Walpole *et al*, 2012).

2.6.4 Prueba de hipótesis para la comparación de medias con varianzas desconocidas pero iguales

La prueba de hipótesis para la comparación de medias con varianzas desconocidas consiste en probar la igualdad de las medias de dos distribuciones en donde la varianza se desconoce. Si los tamaños muestrales n_1 y n_2 no exceden de 30, se dice que es una prueba para la comparación de medias de muestras pequeñas y se emplea la denominada prueba t (Montgomery & Runger, 2014).

Siendo $X_{11}, X_{12}, \dots, X_{1n_1}$ una muestra aleatoria de n_1 observaciones tomadas de una población, y $X_{21}, X_{22}, \dots, X_{2n_2}$ una muestra aleatoria de n_2 observaciones tomadas de una segunda población, se obtienen las medias (\bar{X}_1 y \bar{X}_2) y varianzas muestrales (S_1^2 y S_2^2) de ambas muestras. Considerando que la varianza muestral es un estimador de la varianza común σ^2 , se deben combinar las dos varianzas muestrales para formar un solo estimador: S_p^2 , el cual se obtiene a través de la Ecuación 2.11 (Montgomery & Runger, 2014).

$$S_p^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{(n_1 + n_2 - 2)} \dots\dots\dots Ec. 2. 11$$

Donde:

S_p^2 = Estimador agrupado de las varianzas muestrales.

S_1^2 = Varianza de la muestra número uno.

S_2^2 = Varianza de la muestra número dos.

n_1 = Número de observaciones de la muestra uno.

n_2 = Número de observaciones de la muestra dos.

Después de obtener el estimador agrupado S_p^2 , se calcula el estadístico de prueba t con la Ecuación 2.12, con la finalidad de probar la hipótesis nula $H_0: \mu_1 = \mu_2$.

$$t = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \dots\dots\dots Ec. 2. 12$$

Donde:

t = Estimador de prueba t .

S_p = Estimador agrupado de las desviaciones estándar muestrales.

\bar{X}_1 = Media de la muestra número uno.

\bar{X}_2 = Media de la muestra número dos.

n_1 = Número de observaciones de la muestra uno.

n_2 = Número de observaciones de la muestra dos.

Una vez obtenido el estadístico de prueba se procede a calcular la zona o región de rechazo comparando ésta y el estadístico de prueba t , por ejemplo:

- Si se desea probar $H_1: \mu_1 > \mu_2$ la región de rechazo se determina a través de la Ecuación 2.13.

$$t > t_{\alpha, n_1+n_2-2} \dots\dots\dots Ec. 2. 13$$

- Si se desea probar $H_1: \mu_1 < \mu_2$ la región de rechazo se determina a través de la Ecuación 2.14.

$$t < -t_{\alpha, n_1+n_2-2} \dots \dots \dots Ec. 2. 14$$

- Si se desea probar $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$ la región de rechazo se determina a través de la Ecuación 2.15.

$$-t_{\frac{\alpha}{2}, n_1+n_2-2} > t > t_{\alpha/2, n_1+n_2-2} \dots \dots \dots Ec. 2. 15$$

Donde:

t = Estimador de prueba t .

α = Nivel de significancia.

$n_1 + n_2 - 2$ = Grados de libertad.

n_1 = Número de observaciones de la muestra uno.

n_2 = Número de observaciones de la muestra dos.

2.7 Conclusión

Este capítulo describió el marco teórico de las técnicas de ingeniería industrial para lograr el objetivo del presente trabajo. La información descrita en el Capítulo 2 permitió comprender la importancia de la jerarquización y visualización de actividades por medio de la Estructura de Descomposición de Trabajo (*WBS*), obtener una visión clara de las fases de la Ruta Crítica (*CPM*): planificación del proyecto y programación del proyecto; comprender las características de la Técnica de Evaluación y Revisión de Proyectos (*PERT*) para la estimación de tiempos, en situaciones de incertidumbre; comprender la importancia del uso de *software Project* para ejecutar la simulación de Monte Carlo, de manera fácil y rápida, y conocer las características para desarrollar una prueba de hipótesis para la evaluación de resultados.

Capítulo 3

Reducción del tiempo de las actividades de mantenimiento del tándem de molinos

En el presente capítulo se muestra la implementación de la metodología utilizada para la reducción del tiempo de las actividades de mantenimiento del tándem de molinos de un ingenio azucarero. Esta metodología inició con la selección del proyecto a desarrollar, se continuó con la determinación de la situación actual de las actividades de mantenimiento, después se establecieron las técnicas de ingeniería industrial, se desarrolló una Estructura de Descomposición del Trabajo (*WBS*), se determinó el tiempo de terminación de las actividades de mantenimiento antes y después de la mejora y se culminó con la comparación de resultados de tiempos de terminación totales, antes y después de la mejora, mediante el uso de una prueba estadística.

3.1 Metodología para la reducción del tiempo de las actividades de mantenimiento del tándem de molinos

La metodología con la cual se lograron cumplir los objetivos del presente trabajo y se logró resolver el problema central, fue la siguiente:

1. Seleccionar un proyecto.
2. Determinar la situación actual de las actividades de mantenimiento del tándem de molinos.
3. Establecer las técnicas de ingeniería industrial.
4. Desarrollar la Estructura de Descomposición del Trabajo (*WBS*).
5. Determinar el tiempo de terminación de las actividades de mantenimiento, antes de la mejora propuesta.
6. Determinar el tiempo de terminación de las actividades de mantenimiento, después de la mejora propuesta.
7. Comparar resultados de tiempos de terminación totales antes y después de la mejora, mediante el uso de una prueba estadística.

3.2 Seleccionar un proyecto

En esta sección se describirán las acciones (Figura 3.1) que se ejecutaron para la selección de un proyecto dentro del ingenio azucarero.

3.2.1 Solicitud de entrevista para realizar un proyecto

El primer paso para el desarrollo del presente trabajo fue la búsqueda de una plática con el gerente de investigación, desarrollo tecnológico e innovación del grupo azucarero a través de un correo electrónico, para solicitarle su apoyo en la realización de un proyecto que permitiera aplicar técnicas y herramientas de ingeniería industrial en el proceso productivo de alguno de los cuatro ingenios que constituyen su grupo azucarero.

El gerente dio respuesta a la solicitud presentada, a través de dos correos electrónicos, para realizar un proyecto. Los correos electrónicos contenían la siguiente información:

- Primer correo electrónico. El gerente explicaba que realizaría un análisis de situaciones presentes en alguno de los ingenios azucareros con la finalidad de establecer un proyecto viable para su posible desarrollo.
- Segundo correo electrónico. El gerente hizo la invitación al autor del presente trabajo para reunirse en las oficinas corporativas del grupo azucarero, indicando el día de la plática con el fin de exponer las situaciones que se presentaban en los ingenios azucareros.

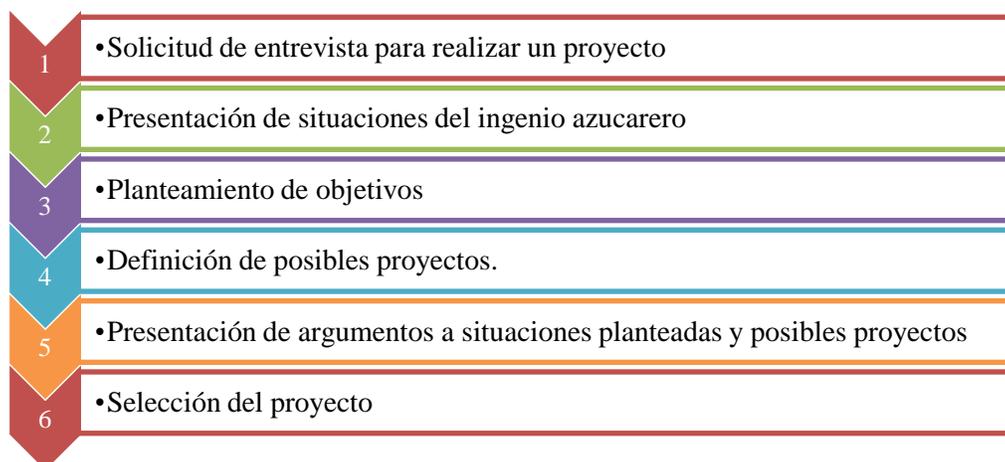


Figura 3. 1 Acciones para la selección de un área de oportunidad (Elaboración propia).

3.2.2 Presentación de situaciones del ingenio azucarero

En la primera plática con el gerente en las oficinas corporativas del grupo, este mencionó su preocupación por las siguientes situaciones que se presentaban específicamente en el área de molinos¹¹ de los ingenios azucareros:

1. Costos altos y deficiencia del programa de mantenimiento del tándem de molinos.
2. Falta de un programa de mantenimiento estandarizado para los cuatro ingenios azucareros del grupo.
3. La parte operativa sólo planea el mantenimiento del tándem de molinos sin tener en cuenta las actividades y los tiempos del área administrativa.
4. El ingenio azucarero, administrativamente, no cuenta con un despiece completo de los componentes del tándem de molinos en su activo fijo para llevar a cabo un buen control.
5. Falta de utilización de herramientas que permitan controlar las actividades, recursos y componentes para mejorar la programación de las actividades a realizar, del armado y desarmado del tándem, en el menor tiempo posible.

3.2.3 Planteamiento de objetivos

Después de escuchar atentamente las cinco situaciones planteadas (Sección 3.2.2), se efectuaron las siguientes actividades:

1. Se determinó un factor común para las situaciones expuestas por el gerente, ya que se infiere que su solución traería un mayor beneficio a las situaciones presentes. El factor común, en formato de negrita, se obtuvo de las siguientes conclusiones:
 - El **tándem de molinos** tenía mayor presencia como elemento problemático en el área de molinos.
 - El armado y desarmado **del tándem de molinos** eran las actividades de mantenimiento con constante presencia en las situaciones planteadas.
 - Existía una insuficiente administración y control en el mantenimiento del **tándem de molinos**.

¹¹ Área de oportunidad.

2. Se realizó un planteamiento de objetivos posibles para establecer a cuál de las situaciones se debería dar mayor prioridad de solución. El planteamiento de objetivos se ideó para determinar la contribución que tendría la solución de cada situación, de manera individual. En la Tabla 3.1 se muestra, en la primera columna, las situaciones planteadas y, en la segunda columna, los objetivos.

3.2.4 Definición de posibles proyectos

La segunda plática, con el gerente, contó con la presencia del director del presente trabajo. En ésta platica se efectuaron las siguientes actividades para definir posibles proyectos que dieran solución a las situaciones presentes del área de molinos:

- Identificar los componentes que conforman un molino.
- Definir posibles herramientas y técnicas de ingeniería industrial a utilizar.

Tabla 3. 1 Situaciones y planteamiento de objetivos (Elaboración propia).

No.	Situaciones	Objetivos
1	Costos altos y deficiencia del programa de mantenimiento del desarmado y armado del tándem de molinos.	Disminuir los costos del programa de mantenimiento del tándem.
2	Falta de un programa mantenimiento estandarizado, del armado y desarmado del tándem de molinos, para los 4 ingenios azucareros del grupo.	Desarrollar un programa de mantenimiento estandarizado para los cuatro ingenios azucareros.
3	La parte operativa del área de molinos sólo planea el armado y desarmado del tándem de molinos sin tener en cuenta las actividades y los tiempos del área administrativa.	Desarrollar la planeación del armado y desarmado del tándem de molinos, involucrando las actividades y tiempos del área administrativa.
4	El ingenio azucarero, administrativamente, no cuenta con un despiece completo de los componentes del tándem de molinos en su activo fijo para llevar a cabo un buen control.	Realizar un registro de todos los componentes que constituyen el tándem de molino para llevar un control actualizado de su activo fijo.
5	Falta de utilización de herramientas que permitan controlar las actividades, recursos y componentes para mejorar la programación de las actividades a realizar, del armado y desarmado del tándem de molinos, en el menor tiempo posible.	Disminuir el tiempo de armado y desarmado del tándem de molinos a través de herramientas de ingeniería industrial.

- Definir posibles tipos de *software* factibles a utilizar.
- Definir posibles proyectos.

3.2.4.1 Identificar los componentes que conforman un molino

Con base en la determinación del factor común de las situaciones planteadas (Sección 3.2.3): el tándem de molinos; se observó que la principal maquinaria que lo constituye es el molino de caña de azúcar. De los componentes que conforman un molino de caña de azúcar, se determinó que son tres los principales en su funcionamiento:

- Vírgenes.
- Mazas.
- Cuchilla central.

En la Sección 1.3.3 se mostró información detallada del funcionamiento de un molino de azúcar y los diferentes componentes que lo conforman y en la Sección 1.3.4 se describieron los tres componentes principales.

3.2.4.2 Definir posibles herramientas y técnicas de ingeniería industrial a utilizar

Para definir posibles herramientas y técnicas de ingeniería industrial que ofrecieran maneras para solucionar las situaciones planteadas (Sección 3.2.2), relacionadas con el tándem de molinos y sus actividades de mantenimiento, se utilizó la técnica de *lluvia de ideas*. El resultado de su aplicación se muestra a continuación:

- Ruta crítica. Es una herramienta utilizada en el desarrollo y control de proyectos, a través de una secuencia de actividades relacionadas entre sí.
- *PERT*. Esta técnica ofrece un modelo para la administración y gestión de proyectos mediante redes y líneas de tiempo interconectadas (diagrama).
- Análisis económico. Es un conjunto de técnicas para tomar decisiones de índole económica, considerando siempre el valor del dinero a través del tiempo.

- *SMED*¹². Permite reducir del tiempo de las operaciones que no dan valor al producto final durante los cambios de presentación, en las líneas de producción.
- *TOC*¹³. La teoría de restricciones se utiliza para mejorar y administrar los procesos de producción de una empresa.
- *MRP*¹⁴. Es una técnica para planear y programar los requerimientos de los materiales para las operaciones de producción finales.
- Prueba de hipótesis. Es una herramienta que determina si existe suficiente evidencia en una muestra de datos para inferir que cierta condición es válida para toda una población.

3.2.4.3 Definir posibles tipos de *software* factibles a utilizar

Similarmente a la definición de posibles herramientas y técnicas, se realizó una lluvia de ideas para determinar los tipos de *software* factibles a usar para dar la solución de las situaciones relacionadas con el tándem de molinos y sus actividades de mantenimiento. El resultado de su aplicación se muestra a continuación:

- *Solidworks. Software CAD*¹⁵ para modelado en 3D.
- *SketchUp. Software* de modelado en 3D, para entornos de ingeniería o diseño.
- *FlexSim. Software* para la simulación de eventos discreto que ayuda a tomar decisiones en el diseño y operación de un sistema.
- *Project. Software* de administración de proyectos desarrollado para asistir, a administradores, en la planificación de proyectos.
- *WinQSB. Software* que ayuda a resolver distintos tipos de problemas en el campo de la investigación operativa.
- *POM for Windows. Software* que se utiliza para la gestión de producción, métodos cuantitativos, gestión de proyectos e investigación de operaciones.
- Teoría de restricciones. *Software* que ayuda a mejorar el desempeño operacional de una compañía.

¹² Cambio de herramienta en un solo dígito (*SMED*, por las siglas en inglés de *Single Minute Exchange of Dies*).

¹³ Teoría de restricciones (*TOC*, por las siglas en inglés de *Theory of Constraints*).

¹⁴ Planificación de requerimientos de materiales (*MRP*, por las siglas en inglés de *Material Requirements Planning*).

¹⁵ Diseño asistido por computadora (*CAD*, por las siglas en inglés de *Computer-Aided Design*).

3.2.4.4 Definir posibles proyectos

Una vez identificados los componentes que conforman un molino de caña de azúcar (Sección 3.2.4.1), definidas las posibles herramientas y técnicas de ingeniería industrial (Sección 3.2.4.2) y los posibles tipos de *software* (Sección 3.2.4.3), se definieron los siguientes posibles proyectos para dar solución a las situaciones planteadas:

1. Simulación del proceso de armado y desarmado de los componentes que conforman el tándem de molinos.
2. Diseño mediante un *software* de los componentes que constituyen el tándem de molinos.
3. Desarrollo de tres tipos de listado para el mantenimiento de los componentes del tándem de molinos: de prevención, de predicción y de corrección.
4. Desarrollo de tiempos medios, óptimos y pésimos de las actividades de mantenimiento.
5. Desarrollo de la ruta crítica de las actividades de mantenimiento.
6. Desarrollo de un programa que gestione la planificación de pedido de piezas.

3.2.5 Presentación de argumentos a situaciones planteadas y posibles proyectos

En esta sección se definieron los argumentos (Tabla 3.2) para las situaciones planteadas en el área de molinos y para los posibles proyectos a desarrollar (Tabla 3.3), con la finalidad de identificar el impacto que tendría cada proyecto en la solución de las situaciones. De los argumentos expuestos en la Tabla 3.2, obtenidos mediante entrevistas, y de los argumentos expuestos en la Tabla 3.3 se llegó a las siguientes conclusiones:

- Las situaciones 1 y 2 no son viables para atender en un posible proyecto.
- Las situaciones 3, 4 y 5 pueden ser viables para una mejora.
- Los proyectos 1, 2, 3 y 6 no se tomaron en cuenta porque no presentaron el suficiente impacto para su realización.
- Los proyectos 4 y 5 representan una oportunidad de solución a las situaciones planteadas y al mismo tiempo un área de oportunidad para llevar a cabo un proyecto.

Tabla 3. 2 Argumentos para las situaciones presentes en el área de molinos (Elaboración propia).

No.	Situaciones	Objetivos	Argumentos
1	Costos altos y deficiencia del programa de mantenimiento del desarmado y armado del tándem de molinos.	Disminuir los costos del programa de mantenimiento del tándem.	Un programa de mantenimiento, como tal, no cumple con los requisitos que debe poseer un proyecto de tesis. Por lo tanto, no es viable atender esta situación.
2	Falta de un programa mantenimiento estandarizado, del armado y desarmado del tándem de molinos, para los 4 ingenios azucareros del grupo.	Desarrollar un programa de mantenimiento estandarizado para los cuatro ingenios azucareros.	Requiere información necesaria del periodo de mantenimiento del tándem, el cual sólo ocurre aproximadamente durante 5 meses, cada año.
3	La parte operativa del área de molinos sólo planea el armado y desarmado del tándem de molinos sin tener en cuenta las actividades y los tiempos del área administrativa.	Desarrollar la planeación del armado y desarmado del tándem de molinos, involucrando las actividades y tiempos del área administrativa.	Deberá recopilarse información sobre los tiempos de las actividades del armado y desarmado del tándem de molinos.
4	El ingenio azucarero, administrativamente, no cuenta con un despiece completo de los componentes, del tándem de molinos, en su activo fijo para llevar a cabo un buen control.	Realizar un registro de todos los componentes que constituyen el tándem de molino para llevar un control actualizado de su activo fijo.	Requiere información de cada una de las piezas que constituyen al tándem.
5	Falta de utilización de herramientas que permitan controlar las actividades, los recursos y los componentes para mejorar la programación de las actividades a realizar, del armado y desarmado del tándem de molinos, en el menor tiempo posible.	Disminuir el tiempo de armado y desarmado del tándem de molinos a través de herramientas de ingeniería industrial.	No dependen del periodo de zafra o periodo de mantenimiento para llevarse a cabo.

3.2.6 Selección del proyecto

Con base en las conclusiones de la Sección 3.2.5, los posibles proyectos que representan una oportunidad de solución a las situaciones planteadas son los proyectos 4 y 5 (Tabla 3.3). Sin embargo, a pesar de que los dos proyectos presentaban argumentos válidos para ser desarrollados, se consideró que por sí solos no obtendrían gran impacto de solución a las situaciones presentes.

Tabla 3. 3 Argumentos para los posibles proyectos a desarrollar (Elaboración propia).

No.	Posibles proyectos	Argumentos
1	Simulación del proceso de armado y desarmado de las piezas (elementos) que conforman el tándem de molinos.	No se posee un <i>software</i> que pueda realizar una simulación dinámica para realizar el armado y desarmado de las piezas del tándem.
2	Diseño, mediante un <i>software</i> , de las piezas que constituyen el tándem	El proyecto, para el grupo azucarero, no tiene el suficiente impacto como solución de las situaciones presentes.
3	Desarrollo de tres tipos de listado para el mantenimiento: de prevención, de predicción y de corrección; de las piezas del tándem de molinos.	Se requiere recopilar información nueva de las piezas del tándem para llevar a cabo los tres tipos de listados.
4	Desarrollo de tiempos medios, óptimos y pésimos de las actividades de mantenimiento.	Se requiere recopilar información nueva sobre los tiempos que se llevan en realizar las actividades de mantenimiento del tándem.
5	Desarrollo de la ruta crítica de las actividades de mantenimiento.	Requiere de la matriz de tiempos y secuencias para desarrollar la ruta crítica.
6	Desarrollo de un programa que gestione la planificación de pedido de piezas.	Un programa como el que se pretende realizar no es viable para su elaboración. El proyecto no se enfocaría a la programación de tal planificación y tomaría mucho tiempo su realización.

Ante el escenario planteado y teniendo en cuenta las conclusiones efectivas de los argumentos y los intereses primordiales del grupo azucarero, las personas involucradas en la plática: gerente, director del presente trabajo y autor del mismo; llegaron a la conclusión que el factor **tiempo** era vital para el grupo azucarero en su afán de mejorar la administración y control de los procesos en el área de molinos. Por esta razón los dos posibles proyectos se conjuntaron en uno sólo para dar solución a las situaciones presentes (Tabla 3.2). El proyecto resultante fue la *“Reducción del tiempo de las actividades de mantenimiento del tándem de molinos de un ingenio azucarero”*.

3.3 Determinar la situación actual de las actividades de mantenimiento del tándem de molinos

En esta sección se describirán las siguientes acciones que se ejecutaron para determinar la situación actual de las actividades de mantenimiento del tándem de molinos:

- Comprender la importancia del área de molinos.

- Conocer el área de molinos.
- Conocer el proceso actual del mantenimiento del tándem de molinos.
- Conocer documentos para el control del mantenimiento del tándem de molinos.
- Conocer factores significativos en la realización de las actividades de mantenimiento.

3.3.1 Comprender la importancia del área de molinos

En la Sección 3.2.2 se mencionó que el área de oportunidad en la que se enfocarían los esfuerzos para el desarrollo del proyecto seleccionado sería el área de molinos, por ello, las siguientes actividades se ejecutaron para comprender la importancia que representa el área de molinos para el ingenio azucarero:

- Se realizó una investigación en los trabajos de Dominguez *et al* (2014), Santiesteban *et al* (2015) y Rosero *et al* (2008) para estudiar teóricamente las actividades que se ejecutan en el área de molinos en los ingenios azucareros.
- Se realizaron pláticas con el superintendente de maquinaria, responsable de mantenimiento, para conocer y escuchar la importancia que constituye el área de molinos para el ingenio azucarero.
- Se averiguó en qué etapa del proceso de producción de azúcar, del ingenio azucarero, se ubica el proceso de molienda (proceso que se realiza en el área de molinos) con el objetivo de identificar el impacto que tiene el área de molinos para la producción de azúcar. En la Sección 1.1.2 se mostró el proceso de producción de azúcar el cual permitió ubicar al proceso de molienda entre el proceso de transporte y recepción de caña y el proceso de clarificación y filtración. La Sección 1.1.2 también mostró información detallada de las actividades que se llevan a cabo en el proceso de molienda.

Con base en la investigación realizada, las pláticas con el superintendente de maquinaria y la identificación del impacto que tiene el área de molinos para la producción de azúcar, las conclusiones que se obtuvieron de la importancia que constituye el área de molinos para el ingenio azucarero se presentan a continuación:

- Es responsable de gran parte de la estabilidad del ingenio.

- Es responsable de un correcto inicio del proceso de producción de azúcar.
- Aporta el combustible para la generación de vapor en las calderas (bagazo).
- Extrae grandes cantidades de jugo de caña y muele grandes cantidades de caña de azúcar.
- Define, en gran parte, el trabajo posterior del ingenio azucarero.

3.3.2 Conocer el área de molinos

Comprendida la importancia del área de molinos, se realizaron recorridos durante un periodo de tres días con el objetivo de conocer con mayor claridad esta área. Para ello, se realizaron las actividades:

- Conocer la ubicación del tándem de molinos.
- Conocer al personal del área de molinos.
- Familiarizarse con los componentes del tándem de molinos.

3.3.2.1 Conocer la ubicación del tándem de molinos.

En la Figura 3.2 se muestra la ubicación del tándem de molinos en el área de molinos del ingenio. Alrededor del tándem de molinos se encuentran los siguientes componentes:

- Transmisiones de alta y baja. Se encargan de transmitir potencia a los molinos.
- Conductor de caña. Transporta los pedazos de caña de azúcar, desgarrados en la desfibradora, al tándem de molinos.
- Tanques. En los tanques se deposita el jugo extraído de la caña de azúcar.

3.3.2.2 Conocer al personal del área de molinos.

Sin duda alguna, el elemento más importante de cualquier área de trabajo es el personal. Particularmente, el personal presente en el área de molinos varía de acuerdo con el periodo de zafra y al periodo de mantenimiento que se efectúa en el ingenio azucarero.

En la Tabla 3.4 se muestra el personal que labora en estos dos periodos y las actividades que realiza cada uno de ellos.

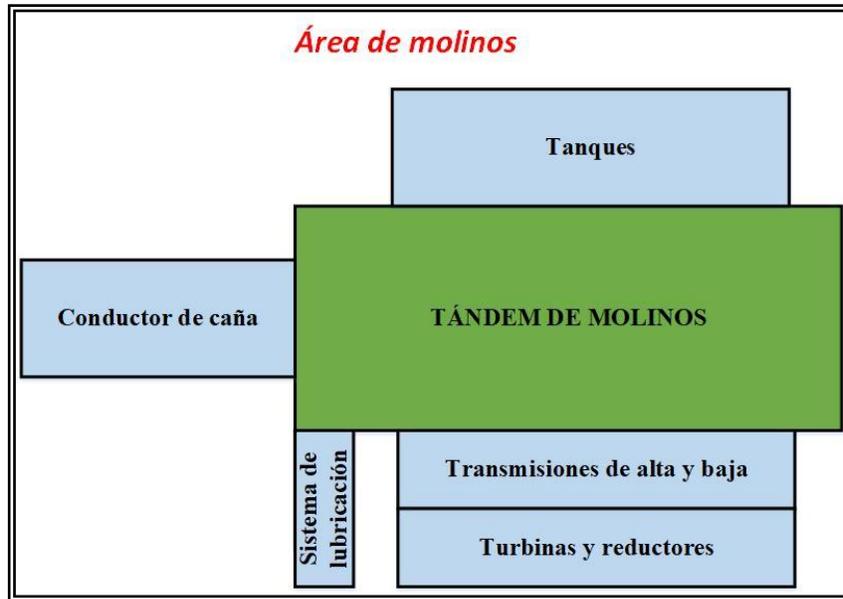


Figura 3. 2 Ubicación del tándem de molinos (Elaboración propia).

Tabla 3. 4 Personal en el periodo de zafra y periodo de mantenimiento (Elaboración propia).

Periodo	Personal	Actividades que realiza
Zafra	Operario	<ul style="list-style-type: none"> • Supervisar limpieza sistemáticamente con los equipos. • Revisar el tándem para cerciorarse que no hay fugas ni escurrimientos de guarapo, en tuberías, bombas y tanques. • Revisar que no haya fugas de aceite en el sistema. • Comprobar la flotación de los molinos y que los mecanismos de señalamiento estén en operación.
Zafra y mantenimiento	Mecánico	<ul style="list-style-type: none"> • Interpretar dibujos y manuales mecánicos. • Realizar mantenimiento de las maquinarias y equipos mecánicos. • Realizar la reparación de las maquinarias y equipos mecánicos con calidad, eficiencia y seguridad. • Mantener en buenas condiciones las maquinarias y equipos mecánicos.
	Soldador	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar trabajos de soldaduras dirigidas a tareas de adecuación, montaje y piezas de máquinas y equipos.
	Jefe de molinos	<ul style="list-style-type: none"> • Coordinar labores de producción a realizar. • Coordinar actividades de mantenimiento del área. • Operación y mantenimiento mecánico. • Verificar llegada de materiales. • Planear las labores de molienda de acuerdo con necesidades y metas establecidas.
	Superintendente de maquinaria	<ul style="list-style-type: none"> • Efectuar el cálculo de ajuste de posiciones de mazas y cuchilla central. • Organizar la colocación de las mazas en los molinos.

3.3.2.3 Familiarizarse con los componentes del tándem de molinos

Los recorridos que se realizaron durante un periodo de tres días ayudaron a distinguir algunos componentes que integran el tándem de molinos¹⁶. Entre los elementos que destacan se encuentran las vírgenes de los molinos, las mazas, los conductores donelly, las transmisiones de alta y baja, las coronas y los componentes para la maceración.

Para obtener un mejor panorama de los componentes que se observaron, en la Sección 1.3.2 se mostraron los diferentes componentes que conforman el tándem de molinos y en la Sección 1.3.4 se describieron sus tres componentes principales.

3.3.3 Conocer el proceso actual del mantenimiento del tándem de molinos

Una vez comprendida la importancia del área de molinos (Sección 3.3.1) y conocida la respectiva área (3.3.2), se conoció el proceso actual del mantenimiento del tándem de molinos; para ello, se realizaron las siguientes acciones:

- Describir el proceso de mantenimiento del tándem de molinos.
- Definir las principales etapas del mantenimiento del tándem de molinos.

3.3.3.1 Describir el proceso de mantenimiento del tándem de molinos

Para describir el proceso del mantenimiento del tándem de molinos se efectuó una plática con el superintendente de maquinaria y el jefe de molinos. La plática trajo como resultado la descripción del proceso de mantenimiento de manera administrativa y de manera operativa.

El proceso de mantenimiento de manera administrativa consiste en los siguientes pasos:

1. Se realiza un diagnóstico de las condiciones físicas de aquellos componentes que se mandarían a fabricar a talleres externos¹⁷ o se enviarían al taller del ingenio azucarero

¹⁶ Los primeros recorridos se realizaron en periodo de zafra, por lo que no se pudo observar, físicamente, la totalidad de los componentes del tándem de molinos.

¹⁷ Algunos componentes se mandan a fabricar cada año (raspadores, cuchillas centrales, etc.) y otros, como las mazas, se mandan a reencamisar.

para su mantenimiento. Además, se realiza un análisis de la alineación y nivelación de vírgenes del molino.

2. Se realiza la solicitud de pedido de componentes y se da seguimiento a los proveedores, considerando el tiempo posible de fabricación y traslado de los componentes fabricados.
3. Se realizan diversas actividades de distribución en el almacén, una vez que los componentes fabricados llegan al ingenio azucarero.
4. Se da de alta al SAP cada uno de los aspectos administrativos, financieros y de control.

El proceso de mantenimiento del tándem de manera operativa se desarrolla en tres fases:

1. Desmontaje.

El orden en que se desmontan los componentes es el siguiente:

- A. Pasillos y barandales.
- B. Líneas de lubricación, enfriamiento y presión hidráulica.
- C. Campanas de maceración, líneas de maceración, flautas de agua de imbibición y láminas de *by-pass*.
- D. Raspadores inferiores bagaceros.
- E. Conductores *donelly*¹⁸.
- F. Shute, botas, cople flexible, raspador superior tipo L, cabezotes hidráulicos, cuarta maza, chumaceras integrales, maza superior y chumaceras de reposo.
- G. Tornillos de bisagras cañeras y bagaceras.
- H. Maza cañera, maza bagacera, cuchilla central, perno excéntrico, puente de cuchilla central y soporte del puente de cuchilla central.

En piso, se desmontan coronas, bridas, chumaceras cañeras, chumaceras bagaceras, sellos de jugo cañeros y bagaceros, tapas de chumaceras y silletas de cada una de las mazas.

2. Montaje.

Las actividades que se realizan para el montaje del tándem de molinos son las siguientes:

- A. Blindaje de raspadores, mazas y cuchillas central.

¹⁸ Posterior al desmontaje de los conductores *donelly*, se desmontan los componentes comenzando con el molino uno y terminando con el molino seis.

- B. Asentamiento de chumaceras cañeras y bagaceras.
 - C. Montaje de silletas, maza cañera, sellos de jugos cañeros y bagaceros y maza bagacera.
 - D. Montaje del soporte de puente de cuchilla central, puente de cuchilla central, perno excéntrico y cuchilla central.
 - E. Gramilación de cuchilla central, maza bagacera y maza cañera.
 - F. Montaje de tornillos de bisagras cañeras y bagaceras.
 - G. Asentamiento de chumaceras de reposo.
 - H. Montaje de botas, chumaceras de reposo, maza superior, chumaceras integrales, cabezotes hidráulicos. raspador superior tipo L, cuarta maza y shute.
 - I. Montaje de conductores *donelly*.
 - J. Montaje de raspadores inferiores bagaceros.
 - K. Montaje de flautas de agua de imbibición, líneas de maceración, campanas de maceración y láminas de *by-pass*.
 - L. Montaje de líneas de lubricación, enfriamiento y presión hidráulica.
 - M. Montaje de pasillos y barandales.
3. Pruebas e inspección.

En esta fase se realizan pruebas de funcionamiento e inspección a lo siguiente:

- A. Líneas de enfriamiento y lubricación.
- B. Líneas de presión hidráulica.
- C. Conductores *donelly*.

3.3.3.2 Definir las principales etapas del mantenimiento del tándem de molinos

Como se mostró en la descripción del proceso de mantenimiento del tándem (Sección 3.3.3.1), son numerosas las actividades de mantenimiento que se realizan; sin embargo, a pesar de la cantidad de actividades que se ejecutan, se lograron clasificar en dos etapas: planeación y ejecución. Estas etapas, a su vez, engloban las siguientes actividades (Figura 3.3):

1. Planeación. En esta etapa se realizan las actividades administrativas que se realizan para el mantenimiento del tándem de molinos.

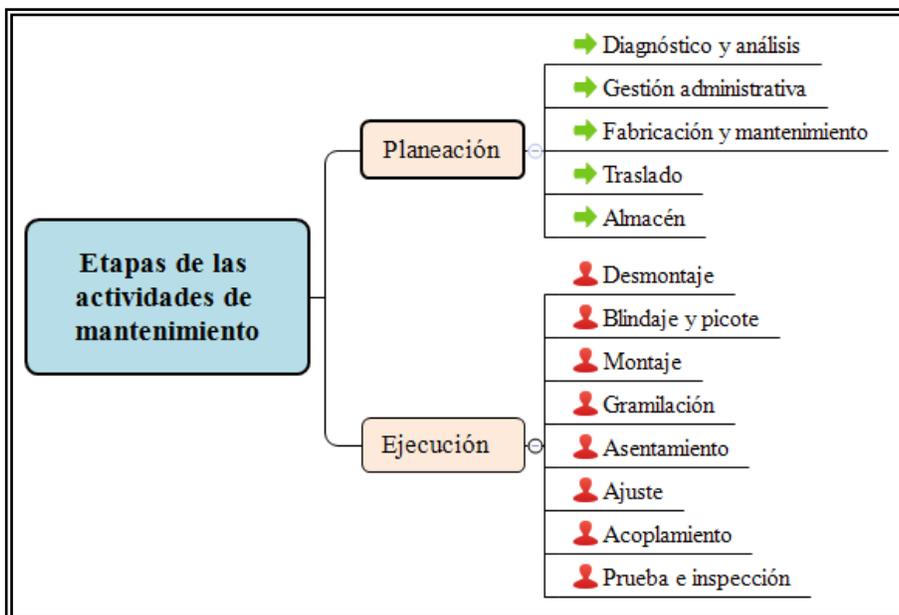


Figura 3. 3 Etapas de las actividades de mantenimiento (Elaboración propia).

Las principales actividades que se llevan a cabo en esta etapa son las siguientes:

- Diagnóstico y análisis. Se estudian las condiciones físicas de los diversos componentes del tándem de molinos, principalmente las mazas. Además, se realiza un análisis de la alineación y nivelación de vírgenes del molino.
 - Gestión administrativa. Se realiza la solicitud de pedido de componentes, dando seguimiento y control a los proveedores: FYMSSSA, Manufacturera 3M, entre otros.
 - Fabricación y mantenimiento. Después del desmontaje, se mandan a fabricar algunos componentes a talleres externos y algunos otros al taller del ingenio. Además, se inician actividades de mantenimiento de los componentes del tándem: revisión, valoración, limpieza y reparación.
 - Traslado. Se estudia el tiempo que tardarán los proveedores en enviar los diferentes componentes fabricados.
 - Almacén. Se realizan diversas actividades de distribución en el almacén, posterior al traslado de los componentes.
2. Ejecución. En esta etapa se coordina y organiza al personal y los materiales con el objetivo de cumplir con el mantenimiento y funcionamiento del tándem de molinos días antes de iniciar el periodo de zafra.

Las principales actividades que se ejecutan en esta etapa son las siguientes:

- **Desmontaje.** Para realizar el desmontaje de la mayoría de los componentes del tándem de molinos se ocupa una grúa viajera de 30 y 10 toneladas que traslada los componentes de un lado a otro para su posterior revisión o desecho.
- **Blindaje y picote.** Se aplica blindaje a componentes específicos del tándem de molinos como la cuchilla central, el raspador inferior bagacero y el raspador superior tipo L. El único componente que se blindo y se le aplica picote es a la maza del molino.
- **Montaje.** Se arman los componentes que ya han sido revisados, reparados y blindados. Para realizar el montaje de la mayoría de los elementos se utiliza la grúa viajera.
- **Gramilación.** Para realizar esta actividad se utiliza una herramienta (compás) llamada gramil que medirá la distancia que existe de la maza superior a las mazas inferiores y cuarta maza. Para realizar la gramilación se sigue un trazo (dibujo en CAD) con el fin de obtener los mejores resultados en la extracción del jugo. El ajuste lo realiza el superintendente de maquinaria.
- **Asentamiento.** Se realiza la instalación de las silletas cañeras y bagaceras, así como la instalación de las chumaceras de reposo de la maza superior sobre las vírgenes.
- **Acoplamiento.** Se realiza el ensamble del molino, específicamente de la maza superior, con la transmisión de alta.
- **Ajuste.** Se realiza el ajuste de chumaceras integrales, raspador superior tipo L, raspador inferior bagacero y conductor donelly; elementos que se montan al final del mantenimiento.
- **Prueba e inspección.** Se realizan pruebas e inspecciones finales de diferentes componentes del tándem de molinos: sistemas de enfriamiento, sistema de bombeo, sistema de lubricación y conductor donelly.

3.3.4 Conocer documentos para el control del mantenimiento del tándem de molinos

Los documentos que utiliza el personal para el control del mantenimiento del tándem de molinos se ubicaron en cuatro archivos electrónicos, dos archivos en *Excel* y dos en *Project*, que contenían la siguiente información:

- Formatos de control para mantenimiento.
- Orden y avance de las actividades de mantenimiento.

3.3.4.1 Formatos de control para mantenimiento

Los formatos de control que se utilizan para el mantenimiento de molinos están enfocados principalmente a los componentes principales que posee el tándem de molinos, los cuales contienen distinta información dependiendo del tipo de componente; estos componentes son los siguientes:

- Maza cañera y maza bagacera. En la Tabla 3.5 se muestra un ejemplo del formato de control para el mantenimiento de la maza cañera. El formato se clasifica en las siguientes columnas:
 - Molino.
 - Maza.
 - Blindaje y picote.
 - Guarda jugos y tornillos.
 - Corona 15 dientes.
 - Cuñas para coronas.
 - Muñones.
 - Silletas.
 - Tapas de silletas.
 - Asentado de silletas
 - Montaje y armado de silletas.
 - Nivelado y gramilado.

Tabla 3. 5 Formato de control para mantenimiento de maza cañera (Ingenio azucarero, 2016).

Mazas cañeras											
Mol.	Maza	Blindaje y picote	Guarda jugos y tornillos	Corona 15 dientes	Cuñas p/coronas	Muñones	Silletas	Tapas de silletas	Asentado de silletas	Montaje de silletas	Nivelado y gramilado
1											
2											
3											
4											
5											
6											

La maza bagacera, al tener los mismos componentes y actividades que la maza cañera, utiliza el mismo formato.

- Silletas. En la Tabla 3.6 se muestra el formato de control para el mantenimiento de las silletas cañeras y bagaceras. La tabla tiene dos columnas principales, una para cada tipo de silleta. Cada columna se clasifica en seis subcolumnas: molino, lado (izquierdo y derecho), caja, teja, tapa y lista para asentar.
- Maza superior. En la Tabla 3.7 se muestra el formato de control de la maza superior, el cual se clasifica en las siguientes columnas:
 - Molino.
 - Maza.
 - Blindaje y picote.
 - Bridas y tornillos.
 - Corona 15 dientes y cuarta maza.
 - Cuñas para coronas.
 - Muñones.
 - Tejas de reposo.
 - Integrales.
 - Montaje.
 - Asentamiento de integral.

Tabla 3. 6 Formato de control para mantenimiento de silletas de molino (Ingenio azucarero, 2016).

Silletas de molinos											
Cañera						Bagacera					
Mol.	Lado	Caja	Teja	Tapa	Lista para asentar	Mol.	Lado	Caja	Teja	Tapa	Lista para asentar
1	Izq.					1	Izq.				
	Der.						Der.				
2	Izq.					2	Izq.				
	Der.						Der.				
3	Izq.					3	Izq.				
	Der.						Der.				
4	Izq.					4	Izq.				
	Der.						Der.				
5	Izq.					5	Izq.				
	Der.						Der.				
6	Izq.					6	Izq.				
	Der.						Der.				

Tabla 3. 7 Formato de control para mantenimiento de maza superior (Ingenio azucarero, 2016).

Mazas Superiores										
Mol.	Maza	Blindaje y picote	Bridas y tornillos	Corona 15 dientes y 4ta maza	Cuñas p/coronas	Muñones	Tejas de reposo	Integrales	Montaje	Asentamiento de integral
1										
2										
3										
4										
5										
6										

- Bridas. Las bridas son los únicos componentes que se encuentran en las mazas superiores. Las actividades que se realizan para su mantenimiento, que se muestran a continuación, se controlan mediante el formato de la Tabla 3.8:
 - Maquinado.
 - Corte de suplemento.
 - Rectificado de suplemento.
 - Armado con suplemento soldado.
 - Rectificado final.
 - Barrenado
- Cuarta maza. En la Tabla 3.9 se muestra el formato de control de la cuarta maza, el cual se clasifica en las siguientes columnas:
 - Molino.
 - Maza.
 - Blindaje y picote.
 - Corona.
 - Cuñas para coronas.
 - Muñones.
 - Chumaceras y bronce.
 - Montaje.
 - Nivelado.

Tabla 3. 8 Formato de control para mantenimiento de bridas (Ingenio azucarero, 2016).

Bridas							
Mol.	Lado	Maquinado	Corte de suplemento	Rectificado de suplemento	Armado con suplemento sold.	Rectificado final	Barrenado
1	D						
	I						
2	D						
	I						
3	D						
	I						
4	D						
	I						

Tabla 3. 9 Formato de control para mantenimiento de cuarta maza (Ingenio azucarero, 2016).

4tas Mazas											
Mol.	Maza	Blindaje y picote	Corona	Cuñas p/coronas	Muñones	Chumacera y bronce		Montaje	Nivelado	Colocación escuadras	Ajuste
1											
2											
3											
4											
5											
6											

- Colocación de escuadras.
- Ajuste.
- Vírgenes. Las actividades que se realizan para el mantenimiento de las vírgenes, que se listan a continuación, se controlan mediante el formato de la Tabla 3.10:
 - Limpieza y revisión de estructura.
 - Revisión de anclas de virgen y bancada.
 - Revisión de excéntricas.
 - Revisión de tornillo empujador.
 - Análisis de fisura tornillo rey.
 - Checar pernos-bujes de bisagra y cabezotes.
 - Nivelado individual y en par.
 - Checar altura contra la transmisión.
 - Alinear con la transmisión.
 - Asegurar y apretar.

3.3.4.2 Orden y avance de las actividades de mantenimiento

Los archivos de las actividades de mantenimiento tienen el propósito de facilitar al personal del área la visualización del orden en que se deben realizar las actividades para el mantenimiento del tándem de molinos (Sección 3.3.3.1). Para visualizar el avance de estas actividades el jefe de molinos posee tres archivos: uno en *Excel* y dos en el *software Project*.

Tabla 3. 10 Formato de control para mantenimiento de las vírgenes (Ingenio azucarero, 2016).

Vírgenes												
Mol.	Lado	Limpieza y revisión de estructura	Revisión de anclas de virgen y bancada	Revisión de excéntricas	Revisión de tornillo empujador	Análisis de fisura tornillo rey	Checar pernos-bujes de bisagra y cabezotes	Nivelado individual y en par	Checar altura contra la transmisión	Alinear con la transmisión	Asegurar y apretar	
1	Izq.											
	Der.											
2	Izq.											
	Der.											
3	Izq.											
	Der.											
4	Izq.											
	Der.											
5	Izq.											
	Der.											
6	Izq.											
	Der.											

Las actividades de mantenimiento, que se encuentran registradas en los archivos, han sido obtenidas de acuerdo con la experiencia de expertos en el mantenimiento del tándem de molinos. La Tabla 3.11, que muestra una parte del formato de *Excel*, contiene algunas actividades del mantenimiento del tándem de molinos divididas en las siguientes columnas:

- Actividades de mantenimiento.
- Molinos (del uno al seis).
- Porcentaje de avance del mantenimiento del tándem de molinos.

Algo importante de puntualizar es que a pesar de que el formato de la Tabla 3.11 muestra el título “*Cronología de montaje*”, las actividades no presentan una sucesión del montaje de los componentes, en esencia, presentan actividades del mantenimiento del tándem de molinos, pero de una manera no cronológica.

Los archivos en *Project*, por su parte, muestran las tareas (actividades) del mantenimiento del tándem de molinos empleando la vista “*Diagrama de Gantt*”, que ofrece el *software*, la cual contiene las siguientes columnas (Figura 3.4 y Figura 3.5):

- Nombre de la tarea. En esta columna se escribe el nombre de las tareas a realizar o de los recursos.

Tabla 3. 11 Parte de las actividades de mantenimiento del tándem (montaje) (Ingenio azucarero, 2016).

CRONOLOGIA DE MONTAJE									
ACTIVIDADES		Molino	Molino	Molino	Molino	Molino	Molino		% AVANCE
		1	2	3	4	5	6		
10	BLINDAJE DE DIENTES DE CUCHILLA CENTRAL							0%	0%
11	MONTAJE DE CUCHILLA C. EN PUENTE Y GRAMILADO							0%	0%
12	BLINDAJE DE CUERPO DE CUCHILLA CENTRAL							0%	0%
13	SACAR CORONA 15 DIENTES Y 4TA DE MAZA SUPERIOR					X	X X X X	33%	33%
14	QUITAR BRIDAS DE MAZA SUPERIOR					X	X X X X	33%	33%
15	QUITAR SUPLEMENTO Y/O RECTIFICADO DE BRIDA							0%	0%
16	COLOCAR SUPLEMENTO Y RECT. Y BARRENADO DE BRIDA							0%	0%
17	SACAR CORONA 15 DIENTES DE MAZA BAGACERA						X X	17%	17%
18	SACAR CORONA 15 DIENTES DE MAZA CAÑERA						X X	17%	17%
19	BLINDAJE PICOTE Y CHAPISCO EN MAZA SUPERIOR						X X	17%	17%
20	BLINDAJE PICOTE Y CHAPISCO EN MAZA BAGACERA				X X	X X	X X X X	50%	50%
21	BLINDAJE Y PICOTE EN MAZA CAÑERA							0%	0%

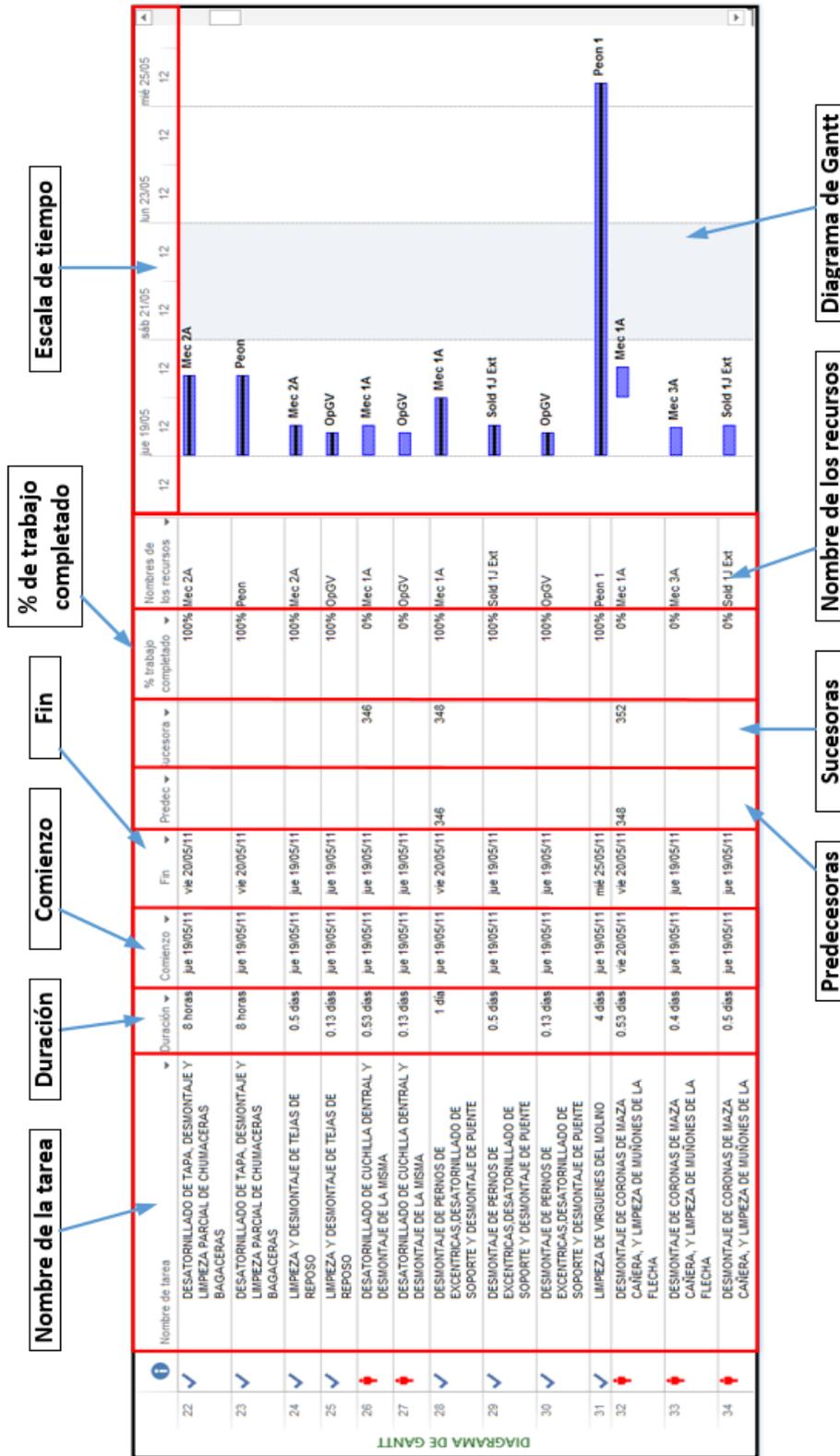


Figura 3. 4 Actividades de mantenimiento del año 2011 (Elaboración propia).

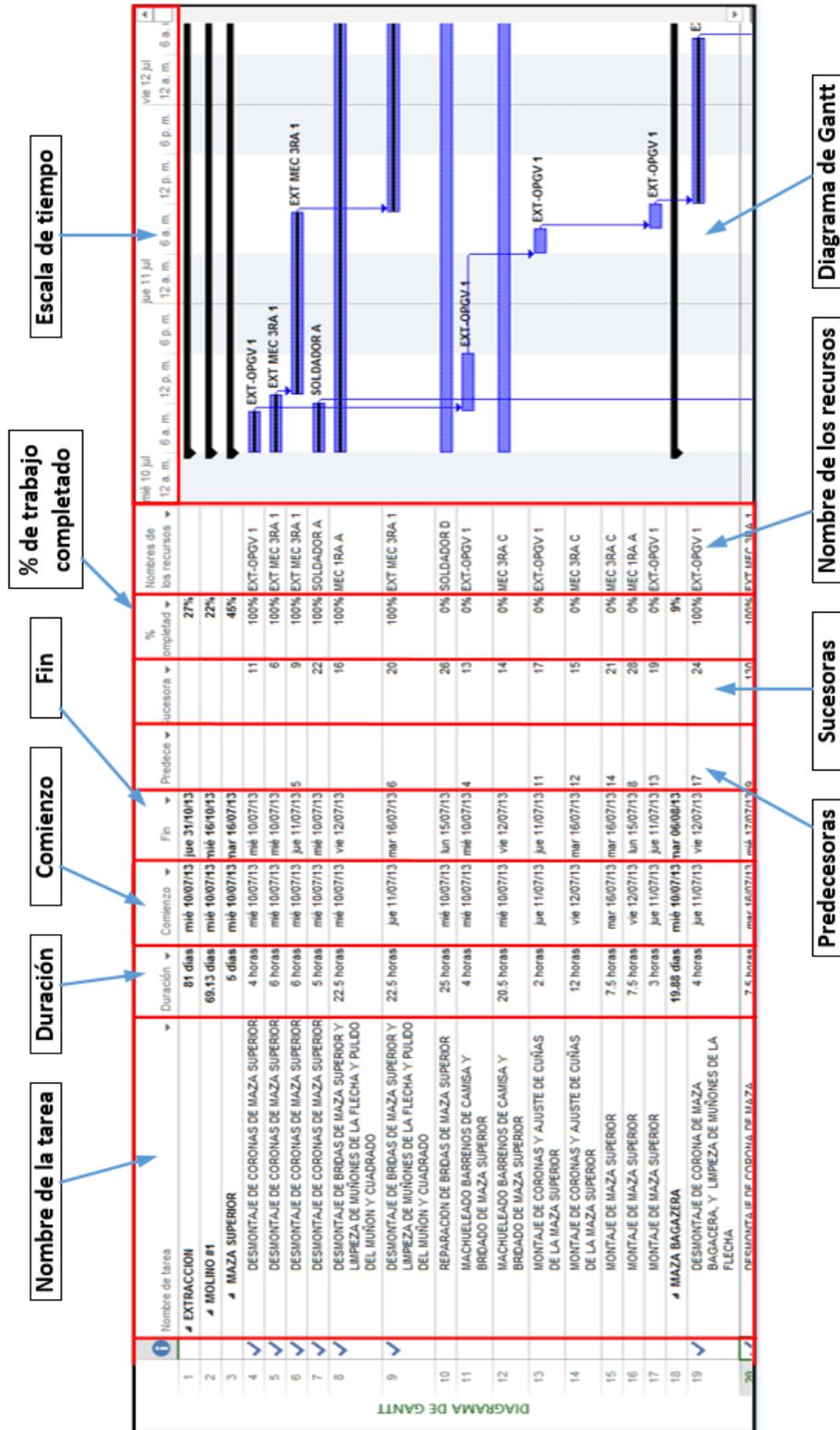


Figura 3. 5 Actividades de mantenimiento del año 2013 (Elaboración propia).

- Duración. Es la duración total del tiempo de trabajo de una tarea o recurso.
- Comienzo. La fecha en que una tarea o recurso inicia sus operaciones.
- Fin. La fecha en que una tarea o recurso termina sus operaciones.
- Predecesoras. El número que identifica a las tareas o recursos predecesores de la que depende la tarea, para comenzar o finalizar su trabajo.
- Sucesoras. El número que identifica a las tareas o recursos sucesores.
- Porcentaje de trabajo completado. Representa el estado actual de la tarea o recurso, expresado en porcentaje.
- Nombre de los recursos. Muestra los nombres de los recursos asignados a una tarea.

Las Figuras 3.4 y 3.5 muestran una parte de las actividades de mantenimiento que se realizaron en el año 2011 y año 2013, respectivamente. En la Figura 3.4 se observa que en las columnas “Predecesoras” y “Sucesoras” no se colocaron los números que identifican a las tareas, lo cual ocasiona que, a pesar de tener la fecha de inicio (columna “Comienzo”) y la fecha final (columna “Fin”), en el diagrama de *Gantt* todas las actividades inicien en la misma fecha y que no existan vínculos (flechas) en el diagrama de *Gantt*.

En la Figura 3.5, por el contrario, se observa que en las columnas “Predecesoras” y “Sucesoras” se colocaron los números que identifican a las tareas y que existen vínculos (flechas) en el diagrama de *Gantt*. En esta misma figura se muestra una actividad repetida (actividad 4 a 7) con números de tareas predecesoras o sucesoras diferentes, lo que ocasiona una errónea visualización de las actividades del mantenimiento del tándem de molinos en el diagrama de *Gantt*.

3.3.5 Conocer factores significativos en la realización de las actividades de mantenimiento

Como se mencionó en la Sección 3.3.2.2, el elemento más importante de cualquier área de trabajo es el personal. El personal del área de molinos, especialmente, ha adquirido mucha experiencia, con los años, con respecto al mantenimiento que se realiza al tándem de molinos, por esta razón se le pregunto al personal qué factores significativos han observado cuando se realizan las actividades de mantenimiento al tándem de molinos.

La Tabla 3.12, que muestra las respuestas del personal referente a factores significativos presentes en las actividades de mantenimiento del tándem de molinos, se divide en dos columnas: “Factores positivos”, a la izquierda, y “Factores negativos”, a la derecha. Específicamente, los factores negativos exponen elementos que el personal observa cada año durante el periodo de mantenimiento, los cuales provocan retrasos en las actividades y aumentan su tiempo de ejecución.

3.4 Establecer las técnicas de ingeniería industrial

Con base en las conclusiones obtenidas en la selección del proyecto (Sección 3.2.6) y en las acciones que se ejecutaron para determinar la situación actual de las actividades de mantenimiento del tándem de molinos (Sección 3.3.1 a Sección 3.3.5), se decidió utilizar las siguientes técnicas para reducir el tiempo de las actividades de mantenimiento del tándem de molinos en el ingenio azucarero:

- **Estructura de descomposición del trabajo (WBS).** Se usará para visualizar el trabajo que tendrá que realizarse para reducir el tiempo de las actividades de mantenimiento del tándem de molinos.

Tabla 3. 12 Factores significativos en las actividades de mantenimiento (Elaboración propia)

Factores significativos		
No.	Factores positivos	Factores negativos
1	Se les da mantenimiento a todos los componentes que conforman los molinos.	Solo existe una grúa viajera para desmontar y montar la mayor parte de los componentes del tándem de molinos.
2	El personal que opera en el periodo de mantenimiento es experto en la ejecución de las actividades a realizar.	Retraso de los componentes que son fabricados en talleres externos.
3	El superintendente de maquinaria y jefe de molinos supervisan las actividades de mantenimiento.	Falta de comunicación y organización entre el jefe de molinos con el demás personal del área.
4	El jefe de molinos tiene formatos de control de las actividades de mantenimiento.	Falta de compromiso por parte del personal del área.
5		Componentes del molino claves en las actividades de montaje: cuchilla central, mazas y coronas; retrasan las actividades de mantenimiento si no se encuentran en el área.

- **Ruta crítica (CPM).** Se utilizará para planificar las actividades de mantenimiento del tándem de molino dentro de un tiempo crítico.
- **Técnica de evaluación y revisión de proyectos (PERT).** Se utilizará con el objetivo de estimar la duración total del proyecto, para ello, se considerarán tres estimaciones de tiempos para las actividades del proyecto: optimo, pesimo y más probable.
- **Método del diagrama por precedencias (PDM).** Se usará para crear un diagrama de red de las actividades de mantenimiento del tándem de molinos que permitirá indicar, de manera sencilla, la lógica de las interrealaciones de las actividades.
- **Simulación de Monte Carlo.** Se usará para calcular el plazo del proyecto con base en un determinado grado de confianza y determinar en qué medida la planificación del proyecto es realista.
- **Prueba de hipótesis.** Se utilizará para validar los resultados obtenidos de la implementación de las técnicas de ingeniería industrial seleccionadas.

3.5 Desarrollar la Estructura de Descomposición del Trabajo (WBS)

Una vez seleccionado el proyecto (Sección 3.2.6), determinada la situación actual de las actividades de mantenimiento del tándem de molinos (Sección 3.3.3) y establecidas las técnicas de ingeniería industrial para reducir el tiempo de las actividades de mantenimiento (Sección 3.4), se desarrolló una Estructura de Descomposición del Trabajo (WBS) gráfica para representar, por niveles, las relaciones entre las actividades de mantenimiento y el proyecto: “Reducción del tiempo de las actividades de mantenimiento del tándem de molinos de un ingenio azucarero”.

Para desarrollar la WBS se realizaron las siguientes acciones:

- Identificar fases y etapas del mantenimiento del tándem de molinos.
- Desarrollar la Estructura de Descomposición del Trabajo (WBS).

3.5.1 Identificar las fases y etapas del mantenimiento del tándem de molinos

Para definir los niveles de la *WBS* gráfica, se identificaron las fases y etapas del mantenimiento del tándem de molinos. En la Sección 3.3.3.1 se describieron tres fases del mantenimiento del tándem de molinos:

1. Desmontaje.
2. Montaje.
3. Pruebas e inspección.

En la Sección 3.3.3.2 se definieron las principales etapas del mantenimiento del tándem de molinos:

1. La etapa de planeación, que mostró las siguientes actividades de mantenimiento:
 - Diagnóstico y análisis.
 - Gestión administrativa.
 - Fabricación y mantenimiento.
 - Traslado.
 - Almacén.
2. La etapa de ejecución, que mostró las siguientes actividades de mantenimiento:
 - Desmontaje.
 - Blindaje y picote.
 - Montaje.
 - Gramilación.
 - Asentamiento.
 - Ajuste.
 - Acoplamiento.
 - Prueba e inspección.

Con base en la teoría mostrada en la Sección 2.3, las tres fases (Sección 3.3.3.1) y las dos etapas del mantenimiento del tándem de molinos (Sección 3.3.3.2) se denominarán como “*actividades*”. La jerarquización por niveles de las actividades se realizará en la Sección 3.5.2.

3.5.2 Desarrollar la Estructura de Descomposición del Trabajo (WBS)

Una vez definido que las fases (Sección 3.3.3.1) y las dos etapas del mantenimiento del tándem de molinos (Sección 3.3.3.2) serían identificadas como “*actividades*” (Sección 3.5.1) se desarrolló la WBS que se muestra en la Figura 3.6, en forma de organigrama, para representar las relaciones entre las actividades de mantenimiento y el proyecto. Los niveles que conforman la WBS son los siguientes:

1. En el nivel uno se colocó el nombre del proyecto “Reducción del tiempo de las actividades de mantenimiento del tándem de molinos de un ingenio azucarero”.
2. En el nivel dos se colocó, a la izquierda, la actividad de planeación y, a la derecha, la actividad de ejecución del proyecto.
3. En el nivel tres se muestran las actividades que conforman la etapa de planeación y la etapa de ejecución.
 - En la actividad de planeación (a la izquierda) se colocaron las actividades de diagnóstico y análisis, gestión administrativa, fabricación, traslado y almacén.
 - En la actividad de ejecución (a la derecha), en lugar de nombrar cada una de las actividades propias de esta etapa (desmontaje, fabricación, reparación, blindaje y picote, alineación y nivelación, montaje, gramilación, asentamiento, ajuste, acoplamiento y pruebas) sólo se colocó el rubro “*Actividades de ejecución*”, del molino 1 al molino 6. Las actividades que se muestran en los niveles 4, 5 y 6 de la WBS (Figura 3.6) sólo conforman a las *Actividades de ejecución del Molino 4*, debido a que son las mismas actividades para los demás molinos.
4. En el nivel cuatro se colocó a la izquierda el rubro “*Actividades de diagnóstico y análisis del Molino 1 a 6*” (para representar a las actividades diagnóstico y análisis), además de las actividades solicitud de pedido, presupuesto, fabricación (interna y/o externa), mantenimiento y traslado de pedido. A la derecha, se colocaron las actividades de desmontaje, montaje y pruebas e inspección.

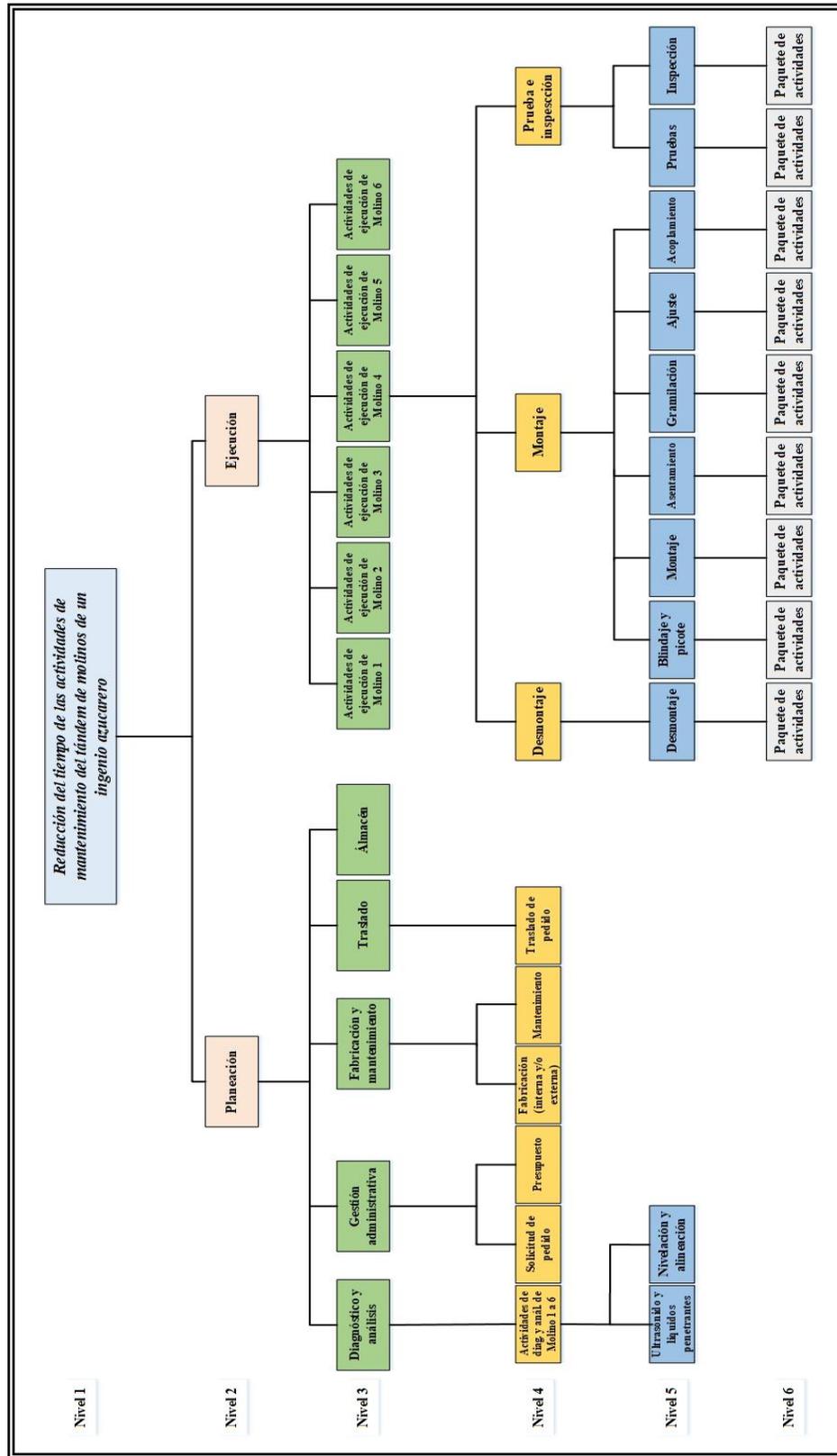


Figura 3. 6 WBS gráfica, en forma de organigrama (Elaboración propia).

5. En el nivel cinco se muestran las actividades de mantenimiento de la siguiente manera (de izquierda a derecha):
 - Las actividades de ultrasonido y líquidos penetrantes y nivelación y alineación, que conforman a la actividad “*Actividades de diagnóstico y análisis del Molino 1 a 6*” del nivel cuatro.
 - La actividad de desmontaje, que conforman a la actividad “*Desmontaje*” del nivel cuatro.
 - Las actividades de blindaje y picote, montaje, asentamiento, gramilación, ajuste y acoplamiento, que pertenecen a la actividad “*Montaje*” del nivel cuatro.
 - Las actividades de pruebas e inspección, que conforman a la actividad “*Prueba e inspección*” del nivel cuatro.
6. En el nivel seis se colocó sólo el rubro “*Paquete de actividades*” para representar a las actividades que conforman el nivel cinco de la WBS; estas actividades se describirán con mayor grado de detalle en la Sección 3.6.2.

En esencia, la WBS permitió visualizar de manera global el proyecto y generó una idea de las precedencias y secuencias de las actividades de mantenimiento del tándem de molinos (Sección 3.6.2).

3.6 Determinar el tiempo de terminación de las actividades de mantenimiento, antes de la mejora propuesta

En esta sección se determinó y documentó el tiempo de terminación actual (año 2016) de las actividades de mantenimiento del tándem de molinos, con el fin de obtener un parámetro de comparación entre el tiempo de terminación actual de las actividades de mantenimiento y el tiempo de terminación de las actividades después de implementar las mejoras.

En esta sección se aplicaron las siguientes técnicas de ingeniería industrial:

- Técnica de la Ruta Crítica (*CPM*), para desarrollar la planificación del proyecto.
- Técnica de Evaluación y Revisión de Proyectos (*PERT*), para estimar tiempos.

- Simulación de Monte Carlo, para expresar como distribuciones de probabilidad valores inciertos de las estimaciones de los tiempos.

Los pasos para determinar el tiempo de terminación actual de las actividades de mantenimiento, antes de implementar las mejoras, son los siguientes:

1. Definir consideraciones para la planificación del proyecto.
2. Realizar una lista de paquetes de actividades de mantenimiento.
3. Establecer las precedencias y secuencias de los paquetes de actividades de mantenimiento con *Project*.
4. Crear la red de los paquetes de actividades de mantenimiento con *Project*.
5. Introducir las estimaciones de tiempos óptimos, medios y pésimos de los paquetes de actividades de mantenimiento en *Project*.
6. Determinar la ruta crítica del proyecto con *Project*.
7. Realizar simulación de Monte Carlo.

3.6.1 Definir consideraciones para la planificación del proyecto

Para evitar imprecisiones en la planificación del proyecto “*Reducción del tiempo de las actividades de mantenimiento del tándem de molinos de un ingenio azucarero*”, fue necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones, basadas en la experiencia de expertos en el mantenimiento del tándem:

- Toda acción realizada buscará la reducción del tiempo de las actividades de mantenimiento del tándem de molinos.
- La zafra comenzará a principios del mes de diciembre y terminará en el mes de mayo, del año siguiente.
- El periodo de mantenimiento comenzará en el mes de junio del 2016 y terminará en el mes de noviembre del mismo año (100 días hábiles).
- Durante el periodo de mantenimiento se trabajarán dos turnos de 8 horas, 5 días a la semana.

- El desmontaje se realizará del molino 1 al molino 6, a pesar de no existir un orden para desmontar los seis molinos del tándem.
- Se considerará que el montaje de los molinos se realizará en el siguiente orden: molino 1, molino 6, molino 5, molino 2, molino 3 y molino 4.
- Se ocupará una grúa viajera con capacidad de 30 y 10 toneladas para trasladar los componentes de los molinos.
- No se tomarán en cuenta los costos de las actividades.
- No se tomarán en cuenta proveedores externos.
- No se tomarán en cuenta los recursos de mano de obra.

3.6.2 Realizar una lista de paquetes de actividades de mantenimiento

Después de definir las consideraciones para la planificación del proyecto (Sección 3.6.1), se realizó una lista de “*paquetes de actividades*” de mantenimiento para identificar cuáles paquetes eran necesarios para el cumplimiento del proyecto. Para ello, se tuvieron pláticas con expertos en el mantenimiento del tándem y se investigó información en algunos archivos (Sección 3.3.4.2). Para realizar la lista de los paquetes de actividades de mantenimiento se efectuaron las siguientes acciones:

1. Registro de las actividades de mantenimiento del tándem.

La Tabla 3.13 muestra, en la tercera columna, algunas de las actividades de mantenimiento de un total de 1,023, las cuales fueron registradas en un archivo que se describe en el Anexo 5 (Archivo A5.1).

Un punto importante para señalar en el presente trabajo se dio en el registro de las actividades de mantenimiento. De acuerdo con los expertos en el mantenimiento del tándem, a medida que se desmontan los componentes del molino se inician actividades de mantenimiento (revisión, valoración, limpieza y reparación) o actividades de fabricación de componentes; sin embargo, debido a la acidez, corrosión y abrasión que genera el jugo de caña no se puede predecir qué componentes saldrán dañados o inservibles después del periodo de zafra, por lo que es difícil determinar cuántos componentes se mandarán a fabricar, cuantos componentes se mandarán a

mantenimiento y en qué tiempo estarán listos los componentes para su montaje (provocando en muchas ocasiones retrasos, mayores costos, más mano de obra, etc.). Para dar solución a este problema, se planteó un escenario ideal para las actividades de fabricación y mantenimiento de los componentes teniendo en cuenta lo siguiente:

- Los talleres externos y el ingenio azucarero tendrán la maquinaria, personal, materiales, etc., para fabricar los componentes del molino.
- El ingenio azucarero tendrá la maquinaria, personal, materiales, etc., para dar mantenimiento a los componentes del molino.

El planteamiento del escenario ideal tuvo como objetivo determinar la cantidad de componentes que se fabricarán, la cantidad de componentes a los que se dará mantenimiento y el tiempo que se tardarán en realizar cada una de ellas, utilizando la estadística juntamente con la experiencia de los expertos en el mantenimiento para validar este escenario. Por esta razón, para englobar a la fabricación y el mantenimiento ideal de los componentes se nombraron “Fabricación interna y/o externa” y “Mantenimiento”, respectivamente (Tabla 3.13). En la Sección 3.6.5 se mostrarán las acciones que se realizarán para determinar la cantidad de componentes a fabricar, la cantidad de componentes a dar mantenimiento y los tiempos.

Tabla 3. 13 Lista de algunas actividades de mantenimiento (Elaboración propia).

No. de actividad	Componente	Actividades
1		Presupuesto
2		Fabricación (interna y/o externa)
3		Mantenimiento
4		Traslado de pedido
5	Molino 1	Ultrasonido y líquidos penetrantes
:	:	:
:	:	:
:	:	:
1,019	Molino 6	Montaje de pasillos y barandales
1,020	Molino 6	Asentamiento de raspador superior tipo L
1,021	Molino 6	Asentamiento de raspador inferior bagacero
1,022	Molino 6	Inspección de líneas de presión hidráulicas
1,023	Molino 6	Inspección de líneas de lubricación y enfriamiento

2. Agrupación de las actividades de mantenimiento en paquetes.

Debido a la enorme cantidad de actividades de mantenimiento registradas (1,023 actividades) se optó por agruparlas en “paquetes”, con base en la función que desempeñan, para reducir la cantidad de actividades de mantenimiento a utilizar en la planificación del proyecto, porque sería difícil establecer una secuencia lógica de las actividades del proyecto (a realizarse en la Sección 3.6.3) y al mismo tiempo difícil construir una red (a realizarse en la Sección 3.6.4).

Un ejemplo de la agrupación de las actividades de mantenimiento se muestra en la Tabla 3.14. Las actividades sombreadas en color gris representan paquetes de actividades y las actividades no sombreadas actividades secundarias; por ejemplo, las actividades secundarias numeradas de la fila 96 y fila 97 de *Excel* forman un grupo representado por la actividad principal “Desmontaje de líneas de presión hidráulica” numerada en la fila 95. Las agrupaciones de las actividades en paquetes se registraron en un archivo que se describe en el Anexo 5 (Archivo A5.2).

3. Conjunción de los paquetes de actividades de mantenimiento.

Una vez agrupadas las actividades de mantenimiento en paquetes se generó una lista que muestra los 543 paquetes de actividades conjuntados. La Tabla 3.15 muestra un ejemplo de varios paquetes de actividades; dos de ellos se mostraron en la Tabla 3.14. La lista con los 543 paquetes de actividades conjuntados se describe en el Anexo 5 (Archivo A5.3).

Tabla 3. 14 Ejemplo de agrupación de actividades de mantenimiento en paquetes (Elaboración propia).

No. fila en <i>Excel</i>	No. de actividad	Componentes	Paquetes de actividades y actividades secundarias
95	28	Molino 6	Desmontaje de líneas de presión hidráulica
96		Molino 6	Desmontaje de líneas de presión hidráulica izquierdo
97		Molino 6	Desmontaje de líneas de presión hidráulica derecho
98	29	Molino 1	Desmontaje de elementos para maceración
99		Molino 1	Desmontaje de campana de maceración
100		Molino 1	Desmontaje de línea de maceración

Tabla 3. 15 Ejemplo de paquetes de actividades de mantenimiento (Elaboración propia).

No. de actividad	Componentes	Paquetes de actividades
26	Molino 4	Desmontaje de líneas de lubricación y enfriamiento
27	Molino 5	Desmontaje de líneas de lubricación y enfriamiento
28	Molino 6	Desmontaje de líneas de presión hidráulica
29	Molino 1	Desmontaje de elementos para maceración
:	:	:
:	:	:
:	:	:
541	Molino 3	Pruebas del conductor donelly
542	Molino 4	Pruebas del conductor donelly
543	Molino 5	Pruebas del conductor donelly

3.6.3 Establecer precedencias y secuencias de los paquetes de actividades de mantenimiento con *Project*

Una vez realizada la lista de paquetes de actividades de mantenimiento (Sección 3.6.2) se establecieron las precedencias y secuencias de los paquetes de actividades usando el *software Project*, para ello, en esta sección se realizaron las siguientes acciones:

1. Definir el periodo laboral del proyecto.
2. Introducir actividades y paquetes de actividades de mantenimiento a la hoja de *Project*.
3. Establecer precedencias y secuencias de los paquetes de actividades de mantenimiento.

3.6.3.1 Definir periodo laboral del proyecto

Para definir el periodo laboral que mejor se adaptó al trabajo realizado en el periodo de mantenimiento del tándem: calendarios, semanas laborales, días laborales, horas laborales, unidades de tiempo (meses, semanas, días, horas, minutos); se realizaron los siguientes pasos en *Project*:

1. Dar clic en la pestaña *Herramientas* para escoger la opción *Cambiar calendario laboral* (Figura 3.7).

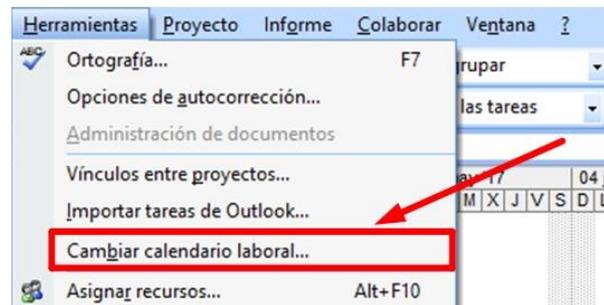


Figura 3. 7 Pestaña *Herramientas* resaltando la opción *Cambiar calendario laboral* (Elaboración propia).

2. Seleccionar la opción *Crear calendario* de la ventana emergente (Figura 3.8). En la ventana *Crear nuevo calendario base* (Figura 3.9) se realizó lo siguiente:
 - A. Se creó un nuevo calendario base (principal) bajo el cual se desarrolló el proyecto.
 - B. Se nombró el nuevo calendario base: “*Mantenimiento de actividades del tándem*”.
3. Dar clic en la ficha *Semanas laborales* para poder seleccionar la opción *Detalles* de la ventana *Cambiar calendario laboral* (Figura 3.8). Una vez en la ventana de detalles (Figura 3.10) se realizaron los siguientes pasos:
 - A. Se seleccionaron los días laborales de la semana: de lunes a viernes.
 - B. Se seleccionó la opción “*Establecer día(s) en estos periodos laborales específicos*” para cambiar el horario laboral de los días seleccionados.
 - C. Se especificó el horario laboral del proyecto: desde 7 a.m. hasta 11 p.m.
4. Dar clic en *Opciones* de la ventana *Cambiar calendario laboral* (Figura 3.8) y después dar clic en *Calendario* (Figura 3.11) para cambiar los valores predeterminados que tiene *Project* por los valores basados en el nuevo calendario base del proyecto:
 - A. Horario predeterminado de entrada: 7 a.m.
 - B. Horario predeterminado de salida: 11 p.m.
 - C. Jornada laboral: 16 horas.
 - D. Semana laboral: 80 horas.
 - E. Días por mes: 20 días.

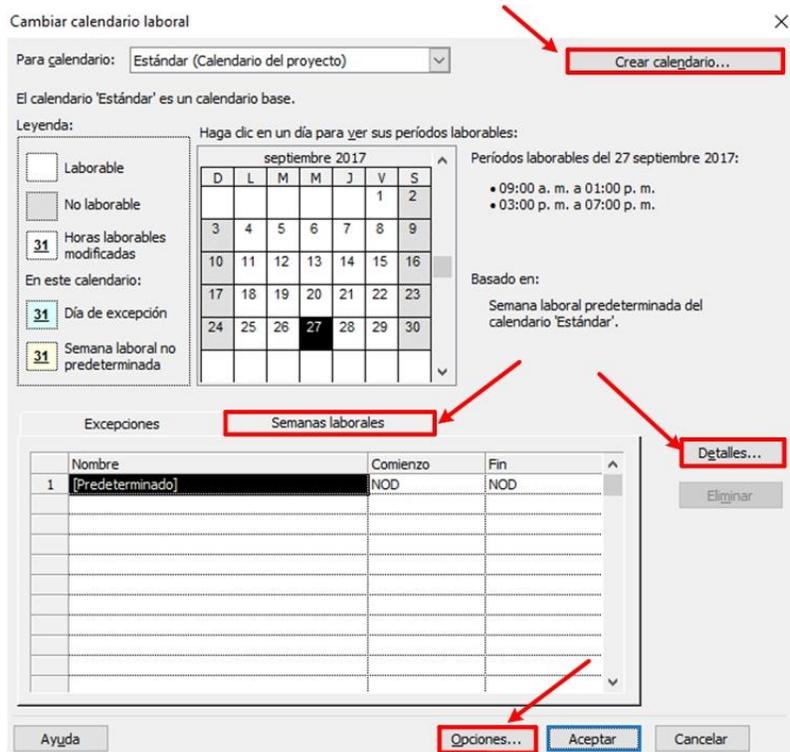


Figura 3. 8 Ventana *Cambiar calendario laboral* con las opciones *Crear calendario* (paso 2), *Semanas laborales* y *Detalles* (paso 3) y *Opciones* (paso 4) (Elaboración propia).

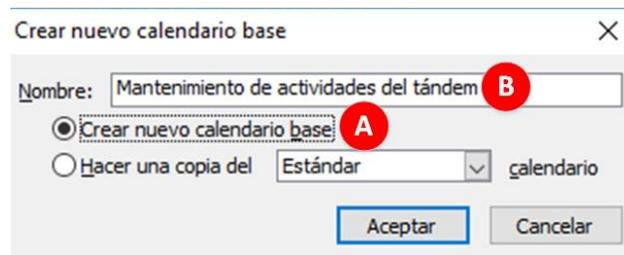


Figura 3. 9 Ventana *Crear nuevo calendario base* (Elaboración propia).

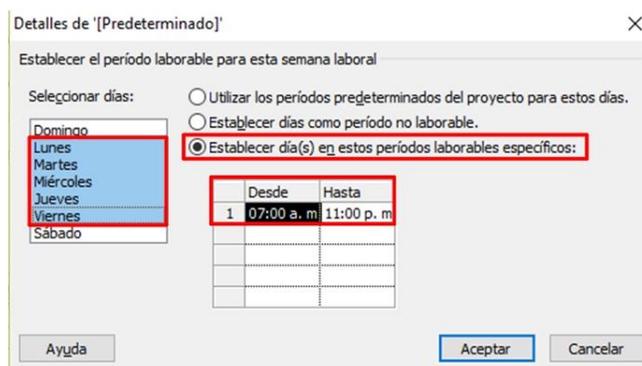


Figura 3. 10 Ventana *Detalles* con días y horario laboral (Elaboración propia).

Figura 3. 11 Ventana “*Opciones* y horario laboral del nuevo calendario base del proyecto (Elaboración propia).

5. Dar clic en la pestaña *Proyecto* (interfaz principal) para seleccionar la opción *Información del proyecto* (Figura 3.12). En la ventana resultante (Figura 3.13) se seleccionó la fecha de comienzo del proyecto (lun 13/06/16) y se seleccionó el nuevo calendario base del proyecto que se creó: “*Mantenimiento de actividades del tándem*”.
6. Hacer clic derecho en la escala de tiempo de *Project* (Figura 3.14), ubicada en el área del diagrama, y seleccionar del *pop up* emergente la opción *Escala temporal*. En la ventana *Escala temporal* (Figura 3.15) hacer clic en la pestaña *Periodo no laborable* y cambiar el calendario predeterminado *Estándar* por el nuevo calendario base del proyecto: “*Mantenimiento de actividades del tándem*”.

3.6.3.2 Introducir las actividades y paquetes de actividades de mantenimiento a la hoja de *Project*

Para introducir los paquetes de actividades de mantenimiento (Sección 3.6.2) se realizó una estructura del proyecto en *Project*, apoyada de la *WBS* gráfica (Sección 3.5.2). La estructura del proyecto se conformó de seis niveles que incluyeron el nombre del proyecto, las actividades de mantenimiento y los paquetes de actividades. Esta estructura con sus seis niveles se muestra en un archivo que se describe en el Anexo 5 (Archivo A5.4).

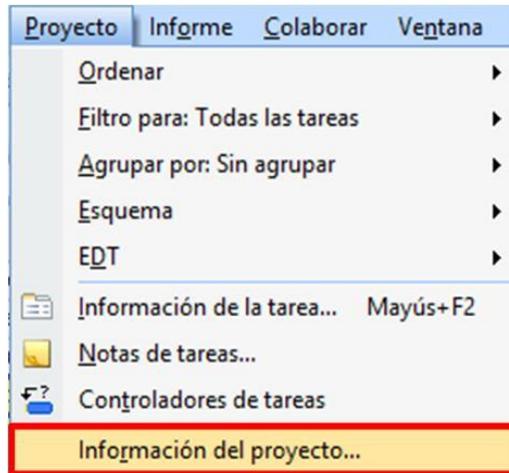


Figura 3. 12 Opción *Información del proyecto* (Elaboración propia).

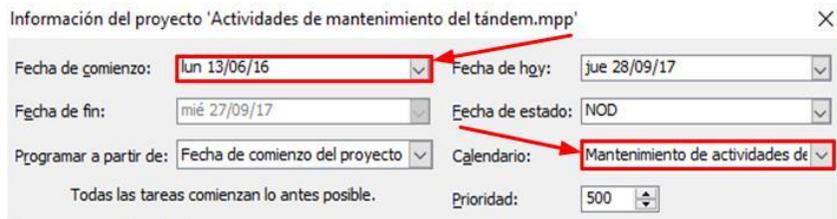


Figura 3. 13 Selección de la fecha de comienzo y calendario base del proyecto (Elaboración propia).

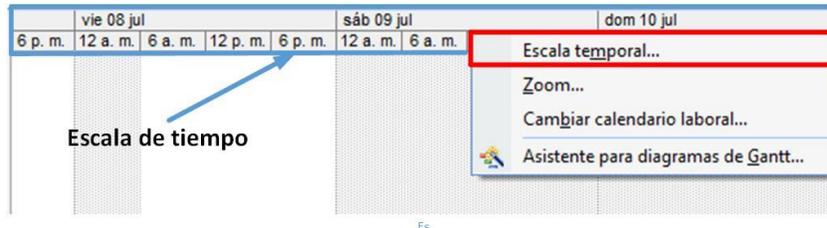


Figura 3. 14 Escala de tiempo del proyecto y el *pop up* emergente resaltando “Escala temporal” (Elaboración propia).

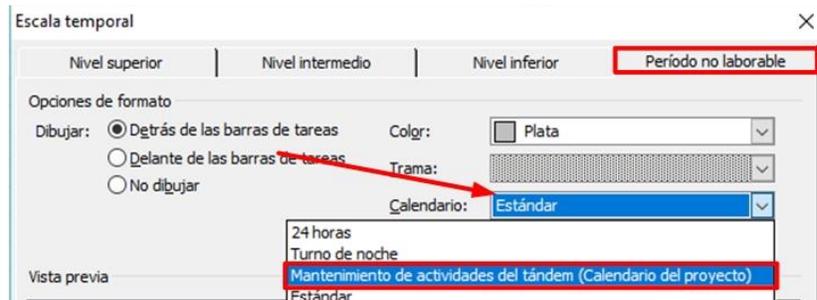


Figura 3. 15 Ventana “Escala temporal” (Elaboración propia).

El desarrollo por niveles para realizar la estructura del proyecto fue el siguiente:

1. En el nivel 1, en la hoja de *Project*, en el campo *Nombre de tarea* (Figura 3.16) se escribió el nombre del proyecto “*Reducción del tiempo de las actividades de mantenimiento*” para representar el nivel principal de la estructura del proyecto.
2. En el nivel 2, en la hoja de *Project*, en las filas 2 a 5, se escribieron las actividades de planeación, receso, ejecución e inicio de zafra (Figura 3.17). Una vez escritas las actividades, se realizaron las siguientes dos acciones:
 - A. Se seleccionaron las cuatro actividades: planeación, receso, ejecución e inicio de zafra.
 - B. Se dio clic a la opción *Aplicar sangría* (Figura 3.18), ubicada en la barra de herramientas, para mover las cuatro actividades seleccionadas al nivel 2 de la estructura del proyecto.

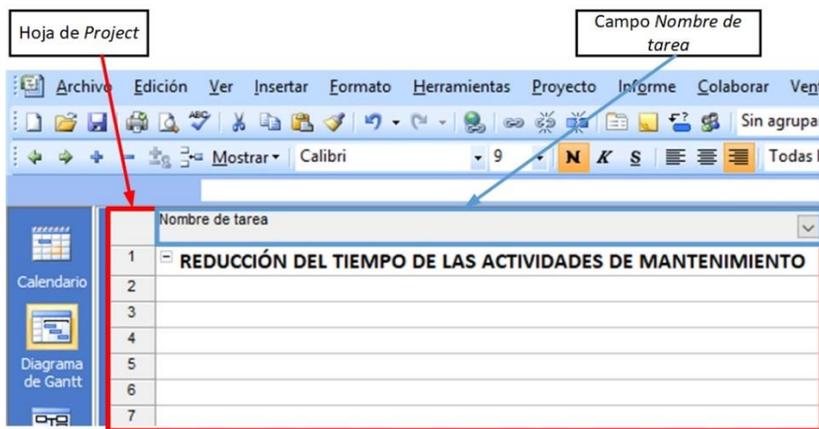


Figura 3. 16 Campo *Nombre de tarea* y nivel 1 “*Reducción del tiempo de las actividades de mantenimiento*” de la estructura del proyecto (Elaboración propia).

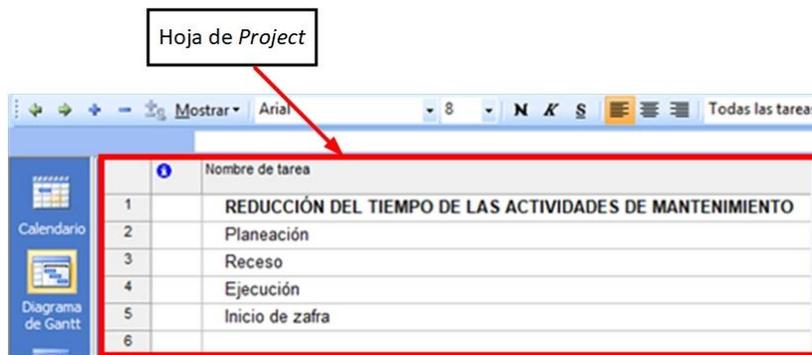


Figura 3. 17 Actividades de planeación, receso, ejecución e inicio de zafra (Elaboración propia).

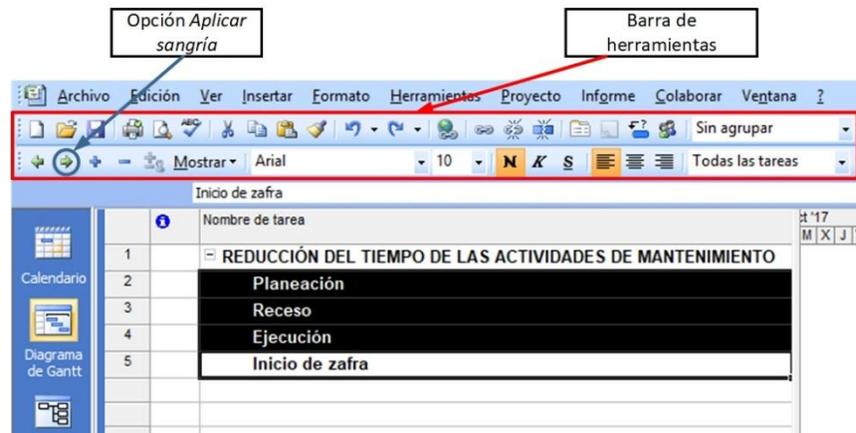


Figura 3. 18 Opción *Aplicar sangría* y actividades: planeación, receso, ejecución e inicio de zafra; del nivel 2 de la estructura (Elaboración propia).

3. En el nivel 3, se realizaron las siguientes acciones:
 - A. Se seleccionó la actividad “Receso” (Figura 3.19).
 - B. Se dio clic a la opción *Nueva tarea* para crear nuevas filas debajo de la actividad “Receso” (Figura 3.20).
 - C. Se repitieron los dos pasos anteriores para las actividades “Ejecución” e “Inicio de zafra”. La Figura 3.20 muestra el resultado.
 - D. Se introdujeron las siguientes actividades en las nuevas filas del nivel 3:
 - a. Para la actividad “Planeación” (nivel 2) se introdujeron las actividades de diagnóstico y análisis, gestión administrativa, fabricación y mantenimiento y traslado.
 - b. Para la actividad “Receso” (nivel 2) se introdujeron las actividades de fin de zafra (hito inicial) y receso.
 - c. Para la actividad “Ejecución” (nivel 2) se introdujeron las actividades con el rubro “Actividades de ejecución” del molino 1 a 6.
 - d. Para la actividad “Inicio de zafra” (nivel 2) se introdujo la actividad de inicio de zafra (el hito final).
 - E. Se seleccionaron las actividades introducidas (acción D) y se dio clic en la opción *Aplicar sangría* para mover las actividades al nivel 3. La Figura 3.21 muestra el resultado final.

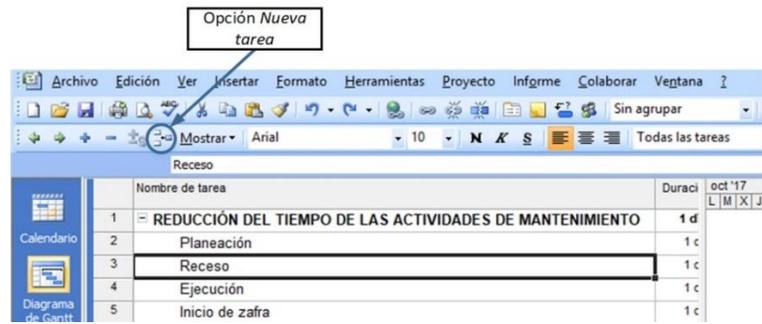


Figura 3. 19 Opción *Nueva tarea* para ingresar filas entre las actividades de planeación, receso, ejecución e inicio de zafra (Elaboración propia).

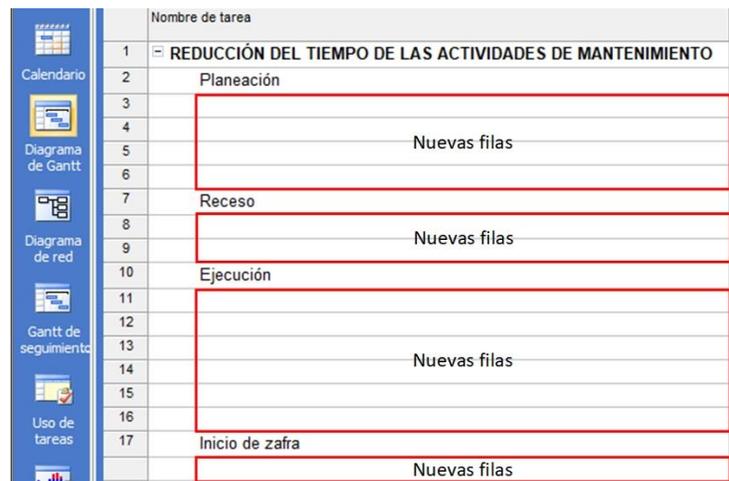


Figura 3. 20 Filas creadas con la opción *Nuevas tareas* (Elaboración propia).

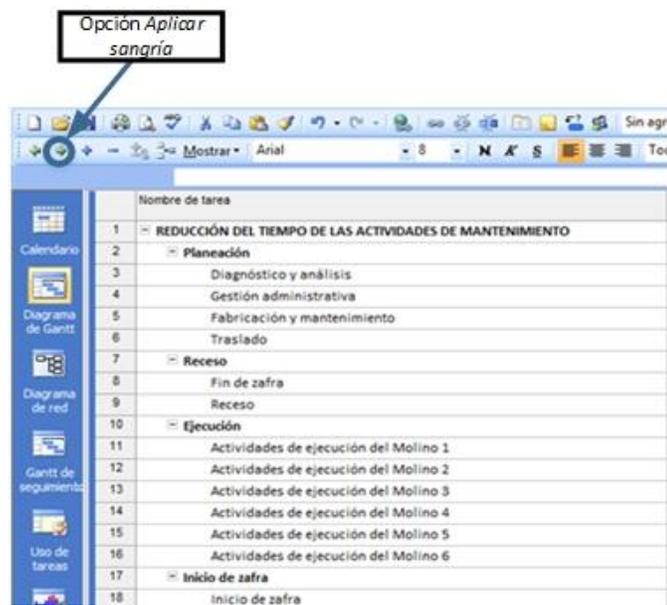


Figura 3. 21 Resultado final para las actividades del nivel 3 (Elaboración propia).

4. En el nivel 4, así como en los niveles 5 y 6, se ejecutaron las acciones A, B, C y E descritas en el paso 3 -respecto a la selección de las actividades para la creación de nuevas filas y a la aplicación de sangría-.

Algunas de las actividades que se introdujeron en el nivel 4 fueron las siguientes:

- A. Para la actividad “Diagnóstico y análisis” (nivel 3) se introdujeron las actividades con el rubro “Actividades de diagnóstico y análisis” del molino 1 al molino 6.
- B. Para la actividad “Gestión administrativa” (nivel 3) se introdujeron las actividades de solicitud de pedido y presupuesto.
- C. Para la actividad “Fabricación y mantenimiento” (nivel 3) se introdujeron dos actividades: fabricación (interna y/o externa) y mantenimiento.
- D. Para la actividad “Traslado” (nivel 3) sólo se introdujo la actividad de traslado de pedido.
- E. Para las actividades con el rubro “Actividades de ejecución” de los molinos 1 a 6 (nivel 3) se introdujeron las actividades de desmontaje, montaje y pruebas e inspección.

La Figura 3.22 muestra parte de las actividades del nivel 4, después de haber seleccionado la opción *Aplicar sangría*.

Nombre de tarea	
1	REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE LAS ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO
2	Planeación
3	Diagnóstico y análisis
4	Actividades de diagnóstico y análisis del Molino 1
5	Actividades de diagnóstico y análisis del Molino 2
6	Actividades de diagnóstico y análisis del Molino 3
7	Actividades de diagnóstico y análisis del Molino 4
8	Actividades de diagnóstico y análisis del Molino 5
9	Actividades de diagnóstico y análisis del Molino 6
10	Gestión administrativa
11	Solicitud de pedido
12	Presupuesto
13	Fabricación y mantenimiento
14	Fabricación (interna y/o externa)
15	Mantenimiento
16	Traslado
17	Traslado de pedido
18	Receso
19	Fin de zafra
20	Receso
21	Ejecución
22	Actividades de ejecución del Molino 1
23	Desmontaje
24	Montaje
25	Prueba e inspección
26	Actividades de ejecución del Molino 2
27	Desmontaje

Figura 3. 22 Parte de las actividades del nivel 4 de la estructura del proyecto (Elaboración propia).

5. Algunas de las actividades que se introdujeron en el nivel 5 fueron las siguientes:
- Para las actividades con el rubro “Actividades de diagnóstico y análisis” de los molinos 1 a 6 (nivel 4) se introdujeron las actividades de ultrasonido y líquidos penetrantes, y nivelación y alineación.
 - Para la actividad “Desmontaje” (nivel 4) sólo se introdujo la actividad desmontaje.
 - Para la actividad “Montaje” (nivel 4) se introdujeron las actividades de blindaje y picote, montaje, asentamiento, ajuste, gramilación y acoplamiento.
 - Para la actividad “Prueba e inspección” (nivel 4) se introdujo la actividad de prueba e inspección.

Al final se seleccionaron las actividades introducidas y se dio clic en la opción *Aplicar sangría* para mover las actividades al nivel 5. La Figura 3.23 muestra parte de las actividades del nivel 5.

6. En el nivel 6, se introdujeron los paquetes de actividades de mantenimiento (544 paquetes), específicamente se introdujeron en todas las actividades del nivel 5 que pertenecen a la actividad “Ejecución” (nivel 2). La Figura 3.24 muestra algunos de los paquetes de actividades (fila 35 a fila 56) que se introdujeron en la actividad “Desmontaje” del nivel 5.

Nombre de tarea	
1	- REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE LAS ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO
2	- Planeación
3	- Diagnóstico y análisis
4	- Actividades de diagnóstico y análisis del Molino 1
5	Ultrasonido y líquidos penetrantes
6	Nivelación y alineación
7	+ Actividades de diagnóstico y análisis del Molino 2
10	+ Actividades de diagnóstico y análisis del Molino 3
13	+ Actividades de diagnóstico y análisis del Molino 4
16	+ Actividades de diagnóstico y análisis del Molino 5
19	+ Actividades de diagnóstico y análisis del Molino 6
21	+ Gestión administrativa
24	+ Fabricación y mantenimiento
27	+ Traslado
29	+ Receso
32	- Ejecución
33	- Actividades de ejecución del Molino 1
34	- Desmontaje
35	Desmontaje
36	- Montaje
37	Blindaje y picote
38	Montaje
39	Asentamiento
40	Ajuste
41	Gramilación
42	Acoplamiento
43	- Prueba e inspección
44	Prueba e inspección

Figura 3. 23 Parte de las actividades del nivel 5 de la estructura del proyecto (Elaboración propia).

Nombre de tarea	
1	REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE LAS ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO
2	Planeación
29	Receso
32	Ejecución
33	Actividades de ejecución del Molino 1
34	Desmontaje
35	Desmontaje
36	Desmontaje de pasillos y barandales
37	Desmontaje de líneas de lubricación y enfriamiento
38	Desmontaje de líneas de presión hidráulica
39	Desmontaje de elementos para maceración
40	Desmontaje de raspador inferior bagacero
41	Desmontaje de raspador superior tipo L
42	Desmontaje de conductores donelly
43	Desmontaje del shute
44	Desmontaje de cople flexible
45	Desmontaje de cabezotes
46	Desmontaje de chumaceras integrales
47	Desmontaje de maza superior
48	Desmontaje de corona transmisión superior
49	Desmontaje de corona p/mov de 4ta. Maza
50	Desmontaje de bridas
51	Desmontaje de chumaceras de reposo
52	Desmontaje de 4ta. maza
53	Desmontaje de corona de 4ta. Maza
54	Desmontaje de chumaceras de 4ta. Maza
55	Desmontaje de botas
56	Desmontaje de tornillos de bisagras cañeras

Figura 3. 24 Parte de las actividades del nivel 6 de la estructura del proyecto (Elaboración propia).

Para tener una mejor perspectiva de las actividades que se introdujeron en los seis niveles de la estructura del proyecto, la Tabla 3.16 muestra, en la columna 1, los seis niveles que conforman la estructura y, en la columna 2, algunas de las actividades introducidas en cada nivel incluyendo los paquetes de actividades de mantenimiento introducidos el nivel 6.

3.6.3.3 Establecer precedencias y secuencias de los paquetes de actividades de mantenimiento

Una vez introducidos los paquetes de actividades de mantenimiento en *Project* (Sección 3.6.3.2), se agregaron dos columnas para establecer las precedencias y secuencias de los paquetes de actividades mediante las siguientes acciones:

1. Se hizo clic derecho en el campo *Nombre de tarea* (Figura 3.25), de la hoja de *Project*.
2. Se seleccionó del *pop up* emergente la opción *Insertar columna* (Figura 3.25).
3. Se hizo clic en la lista despegable *Nombre de campo*, de la ventana *Definición de columna* (Figura 3.26) y se seleccionó la columna “Predecesoras” para introducirla a la hoja de *Project*.

Tabla 3. 16 Niveles, actividades y paquetes de actividades de la estructura del proyecto (Elaboración propia).

Niveles	Actividades y paquetes de actividades de mantenimiento
1	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción del tiempo de las actividades de mantenimiento del tándem de molinos.
2	<ul style="list-style-type: none"> • Planeación. • Receso. • Ejecución. • Inicio de zafra.
3	<ul style="list-style-type: none"> • Diagnóstico y análisis. • Gestión administrativa. • Fabricación y mantenimiento. • Traslado. • Fin de zafra. • Receso. • Actividades de ejecución del Molino 1 al Molino 6. • Inicio de zafra.
4	<ul style="list-style-type: none"> • Actividades de diagnóstico y análisis del Molino 1 al Molino 6. • Solicitud de pedido. • Presupuesto. • Fabricación (interna y/o externa) • Mantenimiento. • Traslado de pedido. • Desmontaje (molino 1 a 6). • Montaje (molino 1 a 6). • Prueba e inspección (molino 1 a 6).
5	<ul style="list-style-type: none"> • Ultrasonido y líquidos penetrantes (molino 1 a 6). • Nivelación y alineación (molino 1 a 6). • Desmontaje (molino 1 a 6). • Blindaje y picote (molino 1 a 6). • Montaje (molino 1 a 6). • Asentamiento (molino 1 a 6). • Ajuste (molino 1 a 6). • Gramilación (molino 1 a 6). • Acoplamiento (molino 1 a 6). • Prueba e inspección (molino 1 a 6).
6	<ul style="list-style-type: none"> • Paquetes de actividades de mantenimiento.

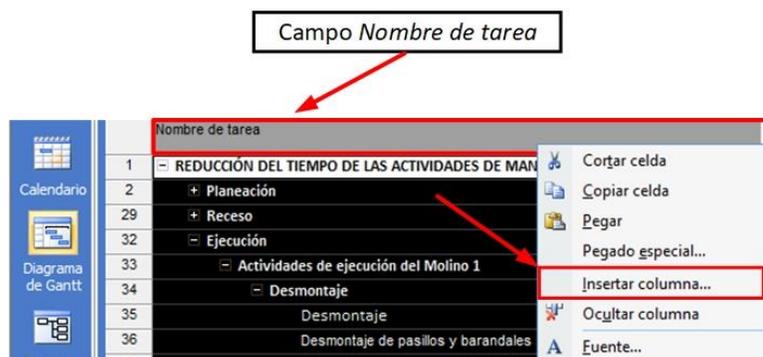


Figura 3. 25 Campo Nombre de tarea y el pop up emergente con la opción Insertar columna (Elaboración propia).

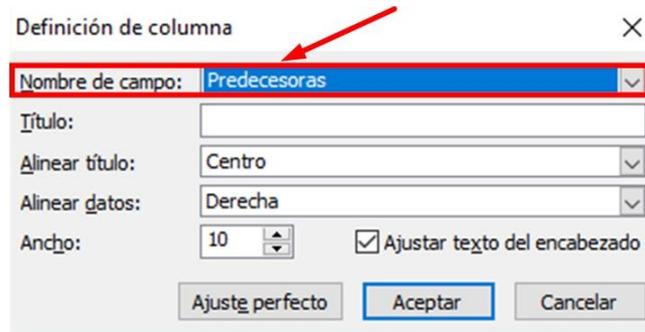


Figura 3. 26 Ventana *Definición de columna* y selección de columna “Predecesoras” (Elaboración propia).

4. Se hizo clic en la lista despegable *Nombre de campo*, de la ventana *Definición de columna* (Figura 3.26) y se seleccionó la columna “Sucesoras” para introducirla a la hoja de *Project*. La Figura 3.27 muestra el resultado.

Después de haber insertado las columnas “Predecesoras” y “Sucesoras (Figura 3.27), con base en la descripción del proceso de mantenimiento del tándem de molinos (Sección 3.3.3.1) y las consideraciones para la planificación del proyecto (Sección 3.6.1), se establecieron las precedencias y secuencias de los paquetes de actividades ejecutando los siguientes pasos:

1. Seleccionar un paquete de actividad de mantenimiento (Figura 3.28) y hacer clic sobre el paquete.
2. Efectuar las siguientes preguntas como apoyo para identificar el(los) paquete(s) de actividad(es) predecesor(es) de la actividad seleccionada (Sección 2.1.4.1):
 - A. ¿Qué actividades deben quedar terminadas antes de que se pueda iniciar esta actividad?
 - B. ¿Cuáles actividades se pueden llevar a cabo simultáneamente?
 - C. ¿Cuáles actividades dependen de la terminación de esta actividad?
3. Introducir en la celda de la columna “Predecesoras” del paquete de actividad seleccionado (Figura 3.28), el número de identificación del(los) paquete(s) de actividad(es) predecesor(es) identificado en el paso anterior.
4. Repetir los pasos 1, 2 y 3 para todos los paquetes de actividades pendientes por establecer su precedencia y secuencia de paquetes.

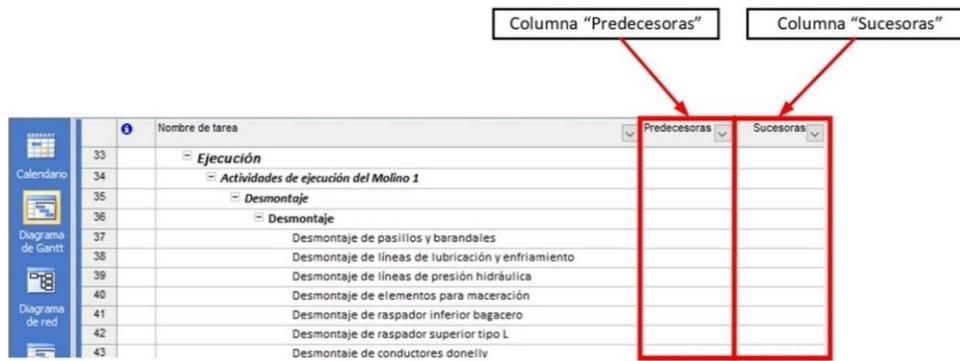


Figura 3. 27 Columna “Predecesoras” y columna “Sucesoras” (Elaboración propia).

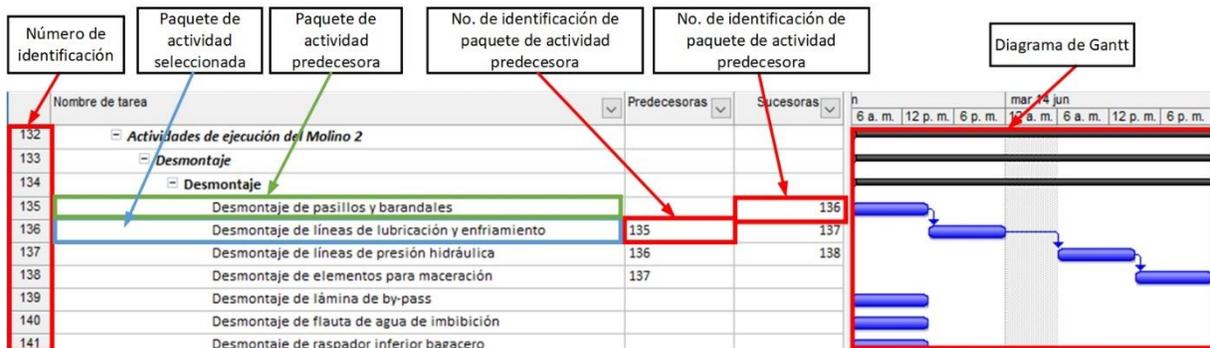


Figura 3. 28 Paquetes de actividades con sus precedencias (Elaboración propia).

De manera general, las precedencias y secuencias se establecieron como se muestra a continuación:

1. Se realizó el desmontaje de componentes, del molino 1 al 6, de la siguiente manera:
 - A. Se desmontaron los componentes secundarios de cada molino: pasillos y barandales, líneas de lubricación y enfriamiento, líneas de presión hidráulica, elementos para maceración, láminas de by-pass, flautas de agua de imbibición.
 - B. Se desmontó el raspador inferior bagacero de cada molino, para poder desmontar el conductor donelly.
 - C. Se desmontaron los cinco conductores donelly.
 - D. Se desmontaron los componentes primarios de cada molino: cople, shute, cuarta maza, cabezotes hidráulicos, chumaceras integrales, maza superior, botas, chumaceras de reposo, raspador superior tipo L, tornillos de bisagras cañeras y bagaceras, sellos de jugo cañeros, maza cañera, sellos de jugo bagaceros, maza bagacera, cuchilla central, perno excéntrico, puente de cuchilla central, soporte

del puente de cuchilla central, coronas, bridas, tapas de chumaceras, chumaceras cañeras, chumaceras bagaceras, y silletas cañeras y bagaceras.

2. Se realizó un diagnóstico mediante ultrasonido y líquidos penetrantes a las mazas cañeras, bagaceras y superiores.
3. Se realizó un análisis de las vírgenes de los molinos, nivelando y alineando las mismas.
4. Se hizo la solicitud de pedido de componentes y se trabajó en el presupuesto
5. Se realizó la fabricación y mantenimiento de los componentes.
6. Se hizo el traslado de los componentes de los talleres externos.
7. Se realizó el montaje de los componentes, iniciando con el molino 1, siguiendo con los molinos 6, 5, 2, 3 y terminando con el 4. El montaje fue el siguiente:
 - A. Se montaron los componentes primarios de cada molino (punto 1, inciso D).
 - B. Se montaron los cinco conductores donelly.
 - C. Se montaron los raspadores inferiores bagaceros.
 - D. Se montaron los componentes secundarios de cada molino (punto 1, inciso A).
8. Se ejecutaron las pruebas e inspecciones de las líneas de lubricación y enfriamiento, las líneas de presión hidráulicas y de los conductores donelly.

Debido a la cantidad de paquetes de actividades de mantenimiento, realizar el establecimiento de precedencias en la vista “Diagrama de Gantt” de *Project* se volvió una tarea muy difícil. Por esta razón, para facilitar esta acción, se utilizó la vista “Diagrama de relaciones” de *Project* para observar y centrarse en las precedencias y secuencias del paquete de actividad seleccionado.

La vista “Diagrama de relaciones” se utilizó en conjunto con la vista “Diagrama de Gantt” para revisar la información del proyecto de dos maneras diferentes al mismo tiempo, realizando las siguientes acciones:

1. Se dio clic en la pestaña *Ventana* para escoger la opción *Dividir* (Figura 3.29). Una vez dividida la pantalla de *Project*, se hizo clic en cualquier punto de la sección inferior (Figura 3.30).
2. Se hizo clic en la pestaña *Ver* y se seleccionó la opción *Mas vistas* (Figura 3.31). En la ventana emergente “*Mas vistas*” (Figura 3.32) se escogió la vista *Diagrama de relaciones* y se dio clic al botón *Aplicar*.

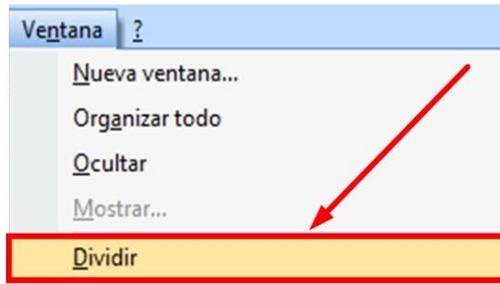


Figura 3. 29 Pestaña *Ventana* resaltando la opción *Dividir* (Elaboración propia).

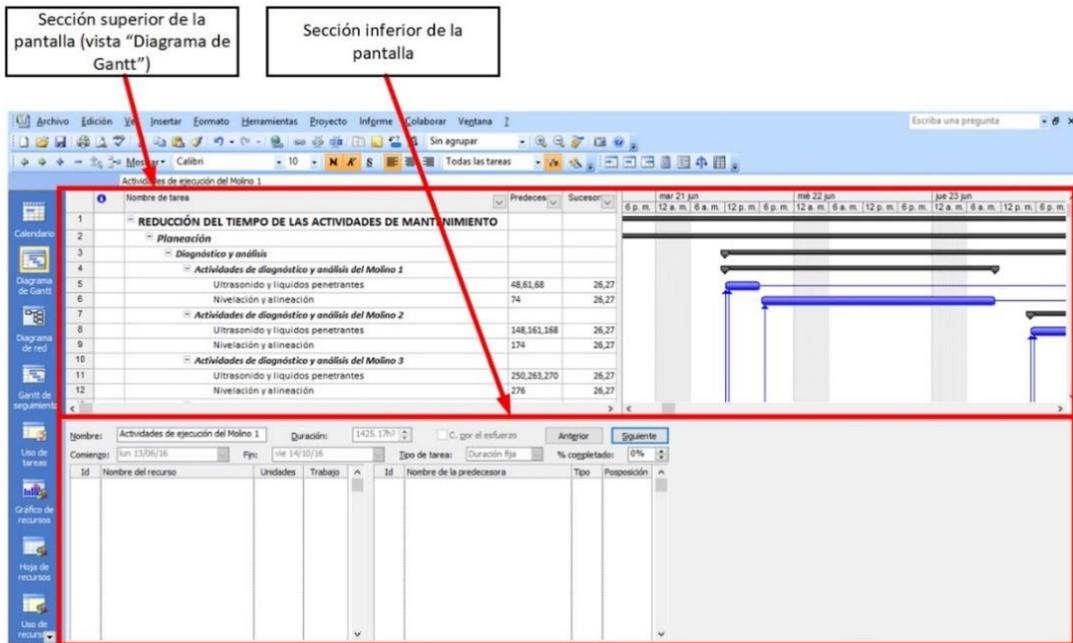


Figura 3. 30 Pantalla de *Project* dividida en una sección superior (vista “Diagrama de Gantt”) y una sección inferior (Elaboración propia).

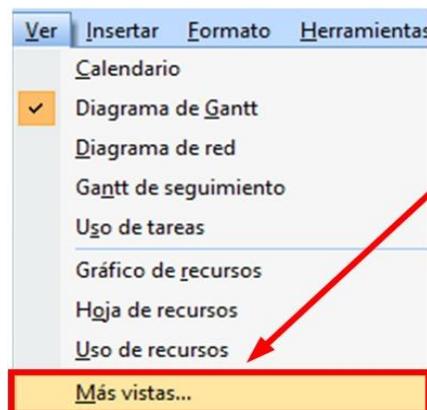


Figura 3. 31 Pestaña *Ver* resaltando la opción *Más vistas* (Elaboración propia).

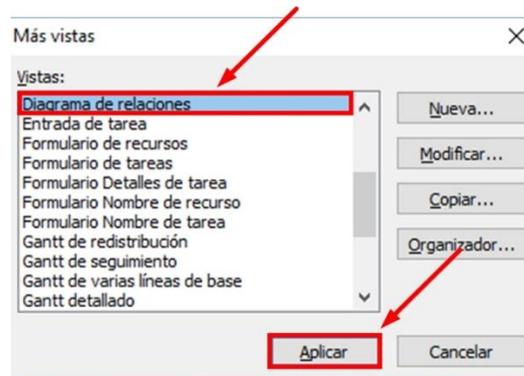


Figura 3. 32 Ventana Más vistas y selección de vista “Diagrama de relaciones” (Elaboración propia).

La Figura 3.33 muestra la vista “Diagrama de Gantt” en la sección superior de la pantalla de *Project* y la vista “Diagrama de relaciones” en la sección inferior de la misma. Cada paquete de actividad de mantenimiento en la vista “Diagrama de relaciones” se representa por un bloque que contiene el nombre del paquete de actividad, su número de identificación y su tipo de dependencia (Figura 3.34).

La vista “Diagrama de relaciones” de la Figura 3.33 muestra:

- A la izquierda, los paquetes de actividades predecesores: ajuste de cuchilla central, asentamiento de raspadores, inspección de líneas de presión, inspección de líneas de lubricación y enfriamiento y montaje de shute; del paquete de actividad seleccionado en la vista “Diagrama de Gantt”.
- Al centro, el paquete de actividad seleccionado “Pruebas del conductor donelly”.
- A la derecha, el paquete de actividad sucesor “Inicio de zafra”.

El resultado de agregar las columnas “Predecesoras” y “Sucesoras”, de establecer las precedencias y secuencias y de utilizar las vistas “Diagrama de relaciones” y “Diagrama de Gantt” se muestra en un archivo que se describe en el Anexo 5 (Archivo A5.4). La Figura 3.35 ejemplifica parte del resultado obtenido, la cual muestra lo siguiente:

1. En la columna “Nombre de tarea” se muestra:
 - a. En color rojo, la actividad “Ejecución” (nivel 2),

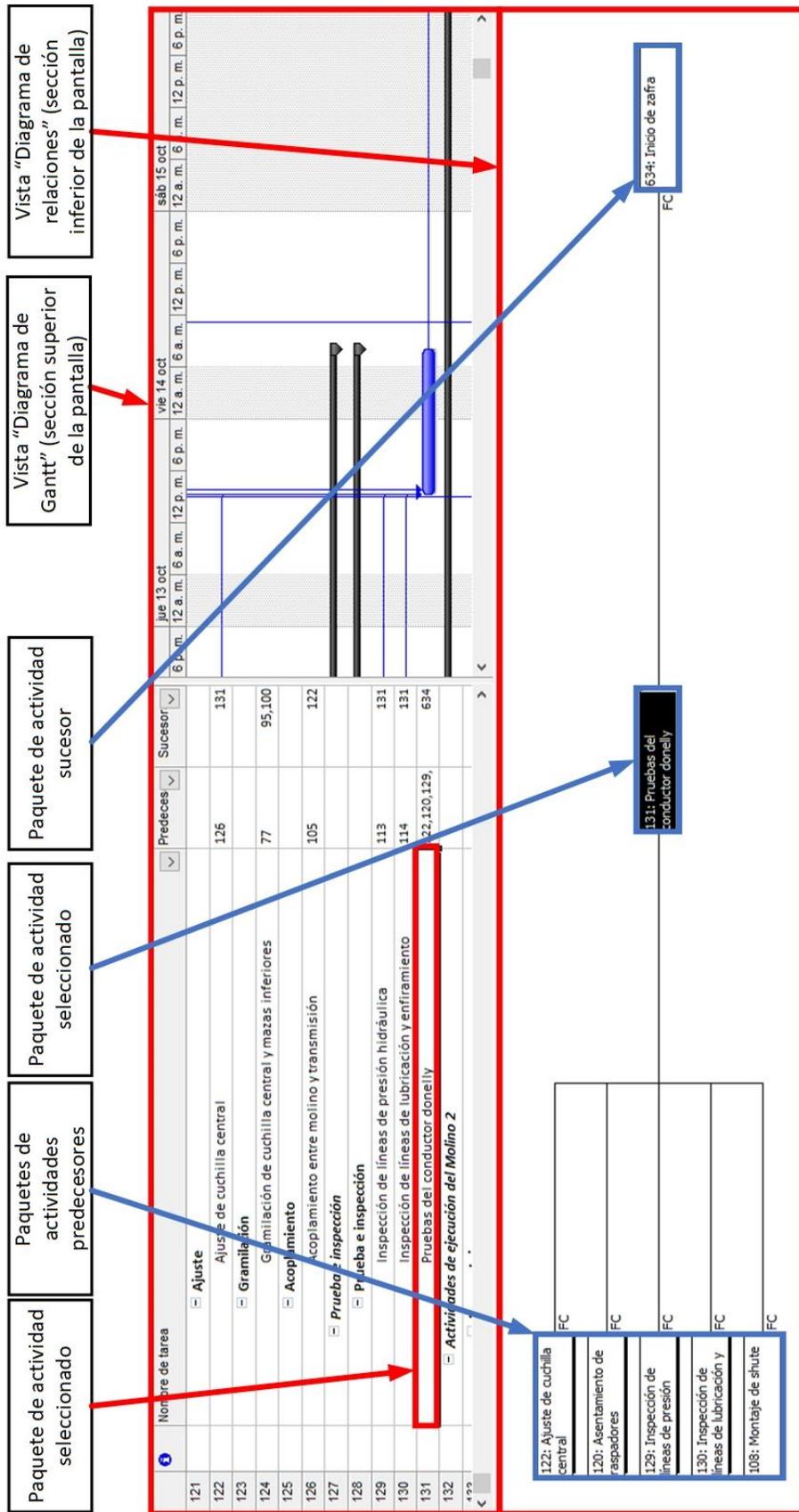


Figura 3. 33 Vista “Diagrama de Gantt” (sección superior de la pantalla) y vista “Diagrama de relaciones” (sección inferior de la pantalla) resaltando los paquetes de actividades predecesores y sucesores de un paquete de actividad seleccionado.

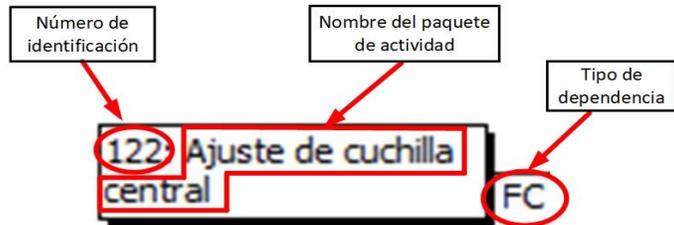


Figura 3. 34 Bloque con el número de identificación, nombre y tipo de dependencia de cada paquete de actividad (Elaboración propia).

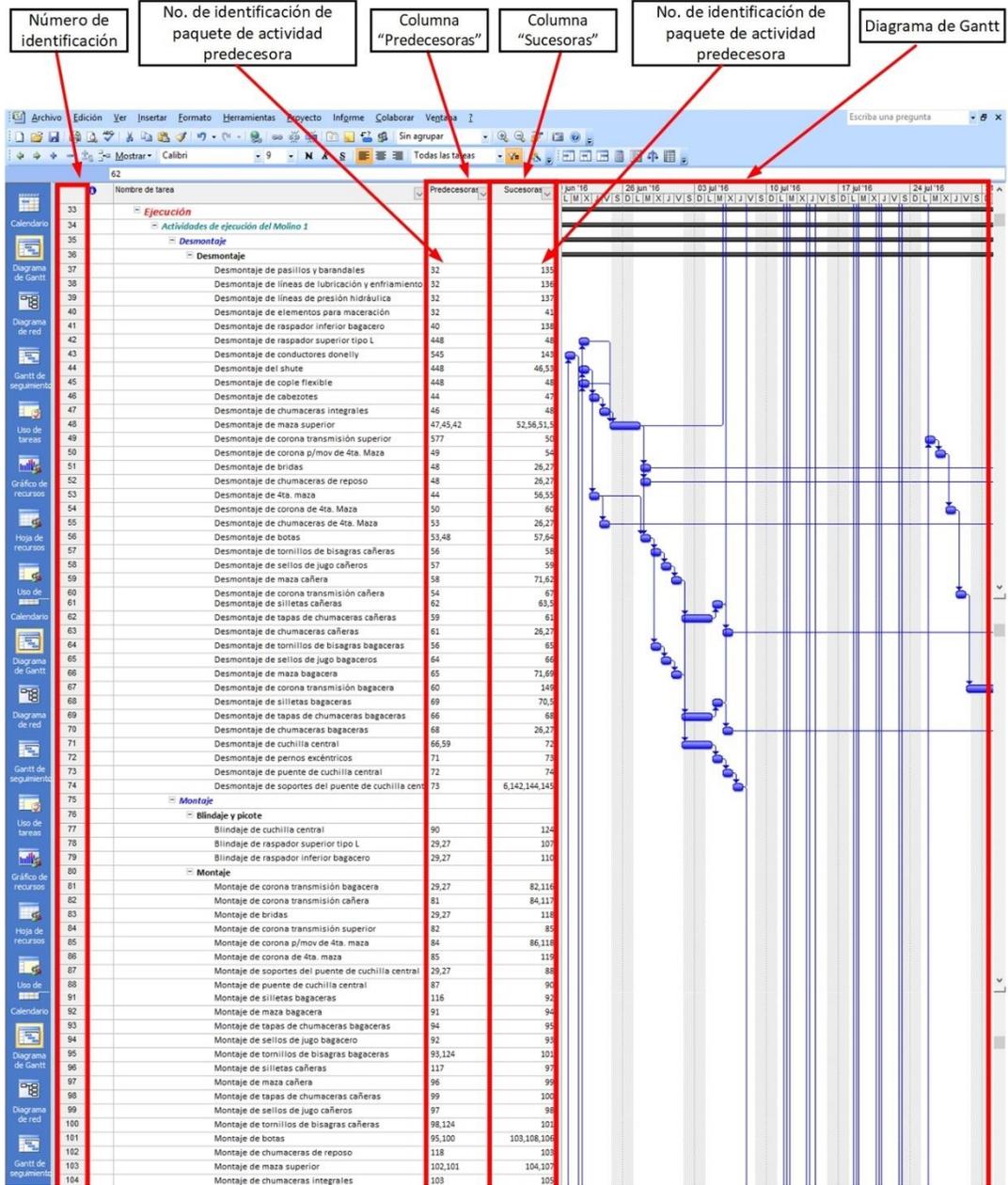


Figura 3. 35 Algunas de las actividades de “Ejecución” con precedencia y secuencia (Elaboración propia).

- b. En color verde azulado, las “Actividades de ejecución del Molino 1” (nivel 3).
 - c. En color azul, la actividad “Desmontaje” (nivel 4).
 - d. En color negro y negrita, la actividad de “Desmontaje” (nivel 5).
 - e. En color negro, los paquetes de actividades de mantenimiento (nivel 6).
2. En la columna “Predecesoras” se muestran la(s) precedencia(s) de los paquetes.
 3. En la columna “Sucesoras” se muestran la(s) secuencias(s) de los paquetes.
 4. En el diagrama de Gantt se visualizan las dependencias “final a inicio” entre los paquetes.

3.6.4 Crear la red de los paquetes de actividades de mantenimiento con *Project*

Para verificar y validar que las precedencias y secuencias de los paquetes de actividades de mantenimiento fueron establecidas correctamente, se utilizó el diagrama de red de *Project*. Este diagrama se fue creando desde la introducción de las actividades y paquetes de actividades de mantenimiento en la hoja de *Project* (Sección 3.6.3.2) hasta el establecimiento de las precedencias y secuencias de los paquetes de actividades (Sección 3.6.3.3). Para visualizar el diagrama de red se utilizó la vista “Diagrama de red” (Figura 3.36), ubicada en la barra de vistas, a la izquierda de la hoja de *Project*.

La Figura 3.36 muestra parte de la red de los paquetes de actividades con su respectivo número de identificación; se muestra, por ejemplo, que el montaje de la cuchilla central (495) no puede realizarse hasta que se realice el montaje del puente de cuchilla central (493) y los pernos excéntricos (494). La red completa de los paquetes de actividades se muestra en un archivo que se describe en el Anexo 5 (Archivo A5.4).

Cabe mencionar que la verificación de las precedencias y secuencias de los paquetes de actividades se realizó con expertos en el mantenimiento del tándem de molinos con lo cual se aseguró que estas fueron correctamente establecidas y que éstas representaban adecuadamente las actividades que se realizan en el mantenimiento actual del tándem de molinos. La correcta verificación de las secuencias fue fundamental en la asignación de los tiempos óptimos, medios y pésimos que se describirá en la Sección 3.6.5.

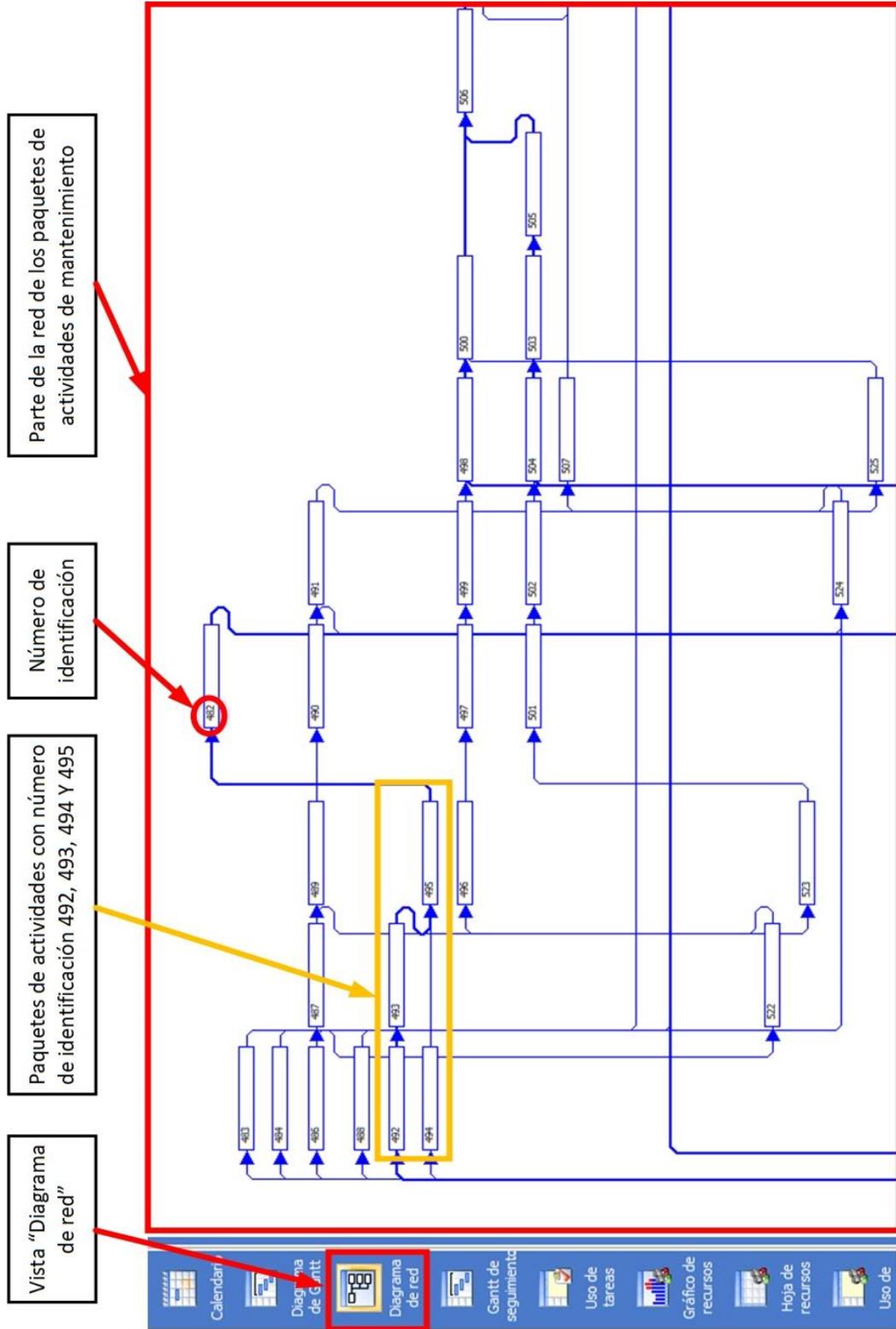


Figura 3. 36 Parte de la red de los paquetes de actividades de mantenimiento en la vista "Diagrama de red" (Elaboración propia).

3.6.5 Obtener estimaciones de tiempos óptimos, medios y pésimos de los paquetes de actividades de mantenimiento

Después de asegurar el correcto establecimiento de las precedencias y secuencias de los paquetes de actividades (Sección 3.6.4), se realizó una investigación con el personal experto en el mantenimiento del tándem de molinos para obtener las estimaciones de los tiempos óptimos, medios y pésimos, debido a que sólo se contaba con un tiempo determinístico para cada actividad (Figura 3.4 y Figura 3.5 de la Sección 3.3.4.2), los cuales no eran confiables.

Según la técnica *PERT*, una forma de representar la incertidumbre es con la distribución de probabilidad beta (Sección 2.2.4.1), la cual, de acuerdo con la teoría se representa con los tiempos óptimos, medios, pésimos y estándar. Para obtener los tiempos óptimos, medios y pésimos de los paquetes de actividades, se realizó un formato (Anexo 2) para registrar las estimaciones de los tres tiempos de cada paquete de actividad obtenidas de los expertos.

Debido a que fue difícil obtener las estimaciones de los tiempos en días, se decidió por practicidad registrar las estimaciones de los tiempos en horas y posteriormente se convirtieron a días dividiendo la cantidad de horas registradas entre las 16 horas de la jornada laboral establecida (Sección 3.6.3.1).

La Tabla 3.17 muestra algunos paquetes de actividades con sus tiempos óptimos, medios y pésimos registrados en el formato del Anexo 2. El registro de todas las estimaciones de los tres tiempos se muestra en un archivo que se describe en el Anexo 5 (Archivo A5.5).

Un punto importante para señalar fue el procedimiento utilizado para registrar las estimaciones de los tiempos óptimos, medios y pésimos de las actividades “Fabricación interna y/o externa” y “Mantenimiento” debido a que, como se mencionó en la Sección 3.6.2, no se puede predecir qué componentes saldrán dañados o inservibles después del periodo de zafra y por consecuencia no se sabe el tiempo que tardarán estos componentes en fabricarse o en dar mantenimiento. Por esta razón, para inferir los tiempos de estas dos actividades se utilizó la experiencia de los expertos de mantenimiento y los registros de las estadísticas.

Tabla 3. 17 Parte de los paquetes de actividades de mantenimiento con tiempos óptimos, medios y pésimos (Elaboración propia).

ID	Nombre	Tiempo (días)		
		Óptimo	Medio	Pésimo
1	REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE LAS ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO			
2	Planeación			
3	Diagnóstico y análisis			
4	Actividades de diagnóstico y análisis del Molino 1			
5	Ultrasonido y líquidos penetrantes	0.1875	0.3750	0.5625
6	Nivelación y alineación	1.2500	1.5000	2.0000
7	Actividades de diagnóstico y análisis del Molino 2			
8	Ultrasonido y líquidos penetrantes	0.1875	0.3750	0.5625
9	Nivelación y alineación	1.2500	1.5000	2.0000
:	:	:	:	:
:	:	:	:	:
:	:	:	:	:
626	Acoplamiento			
627	Acoplamiento entre molino y transmisión	0.2500	0.3750	0.5000
628	Prueba e inspección			
629	Prueba e inspección			
630	Inspección de líneas de presión hidráulica	0.6250	1.0000	1.5000
631	Inspección de líneas de lubricación y enfriamiento	0.4375	0.9375	1.4375
632	Inicio de zafra			
633	Inicio de zafra	0.0000	0.0000	0.0000

El procedimiento utilizado para inferir los tiempos fue el siguiente:

1. Se creó un formato (Anexo 3) para estimar los tiempos óptimos, medios y pésimos de las actividades “Fabricación interna y/o externa” y “Mantenimiento”, en 6 años.
2. Se registraron los componentes del tándem de molinos.
3. Se registraron los totales de los componentes fabricados y los totales de los componentes a los que se dio mantenimiento, por 6 años.
4. Se estimaron, por años, los tiempos óptimos, medios y pésimos de las actividades de fabricación y mantenimiento.
5. Se calculó el promedio de la cantidad de componentes fabricados y de componentes a los que se dieron mantenimiento registrados en los 6 años.
6. Se calculó el promedio de los tiempos estimados óptimos, medios y pésimos, registrados durante los 6 años.

Las Tablas 3.18 y 3.19 muestran los promedios inferidos de los tiempos de fabricación de los componentes y los promedios inferidos de los tiempos de mantenimiento de los mismos, respectivamente. Como resultado se obtuvo un promedio de 190 componentes a dar mantenimiento y un promedio de 75 componentes a fabricar, por año. Los cálculos de los promedios inferidos se muestran en un archivo que se describe en el Anexo 5 (Archivo A5.6).

Tabla 3. 18 Promedios de los tiempos para componentes fabricados (Elaboración propia).

Tiempos	Promedios totales
Tiempo óptimo	18 días
Tiempo medio	20 días
Tiempo pésimo	23 días

Tabla 3. 19 Promedios de los tiempos de componentes a dar mantenimiento (Elaboración propia).

Tiempos	Promedios totales
Tiempo óptimo	17 días
Tiempo medio	18 días
Tiempo pésimo	20 días

3.6.6 Determinar la ruta crítica del proyecto con *Project*

Después de haber obtenido las estimaciones de los tiempos óptimos, medios y pésimos para cada paquete de actividad, se realizaron las siguientes acciones para determinar la ruta crítica del proyecto:

1. Se dio clic a la opción *Hojas de entradas PERT* (Figura 3.37), ubicada en la barra de herramientas, para activar en la pantalla de *Project* las columnas “Nombre de tarea”, “Duración”¹⁹, “Dur. optimista”, “Dur. esperada” y “Dur. pesimista” (Figura 3.38).

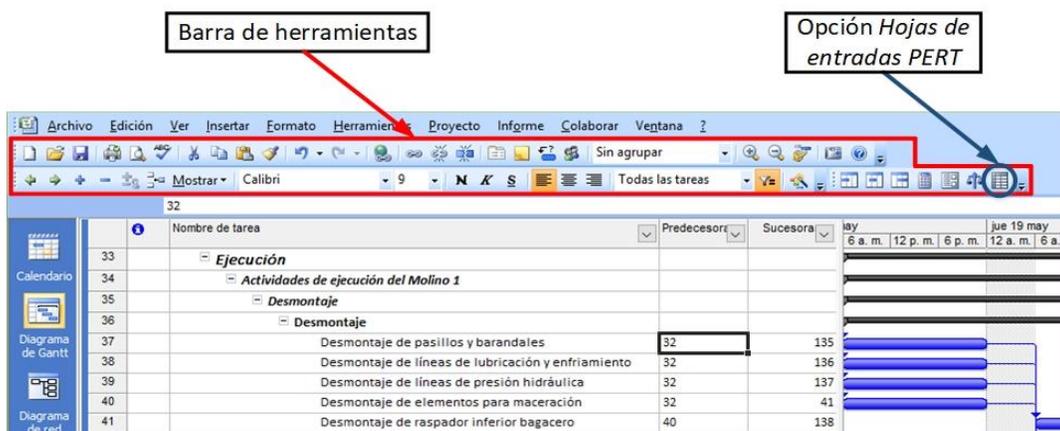


Figura 3. 37 Opción *Hojas de entradas PERT*, ubicada en la barra de herramientas (Elaboración propia).

Número de identificación	Columna “Nombre de tarea”	Columna “Duración”	Columna “Dur. optimista”	Columna “Dur. esperada”	Columna “Dur. pesimista”
1	REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE LAS ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO	213 días	0 días	0 días	0 días
2	Planeación	106 días	0 días	0 días	0 días
3	Diagnóstico y análisis	63 días	0 días	0 días	0 días
4	Actividades de diagnóstico y análisis del Molino 1	3 días	0 días	0 días	0 días
5	Ultrasonido y líquidos penetrantes	1 día	0 días	0 días	0 días
6	Nivelación y alineación	1 día	0 días	0 días	0 días
7	Actividades de diagnóstico y análisis del Molino 2	3 días	0 días	0 días	0 días
8	Ultrasonido y líquidos penetrantes	1 día	0 días	0 días	0 días
9	Nivelación y alineación	1 día	0 días	0 días	0 días
10	Actividades de diagnóstico y análisis del Molino 3	3 días	0 días	0 días	0 días
11	Ultrasonido y líquidos penetrantes	1 día	0 días	0 días	0 días
12	Nivelación y alineación	1 día	0 días	0 días	0 días
13	Actividades de diagnóstico y análisis del Molino 4	3 días	0 días	0 días	0 días
14	Ultrasonido y líquidos penetrantes	1 día	0 días	0 días	0 días
15	Nivelación y alineación	1 día	0 días	0 días	0 días

Figura 3. 38 Columnas “Nombre de tarea”, “Duración”, “Dur. Optimista”, “Dur. Esperada” y “Dur. Pesimista”, activadas con la opción *Hojas de entradas PERT* (Elaboración propia).

¹⁹ La columna “Duración” posee días asignados debido a que, de forma predeterminada, *Project* coloca la duración de la jornada laboral (Sección 3.6.3.1); en este caso se trabajó con duraciones (tiempos) en días.

2. Se introdujeron las estimaciones de los tiempos óptimos, medios y pésimos en las columnas “Dur. Optimista”, “Dur. Esperada” y “Dur. Pesimista”, respectivamente. La Figura 3.39 muestra algunos paquetes de actividades de mantenimiento con la estimación de sus tiempos.
3. Se hizo clic a la opción *Calcular PERT* (Figura 3.40), en la barra de herramientas, para obtener los siguientes tiempos:
 - El tiempo estándar de cada paquete de actividad.
 - El tiempo de terminación óptimo de todos los paquetes de actividades.
 - El tiempo de terminación medio de todos los paquetes de actividades (tiempo actual del mantenimiento del tándem).

Nombre de tarea	Duración	Dur. optimista	Dur. esperada	Dur. pesimista
1 - REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE LAS ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO	213 días	0 días	0 días	0 días
2 - Planeación	106 días	0 días	0 días	0 días
3 - Diagnóstico y análisis	63 días	0 días	0 días	0 días
4 - Actividades de diagnóstico y análisis del Molino 1	3 días	0 días	0 días	0 días
5 - Ultrasonido y líquidos penetrantes	1 día	0.19 días	0.38 días	0.56 días
6 - Nivelación y alineación	1 día	1.25 días	1.5 días	2 días
7 - Actividades de diagnóstico y análisis del Molino 2	3 días	0 días	0 días	0 días
8 - Ultrasonido y líquidos penetrantes	1 día	0.19 días	0.38 días	0.56 días
9 - Nivelación y alineación	1 día	1.25 días	1.5 días	2 días
10 - Actividades de diagnóstico y análisis del Molino 3	3 días	0 días	0 días	0 días
11 - Ultrasonido y líquidos penetrantes	1 día	0.19 días	0.38 días	0.56 días
12 - Nivelación y alineación	1 día	1.25 días	1.5 días	2 días
13 - Actividades de diagnóstico y análisis del Molino 4	3 días	0 días	0 días	0 días
14 - Ultrasonido y líquidos penetrantes	1 día	0.19 días	0.38 días	0.56 días
15 - Nivelación y alineación	1 día	1.25 días	1.5 días	2 días

Figura 3. 39 Algunos paquetes de actividades de mantenimiento con las estimaciones de sus tiempos óptimos, medios y pésimos (Elaboración propia).

Nombre de tarea	Duración	Dur. optimista	Dur. esperada	Dur. pesimista
1 - REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE LAS ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO	116.67 días	85.57 días	114.03 días	160.62 días
2 - Planeación	44.32 días	29.55 días	42.54 días	66.24 días
3 - Diagnóstico y análisis	13.69 días	7.11 días	12.69 días	24.28 días
4 - Actividades de diagnóstico y análisis del Molino 1	1.94 días	1.44 días	1.88 días	2.69 días
5 - Ultrasonido y líquidos penetrantes	0.38 días	0.19 días	0.38 días	0.56 días

Figura 3. 40 Opción *Calcular PERT* y tiempos de terminación de paquetes de actividades (Elaboración propia).

- El tiempo de terminación pésimo de todos los paquetes de actividades.
- El tiempo de terminación estándar de todos los paquetes de actividades.

La Tabla 3.20 muestra la concentración de los tiempos de terminación obtenidos con la opción *Calcular PERT* y sus respectivas fechas de inicio y fin.

4. Se dio clic en la pestaña *Proyecto*, después se seleccionó la opción *Filtro para:* y finalmente, se seleccionó, del *pop up* emergente, opción *Tareas críticas* (Figura 3.41).
5. Se dio clic en la vista “Diagrama de Gantt” para visualizar la ruta crítica del proyecto en la pantalla de *Project*.

El resultado de las acciones anteriores se observa en la Figura 3.42 la cual muestra en color rojo algunos paquetes de actividades que forman parte de la ruta crítica del proyecto. La totalidad de las actividades que forman parte de la ruta crítica se muestra en un archivo que se describe en el Anexo 5 (Archivo A5.4).

Tabla 3. 20 Concentración de tiempos de terminación optimistas, medios, pesimistas y estándar de los paquetes de actividades de mantenimiento, con *Project* (Elaboración propia).

Tiempos	Tiempo de terminación (días)	Fecha de inicio	Fecha fin
Tiempo de terminación optimista en Project	83.57 días	Lunes 16/05/16	Jueves 08/09/16
Tiempo de terminación medio en Project	112.03 días	Lunes 16/05/16	Miércoles 19/10/16
Tiempo de terminación pesimista en Project	160.62 días	Lunes 16/05/16	Jueves 22/12/16
Tiempo de terminación estándar en Project	114.67 días	Lunes 16/05/16	Viernes 21/10/16

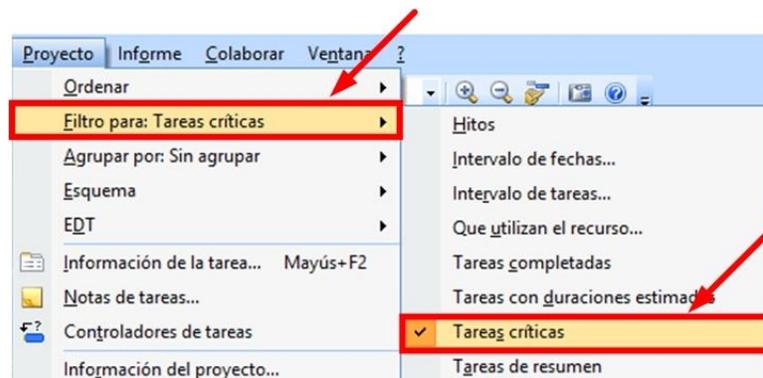


Figura 3. 41 Pestaña *Proyecto* resaltando la opción *Filtro para:* y el *pop up* *Tareas críticas* (Elaboración propia).

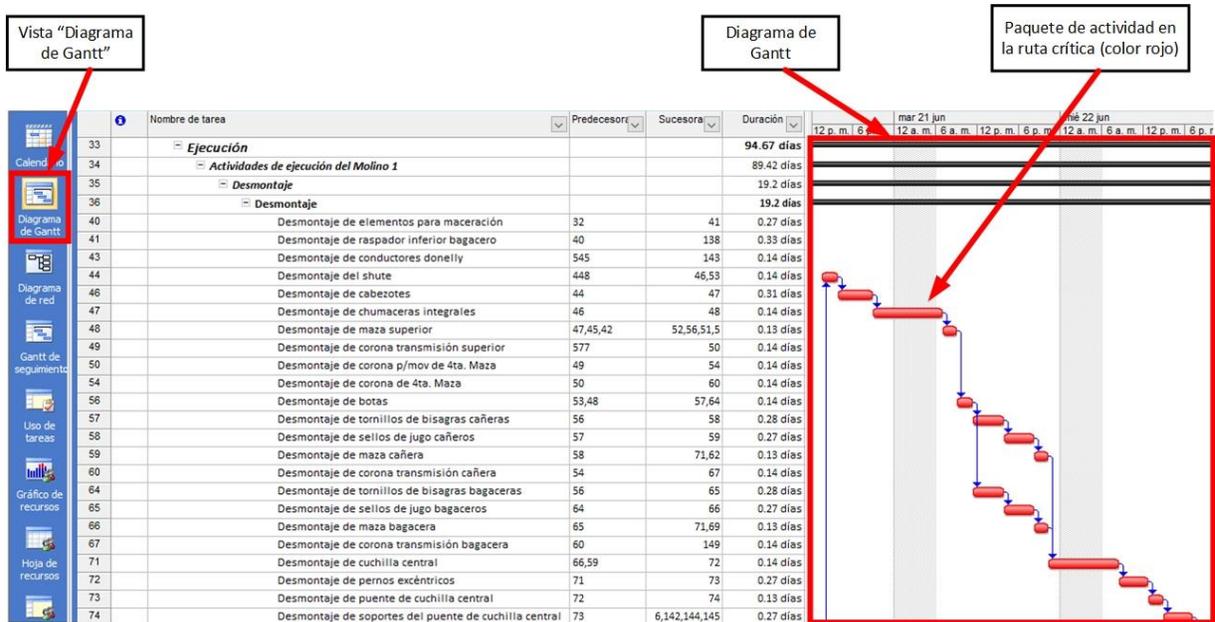


Figura 3. 42 Algunos paquetes de actividades en la ruta crítica (color rojo) (Elaboración propia).

3.6.7 Realizar simulación de Monte Carlo

Para tomar una mejor decisión sobre los tiempos de terminación obtenidos en *Project* se aplicó la simulación de Monte Carlo utilizando el software *@RISK*²⁰ y *Excel* con la finalidad de introducir una distribución de probabilidad para describir la incertidumbre que presentan las estimaciones de los tiempos óptimos, medios y pésimos y obtener las probabilidades de terminación del mantenimiento del tándem de molinos.

Para realizar la simulación de Monte Carlo se ejecutaron los siguientes pasos:

1. Crear un modelo de simulación.
2. Preparar el modelo para correr la simulación de Monte Carlo.
3. Ejecutar la simulación de Monte Carlo.
4. Analizar los resultados.

3.6.7.1 Crear un modelo de simulación

Para realizar la simulación de Monte Carlo fue necesario crear un modelo de simulación que representara la realidad de las actividades y paquetes de actividades de mantenimiento, de forma

²⁰ Versión 5.5.0

que asignando valores aleatorios a las variables de dicho modelo se obtuvieran diferentes escenarios y resultados.

El *software* que se estableció como mejor opción para desarrollar el modelo de simulación fue *Excel* ya que *@RISK* se carga como complemento de este software, por lo cual se utilizaron las características propias de *Excel* para crear el modelo de simulación y, posteriormente, se utilizó la capacidad de análisis de riesgo de *@RISK* para realizar la simulación de Monte Carlo.

Para crear el modelo de simulación, que se describe en el Anexo 5 (Archivo A5.7), se usaron las funciones típicas de la hoja de cálculo de *Excel* y se crearon macros en el Editor de *Visual Basic* que tiene este *software*. El desarrollo del modelo se describe de forma resumida a continuación:

1. Se registraron las actividades y paquetes de actividades.
2. Se registraron las precedencias y secuencias de los paquetes de actividades.
3. Se registraron los tiempos medios, pésimos, óptimos y estándar de los paquetes de actividades.
4. Se realizaron matrices de relaciones de precedencias para los tiempos óptimos, medios, pésimos y estándar. Estas matrices calcularon los tiempos de inicio más próximos (*ES*), tiempos de terminación más próximos (*EF*), tiempos de terminación más lejanos (*LF*) y tiempos de inicio más lejanos (*LS*).
5. Se realizó una tabla donde se registraron los valores obtenidos de las matrices de relaciones de precedencias de los tres tiempos.
6. Se realizó una tabla de resultados con el tiempo de terminación total, la cantidad de paquetes de actividades en la ruta crítica, la varianza total del proyecto y la desviación estándar del proyecto.

En el Anexo 4 del presente trabajo se describen de forma detallada los pasos realizados para crear el modelo de simulación.

El modelo de simulación, que se creó en Excel, realiza lo siguiente:

- Calcula los tiempos de terminación óptimos, medios, pésimos y estándar de los paquetes de actividades.
- Identifica y cuantifica los paquetes de actividades que están en la ruta crítica.
- Calcula la varianza de los paquetes de actividades que forman parte de la ruta crítica.
- Calcula la varianza y desviación estándar totales del proyecto.

3.6.7.2 Preparar el modelo para correr la simulación de Monte Carlo

Una vez desarrollado el modelo de simulación en *Excel*, éste se preparó para la simulación de Monte Carlo realizando lo siguiente:

1. Se definieron las variables de entrada del modelo.

Las variables de entrada que se definieron, para simular todos los posibles resultados de tiempos de terminación, fueron los *paquetes de actividades* por que introducen riesgo al modelo.

Se definieron las variables de salida del modelo.

La variable de salida que se definió y en cuyo valor estaba el interés fue el *tiempo de terminación total actual*.

2. Se definió la distribución de probabilidad a simular.

Una vez definidas las variables de entrada del modelo de simulación, se definió una distribución de probabilidad que describió, estadística y gráficamente, el rango de valores posibles de una variable de entrada y su probabilidad relativa de que se dé cualquier valor de ese rango.

Como se mencionó en la Sección 2.2.4, la distribución beta es la distribución de probabilidad que mejor describe a los tres tiempos ya estimados (Sección 3.6.5). Sin embargo, al investigar las distribuciones de probabilidad que poseía el *software @RISK* se encontró que la función de distribución $RiskBeta(alfa1;alfa2)^{21}$, de la distribución

²¹ La función de distribución *RiskBeta*, que presenta el software *@RISK*, especifica una distribución beta con los parámetros *alfa 1* y *alfa 2* los cuales generan una distribución beta con un valor mínimo de 0 y un valor máximo de 1.

beta, no poseía los argumentos para introducir las estimaciones de los tiempos óptimos, medios y pésimo. No obstante, existían las siguientes dos funciones de distribución que utilizaban tres parámetros: mínimo, más probable, máximo; para especificar un rango de valores y su distribución de probabilidad:

- La función de distribución $RiskPert(\text{mínimo}, \text{más probable}, \text{máximo})$, de la distribución de probabilidad *PERT*.
- La función de distribución $RiskTriang(\text{mínimo}, \text{más probable}, \text{máximo})$, de la distribución de probabilidad triangular.

Con base en la investigación realizada, se definió que la distribución de probabilidad *PERT* fuera utilizada para realizar la simulación ya que, de acuerdo con Palisade Corporation (2009), es un caso especial de la distribución beta y puede ser considerada como una distribución superior a la triangular.

3. Introducir las distribuciones de probabilidad *PERT* a las variables de entrada.

Para introducir las distribuciones de probabilidad *PERT* a las variables de entrada se realizaron los siguientes pasos:

A. Se dio clic en la pestaña *@RISK* (Figura 3.43).

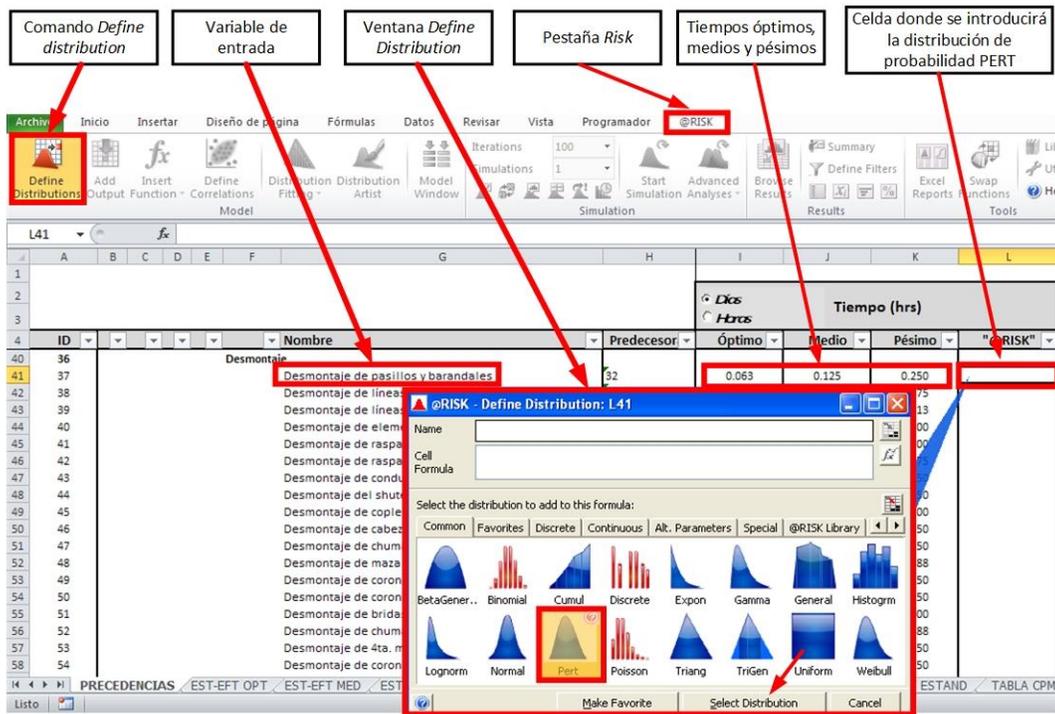


Figura 3. 43 Pantalla de *@RISK* con comando *Define distribution*, destacando la selección de la distribución de probabilidad *PERT* (Elaboración propia).

- B. Se seleccionó la celda donde se introducirá la distribución de probabilidad *PERT* (Figura 3.43).
- C. Se seleccionó el comando *Define Distribution* (Figura 3.43).
- D. Se seleccionó de la ventana emergida @RISK “*Define Distribution*” la distribución de probabilidad *PERT* y se dio clic en el botón *Select Distribution* (Figura 3.43).
- E. Se eligió, de la ventana emergida @RISK “*Define Distribution*” (Figura 3.44) la opción *Assign Excel References as Arguments* para asignar los tiempos óptimo, medio y pésimo, ubicados en la hoja de cálculo de Excel, a los parámetros de la fórmula *PERT*.
- F. Se hizo clic en el botón *OK* de la ventana @RISK “*Define Distribution*” (Figura 3.44).
- G. Se repitieron los pasos A, B, C, D, E y F para todas las variables de entrada.

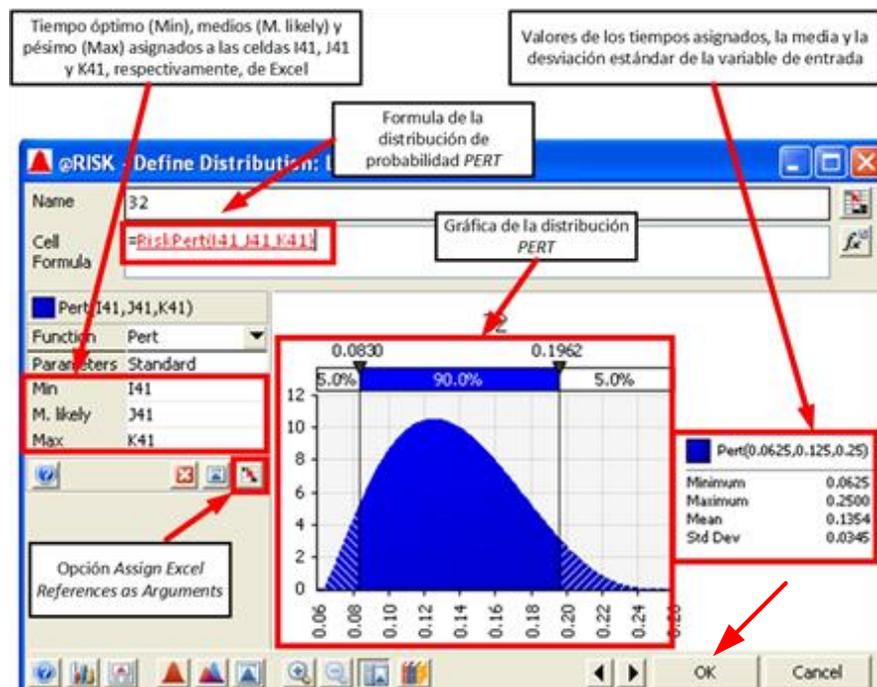


Figura 3. 44 Ventana *Define Distribution* donde se destaca la introducción de los tiempos óptimos, medios y pésimos como parámetros de la distribución de probabilidad *PERT* (Elaboración propia).

4. Introducir la función *RiskOutput* a las variables de salida.

Para introducir la función *RiskOutput* a las variables de salida se realizó lo siguiente:

- A. Se seleccionó la celda de la variable de salida donde se introducirá la función *RiskOutput* (Figura 3.45).
- B. Se dio clic en el comando *Add Output* (Figura 3.45).
- C. Se seleccionó de la ventana emergida @RISK “Add/Edit Output” el botón *OK* (Figura 3.45) para introducir la función.
- D. Se repitieron los pasos A, B y C para todas las variables de salida.

3.6.7.3 Ejecutar la simulación de Monte Carlo

Una vez introducidas las distribuciones de probabilidad *PERT* en las variables de entrada y las funciones *RiskOutput* en las variables de salida (Sección 3.6.7.2) se ejecutó la simulación de Monte Carlo, para ello, se realizó lo siguiente:

- 1. Se preparó el modelo para realizar corridas piloto.
 - A. Se dio clic en la pestaña @RISK de Excel (Figura 3.43).

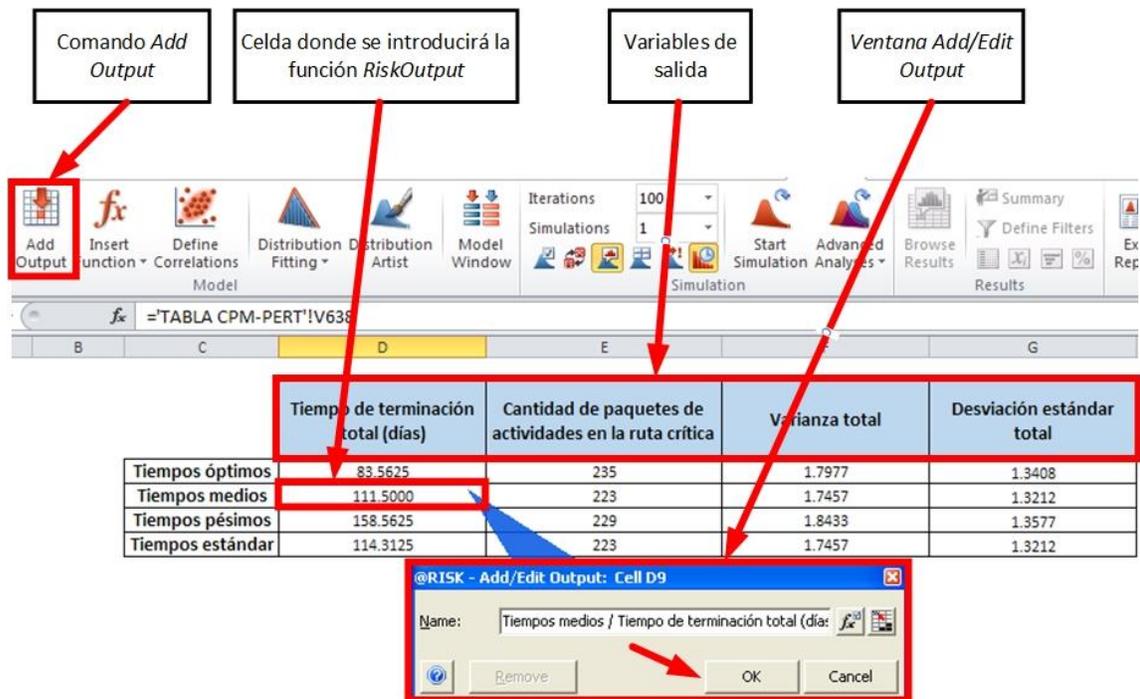


Figura 3. 45 Comando *Add Output* y ventana *Add/Edit Output* para introducir la función *RiskOutput* (Elaboración propia).

- B. Se dio clic en el comando *Simulation Settings* para habilita la ventana *@RISK Simulation Settings* (Figura 3.46).
- C. Se seleccionó la pestaña *Sampling* (Figura 3.46), de la ventana *@RISK Simulation Settings*, y se realizó lo siguiente:
- Se eligió el tipo de muestreo “*Latin Hipercube*”.
 - Se eligió que las simulaciones que se realizarán utilicen una semilla diferente para obtener una secuencia y resultados diferentes.
- D. Se seleccionó la pestaña *Convergence* (Figura 3.47), de la ventana *Simulation Settings* para habilitar la opción *Enable Convergence Testing* y determinar una tolerancia de convergencia del 1% y un nivel de confianza del 95%. Para finalizar, se dio clic en el botón *OK*.

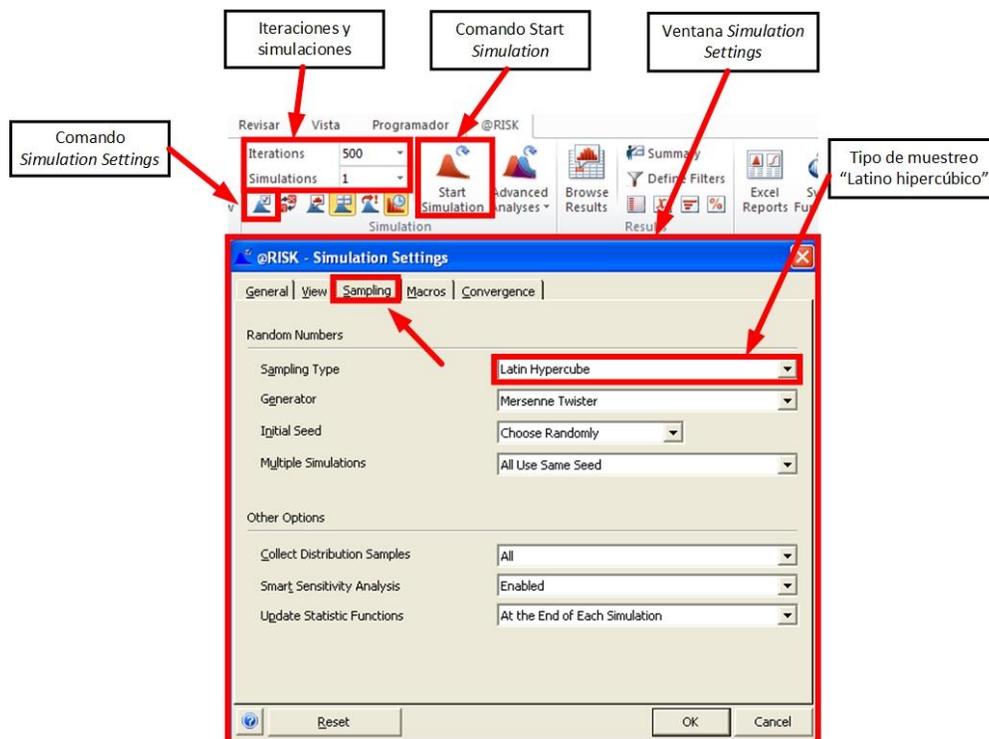


Figura 3. 46 Comando y ventana *Simulation Settings* para configurar el número de iteraciones y simulaciones y seleccionar, en la pestaña *Sampling*, el tipo de muestreo “*Latino hipercúbico*” (Elaboración propia).

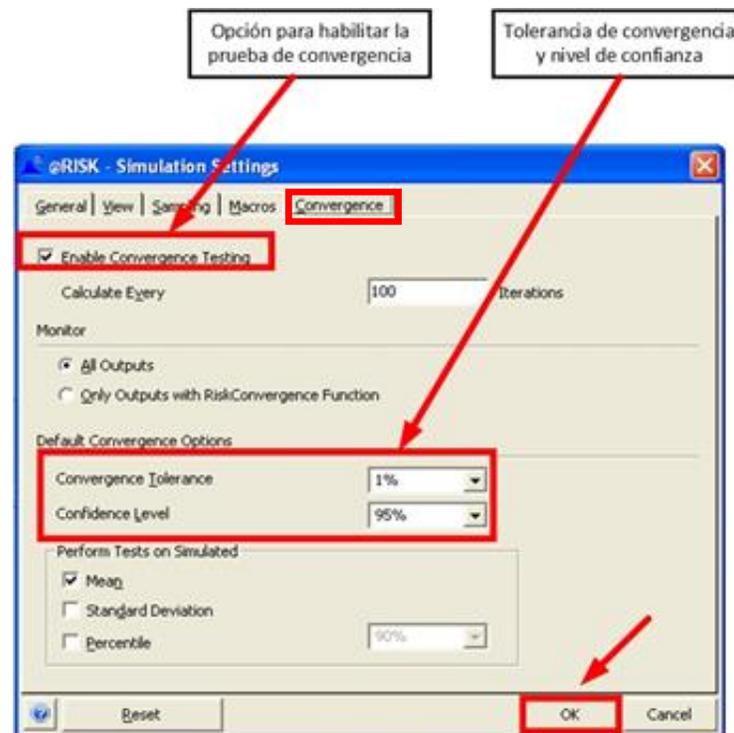


Figura 3. 47 Ventana *Simulation Settings* para habilitar la prueba de convergencia y seleccionar el 1% de tolerancia de convergencia y un 95% de nivel de confianza (Elaboración propia).

2. Se realizaron corridas piloto del modelo.

Para determinar el número de corridas o réplicas óptimas requeridas para estimar la media $\mu = E(x)$ se realizó lo siguiente:

- a. Se colocó, en las opciones de la pestaña *@RISK*, que se realizaran 100 iteraciones²² y 10 simulaciones independientes. Las 10 simulaciones es una cantidad adecuada de corridas para tener una confianza estadística razonable según Chung (2004).
- b. Se hizo clic en el comando *Start Simulation*, de la pestaña *@RISK* de *Excel* para iniciar la simulación.
- c. Se concentró en la Tabla 3.21 la información del *tiempo de terminación total actual* obtenido mediante las 10 simulaciones piloto independientes realizadas en el modelo de simulación.

²² Bazzani y Cruz (2008) y Faulin y Juan (2005) mencionan que entre más grande sea el número de iteraciones, se obtienen mejores resultados.

Tabla 3. 21 Resultados de las 10 corridas piloto independientes, la media y la varianza (Elaboración propia).

Corridas piloto	Tiempos de terminación total (días)
1	115.1721
2	115.1205
3	115.1874
4	115.1485
5	115.1539
6	115.1448
7	115.1487
8	115.1695
9	115.1603
10	115.1551
Media (\bar{x})	115.1561
Varianza ($S_{(n)}^2$)	0.0003

3. Se determinó el número de corridas óptimas del modelo.

Una vez obtenidos los resultados de las 10 simulaciones independientes (Tabla 3.21) se determinó el número de corridas óptimas del modelo, para ello, se utilizó la Ecuación 3.1 (Law, 2007).

$$n^* \beta = \min \left\{ i \geq n : t_{i-1, 1-\alpha/2} \sqrt{\frac{S_{(n)}^2}{i}} \leq \beta \right\} \dots\dots\dots Ec. 3.1$$

Donde:

i = Número óptimo de corridas.

β = Error máximo permitido.

$1-\alpha$ = Nivel de confianza.

$S_{(n)}^2$ = Varianza de la medida de interés (obtenida de las corridas piloto).

t = Valor de la tabla t de *student*.

n = Número de corridas piloto.

n^* = Numero de corridas óptimas.

De acuerdo a los resultados de la Tabla 3.21 se aseguró que el *tiempo de terminación total actual* tuviera máximo 1 día de error absoluto ($\beta = 1$) porque este valor representa menos del 1% del valor de la media de las diez corridas piloto (Ejemplo: $\beta = \mu * 1\% = 115.156 * 1\% = 1.1515$) (Ortíz Flores, 2007). Asimismo, se utilizó un nivel de confianza del 95%.

Con base en el cálculo de la media y la varianza del *tiempo de terminación total actual* del modelo (Tabla 3.21), el error absoluto ($\beta = 1$) y el nivel de confianza del 95%, se utilizó la Ecuación 3.1.

La Tabla 3.22 muestra los cálculos obtenidos de aplicar la Ecuación 3.1 hasta que el intervalo obtenido fuera menor o igual que β . De esta forma, se encontró que el número de corridas o réplicas óptimas son 10 corridas del modelo de simulación.

3.6.7.4 Analizar los resultados de la simulación de Monte Carlo

Una vez ejecutada la simulación de Monte Carlo en el modelo de simulación (Archivo 5.7) se analizaron los resultados de la variable de salida: *tiempo de terminación total actual*. Para ello, se realizaron los siguientes dos tipos de análisis:

- Análisis de probabilidades.

Con base en la gráfica de densidad de probabilidad de la variable de salida (Figura 3.48) se concluyó lo siguiente:

- Existe un 5% de probabilidad de que el mantenimiento del tándem de molinos termine en menos de 112.82 días, un 90% de probabilidad de que termine entre 112.82 y 117.24 días y un 5% de que termine después de 117.24 días.

Tabla 3. 22 Cálculo del número de corridas óptimas (Elaboración propia).

i	$\min \left\{ i \geq 10 : t_{i-1, (1-0.05/2=0.975)} = \sqrt{\frac{0.0003}{i}} \leq 1 \right\}$
10	$2.262 \sqrt{\frac{0.0003}{10}} = 0.01238 \leq 1$

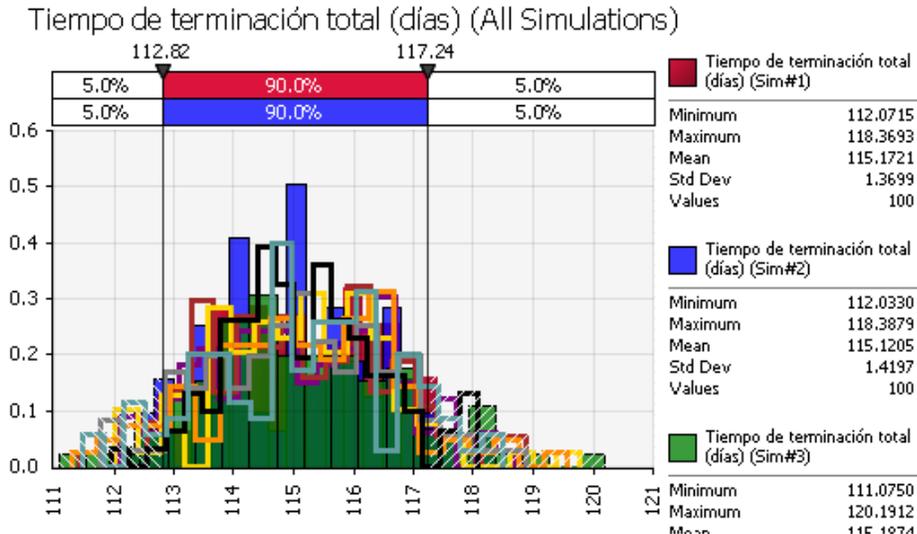


Figura 3. 48 Gráfica de densidad de probabilidad de la variable de salida “Tiempos de terminación total (días)” (@RISK for Excel, 2009).

- La media del tiempo de terminación total actual del mantenimiento del tándem fue de 115.1561 días.
- La desviación estándar del tiempo de terminación total actual del mantenimiento del tándem fue de 0.017.

La Tabla 3.23 muestra las probabilidades de terminación del proyecto.

- **Análisis de sensibilidad.**

El análisis de sensibilidad que realiza @RISK utiliza correlaciones de jerarquía, entre otros, basado en el cálculo de los coeficientes de correlación por jerarquía de Spearman, representados por una gráfica de tornado. Debido a que en el modelo de simulación se realizaron 10 simulaciones (Sección 3.6.7.3) se generó una gráfica de tornado para cada una de estas. La Figura 3.49 sólo muestra la gráfica de la primera simulación de la cual se concluyó lo siguiente:

- La variable de entrada “Fabricación (interna y/o externa)” (L30) tiene el coeficiente de correlación positivo más alto con un valor de 0.58, por lo tanto, es la variable de entrada que tiene mayor correlación con la variable de salida *tiempo de terminación total actual*, es decir, es la variable de entrada más significativa en determinar el tiempo de terminación total actual del proyecto.

Tabla 3. 23 Probabilidades de terminación del proyecto (Elaboración propia).

Probabilidades	Tiempo de terminación total actual (días)
10 %	113.4171
20 %	113.8668
30 %	114.3236
40 %	114.6739
50 %	115.1561
60 %	115.6906
70 %	115.9721
80 %	116.3984
90 %	116.8959
95 %	117.2441

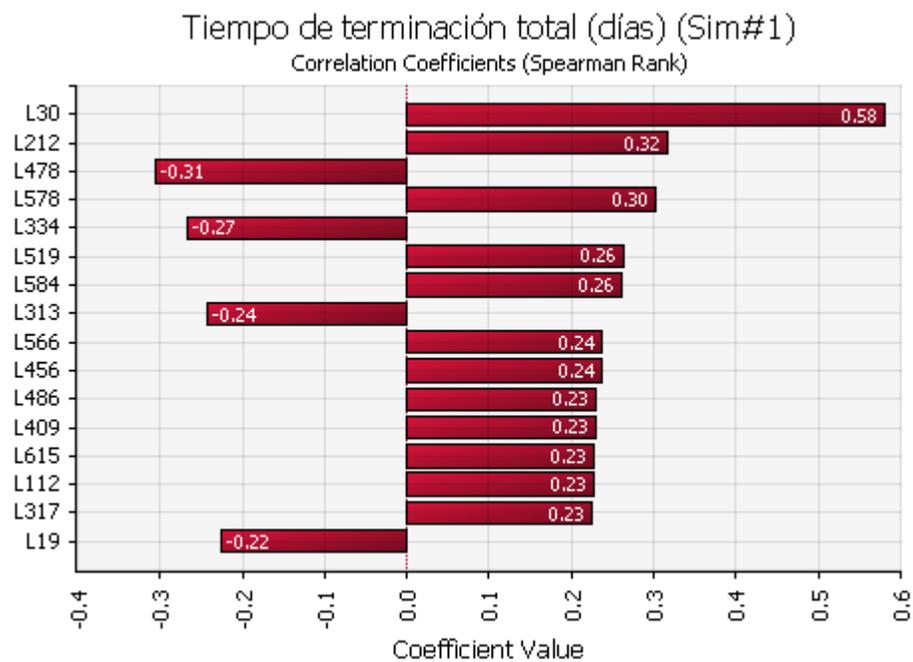


Figura 3. 49 Gráfica de tornado de coeficientes de correlación entre variables de entrada y variable de salida (@RISK for Excel, 2009).

- La variable de entrada “Desmontaje de tapas de chumaceras bagaceras” (L478) del Molino 5 tiene el coeficiente de correlación negativo mayor con un valor de -0.31 lo que significa que entre mayor sea el *tiempo de terminación total actual* mayor será el valor negativo de esta variable.

Para concluir con el análisis de sensibilidad se creó una gráfica de barras con las variables de entrada más significativas en determinar el tiempo de terminación total actual. La gráfica de barras se realizó tomando en cuenta los coeficientes de correlación de las variables de entrada con valor superior o igual a 0.30 los cuales se obtuvieron de las gráficas de tornado de las 10 simulaciones realizadas en el modelo de simulación que se describe en el Anexo 5 (Archivo A5.7).

La Figura 3.50 muestra las variables de entrada más significativas de las cuales se concluye que las variables de entrada “Fabricación (interna y/o externa)” (L30) y “Receso” (L36) son las variables que más se repite en el análisis de sensibilidad realizado y, por lo tanto, las variables que el superintendente de maquinaria, jefes de molinos y personal deben atender para que se reduzca aún más el tiempo de terminación total actual del mantenimiento del tándem de molinos.

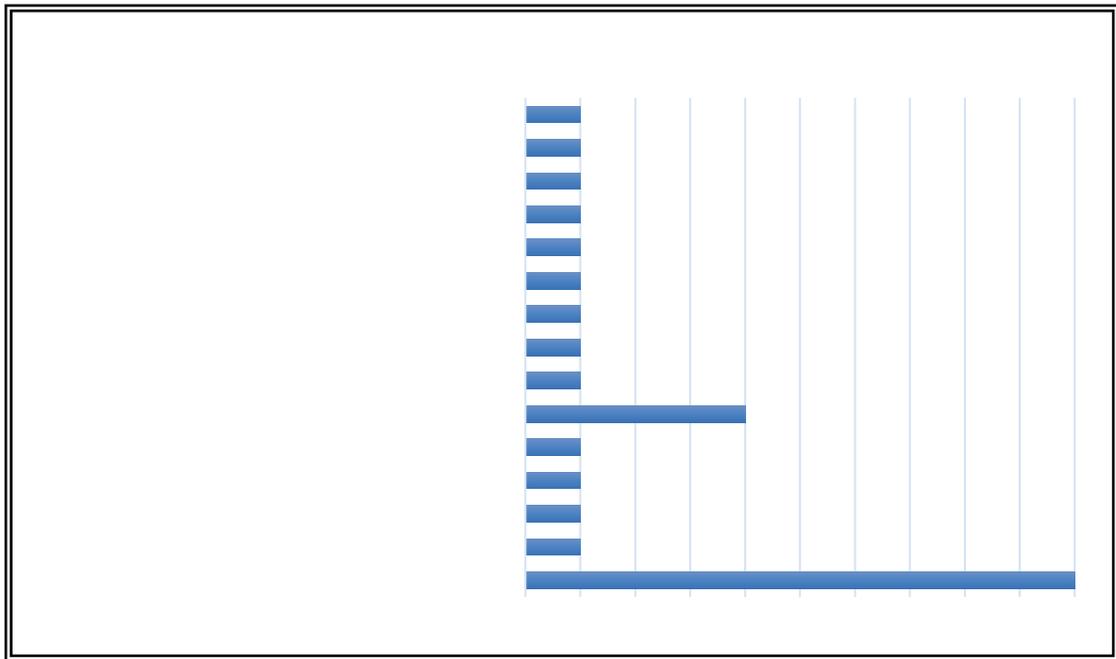


Figura 3. 50 Variables de entrada más significativas en determinar el tiempo de terminación total actual del proyecto (Elaboración propia).

3.7 Determinar el tiempo de terminación de las actividades de mantenimiento, después de la mejora propuesta

En esta sección se determinó y documentó el tiempo de terminación de las actividades de mantenimiento después de la mejora propuesta, es decir, después de que se agregó al mantenimiento del tándem de molinos otra grúa viajera para los fines siguientes:

1. Para obtener un parámetro de comparación entre el tiempo de terminación total antes de la mejora y el tiempo de terminación total después de implementar la mejora propuesta.
2. Para conocer los beneficios que se obtuvieron de la aplicación de las herramientas de ingeniería industrial utilizadas en el presente trabajo: la técnica de la ruta crítica, la técnica *PERT*, la simulación de Monte Carlo y el uso del software *Project* y *@RISK*.

Los pasos para determinar el tiempo de terminación total de la mejora de las actividades de mantenimiento, después de implementar la mejora, fueron los siguientes:

1. Definir consideraciones para la planificación del proyecto con la mejora propuesta.
2. Establecer las precedencias y secuencias de los paquetes de actividades de mantenimiento de la mejora propuesta con *Project*.
3. Determinar la ruta crítica del proyecto, en *Project*, de la mejora propuesta.
4. Realizar simulación de Monte Carlo de la mejora propuesta.

3.7.1 Definir consideraciones para la planificación del proyecto con la mejora propuesta

Para evitar imprecisiones en la planificación de la mejora propuesta, se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Toda acción realizada buscará la reducción del tiempo de las actividades de mantenimiento del tándem de molinos.
- La zafra comenzará a principios del mes de diciembre y terminará en el mes de mayo, del año siguiente.

- Durante el periodo de mantenimiento se trabajarán dos turnos de 8 horas, 5 días a la semana.
- El desmontaje se realizará por dos frentes, debido a la incorporación de la segunda grúa:
 - El primero, desmontando los molinos 1 a 3.
 - El segundo, desmontando los molinos 4 a 6.
- Se considerará que el montaje de los molinos se realizará en el mismo orden que el desmontaje, pero ahora considerando la incorporación de la segunda grúa.
- Se ocuparán dos grúas viajeras para trasladar los componentes de los molinos.
- No se tomarán en cuenta los costos de las actividades.
- No se tomarán en cuenta proveedores externos.
- No se tomarán en cuenta los recursos de mano de obra.

3.7.2 Establecer precedencias y secuencias de los paquetes de actividades de mantenimiento de la mejora propuesta en *Project*

Después de definir las consideraciones para la planificación del proyecto con la mejora propuesta (Sección 3.7.1) se establecieron las nuevas precedencias y secuencias de los paquetes de actividades de mantenimiento en *Project*, para ello, se consideró lo siguiente:

1. La estructura del proyecto que se desarrolló en la Sección 3.6.3.2 se tomó de base para el nuevo archivo de *Project* que se creó para la mejora propuesta, el cual incluye:
 - a. Las actividades y paquetes de mantenimiento (Sección 3.6.2).
 - b. El calendario base “Mantenimiento de actividades del tándem” (Sección 3.6.3.1).
 - c. Los días laborales de la semana: de lunes a viernes (Sección 3.6.3.1).
 - d. El horario laboral del proyecto: desde 7 a.m. hasta 11 p.m. (Sección 3.6.3.1).
 - e. El horario predeterminado de entrada: 7 a.m.; y de salida: 11 p.m. (Sección 3.6.3.1).
 - f. La jornada laboral de 16 horas (Sección 3.6.3.1).
 - g. La semana laboral de 80 horas (Sección 3.6.3.1).
 - h. Sólo 20 días por mes (Sección 3.6.3.1).
 - i. Las estimaciones de los tiempos óptimos, medios, pésimos y estándar (Sección 3.6.5).

- j. Las columnas “Predecesoras” y “Sucesoras” (Sección 3.6.3.3).
2. Se siguieron los pasos descritos en la Sección 3.6.3.3 para el establecimiento de las nuevas precedencias y nuevas secuencias de los paquetes de actividades.
 3. Se utilizaron las vistas “Diagrama de Gantt” y “Diagrama de relaciones” (Sección 3.6.3.3) como apoyo para establecer las nuevas precedencias y nuevas secuencias de los paquetes de actividades, debido a la cantidad de paquetes enlistados (543 paquetes, Sección 3.6.2).

El resultado obtenido de las tres acciones anteriores se muestra en un archivo que se describe en el Anexo 5 (Archivo A5.8).

3.7.3 Determinar la ruta crítica del proyecto, en *Project*, de la mejora propuesta

Teniendo registradas las estimaciones de los tiempos óptimos, medios y pésimos (sección 3.6.5) se realizaron las acciones descritas en la Sección 3.6.6 para determinar la ruta crítica del proyecto de la mejora propuesta.

La Tabla 3.24 muestra los resultados de los cuatro tiempos de terminación calculados en *Project*, con sus fechas de inicio y fin, mismos que se pueden observar en la Figura 3.49. Además, la Figura 3.51 muestra en color rojo algunos paquetes de actividades que forman parte de la ruta crítica del proyecto. La totalidad de las actividades que forman parte de la ruta crítica se muestra en un archivo que se describe en el Anexo 5 (Archivo A5.8).

Tabla 3. 24 Resultados de los tiempos de terminación optimistas, medios, pesimistas y estándar de los paquetes de actividades de mantenimiento, con *Project* (Elaboración propia).

Tiempos	Tiempo de terminación (días)	Fecha de inicio	Fecha fin
Tiempo de terminación optimista	63.62 días	Lunes 16/05/16	Jueves 11/08/16
Tiempo de terminación medio	80.26 días	Lunes 16/05/16	Lunes 05/09/16
Tiempo de terminación pesimista	108.3 días	Lunes 16/05/16	Jueves 13/10/16
Tiempo de terminación estándar	81.92 días	Lunes 16/05/16	Martes 06/09/16

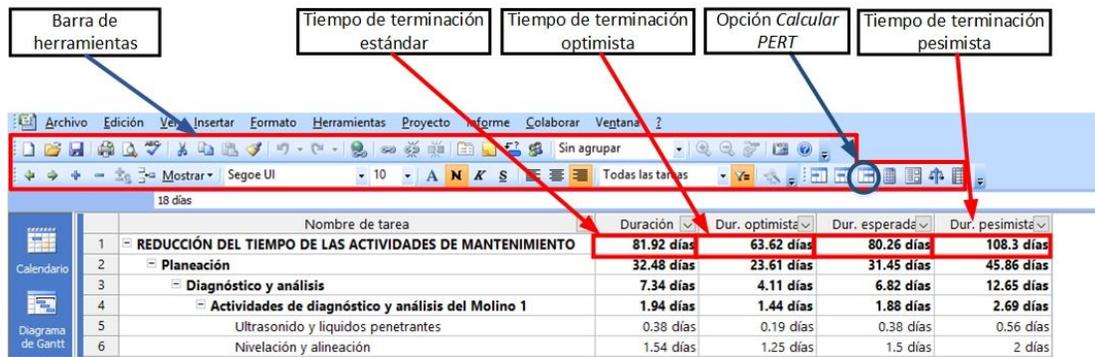


Figura 3. 51 Opción *Calcular PERT* y tiempos de terminación de paquetes de actividades (Elaboración propia).

3.7.4 Realizar simulación de Monte Carlo de la mejora propuesta

Para determinar el tiempo de terminación de las actividades de mantenimiento después de la mejora propuesta, y obtener un parámetro de comparación entre el tiempo de terminación total antes de la mejora y el tiempo de terminación total después de implementarla, se ejecutaron los pasos de la Sección 3.6.7 para realizar la simulación de Monte Carlo:

1. Crear un modelo de simulación.
2. Preparar el modelo para correr la simulación de Monte Carlo.
3. Ejecutar la simulación de Monte Carlo.
4. Analizar los resultados.

3.7.4.1 Crear un modelo de simulación

La base para el modelo de simulación de la mejora propuesta, que se describe en el Anexo 5 (Archivo A5.7), fue el modelo que se creó en la Sección 3.6.7.1

El modelo de simulación realizado en la Sección 3.6.7.1 fue hecho adaptable a cualquier cambio que se realizara en él, especialmente al introducir las distribuciones de probabilidad y al calcular el tiempo de terminación total de la mejora propuesta. Por esta razón, al modelo de mejora que se describe en el Anexo 5 (Archivo A5.9) sólo tuvieron que introducirse las nuevas precedencias y nuevas secuencias de los paquetes de actividades establecidas en la Sección 3.7.2.

3.7.4.2 Preparar el modelo para correr la simulación de Monte Carlo

Se preparó el modelo de mejora para la simulación de Monte Carlo, realizando lo siguiente:

1. Se definieron las variables de entrada del modelo.
Las variables de entrada que se definieron para simular los posibles resultados del tiempo de terminación total de la mejora propuesta fueron los paquetes de actividades.
2. Se definieron las variables de salida del modelo.
La variable de salida que se definió, y en cuyo valor está el interés, fue el “*tiempo de terminación total de la mejora*”.
3. Se definió la distribución de probabilidad a simular (incertidumbre).
La distribución de probabilidad *PERT* se definió como la distribución de probabilidad a simular, como se mostró en la Sección 3.6.7.
4. Introducir las distribuciones de probabilidad *PERT* a las variables de entrada.
Para introducir las distribuciones de probabilidad *PERT* a las variables de entrada se realizaron los pasos descritos en el mismo paso de la Sección 3.6.7.2 (punto 4).
5. Introducir la función *RiskOutput* a las variables de salida.
Para introducir la función *RiskOutput* a las variables de salida se realizaron los pasos descritos en la Sección 3.6.7.2 (punto 5).

3.7.4.3 Ejecutar la simulación de Monte Carlo

Una vez introducidas las distribuciones de probabilidad *PERT* en las variables de entrada y las funciones *RiskOutput* en la variable de salida (Sección 3.7.4.2) del modelo de mejora se ejecutó la simulación de Monte Carlo. Para ello, se determinó realizar el mismo número de corridas óptimas que se calculó en la Sección 3.6.7.3, es decir, 10 corridas óptimas independientes y 100 iteraciones. El resultado de realizar las 10 simulaciones independientes se muestra en la Tabla 3.25.

3.7.4.4 Analizar los resultados de la simulación de Monte Carlo

Una vez ejecutada la simulación de Monte Carlo se analizaron los resultados de la variable de salida: *tiempo de terminación total de la mejora*.

Tabla 3. 25 Resultados de las 10 corridas óptimas, la media y la varianza, de la mejora propuesta (Elaboración propia).

Corridas piloto	Tiempos de terminación total (días)
1	82.1626
2	82.1612
3	82.1570
4	82.1524
5	82.1461
6	82.1330
7	82.1299
8	82.1322
9	82.1386
10	82.1357
Media (\bar{x})	82.1448
Varianza ($S_{(n)}^2$)	0.0001594

Para analizar los resultados de la variable de salida se realizaron los siguientes dos tipos de análisis:

- Análisis de probabilidad.

Con base en la gráfica de densidad de probabilidad de la variable de salida (Figura 3.52) se concluyó lo siguiente:

- Existe un 5% de probabilidad de que el proyecto termine en menos de 80.24 días, un 90% de probabilidad de que termine entre 80.24 y 84.04 días y un 5% de que termine después de 84.04 días.
- La media del tiempo de terminación total de la mejora fue de 82.1448 días.
- La desviación estándar del tiempo de terminación total de la mejora fue de 0.012.

La Tabla 3.26 muestra las probabilidades del *tiempo de terminación total de la mejora* en días.

- Análisis de sensibilidad.

Debido a que en el modelo de simulación de la mejora se realizaron 10 simulaciones (Sección 3.7.4.3) se generó una gráfica de tornado de coeficientes de correlación para cada una de estas.

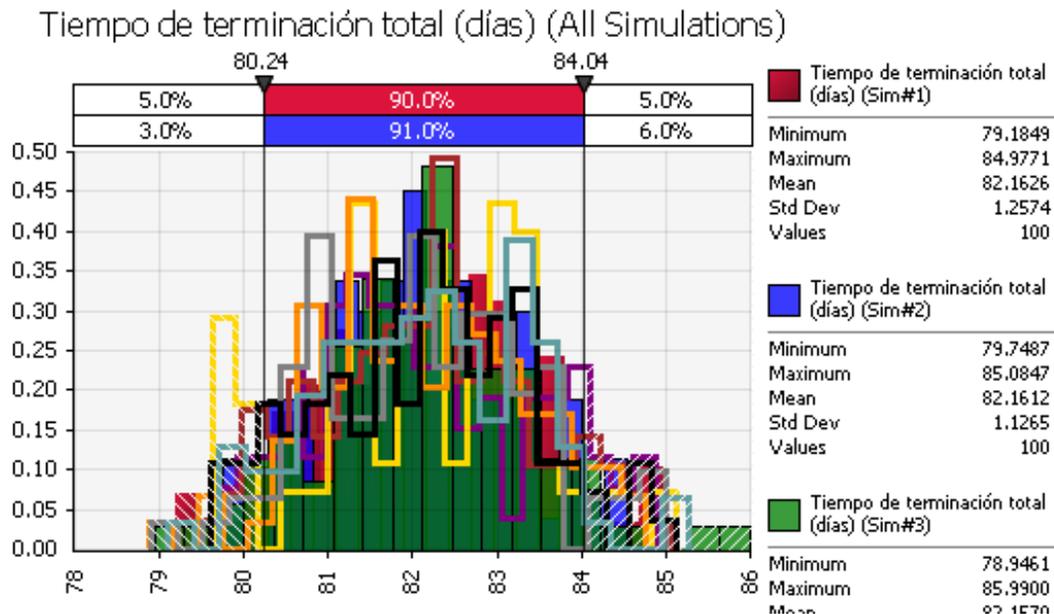


Figura 3. 52 Gráfica de densidad de probabilidad de la variable de salida tiempo de terminación total de la mejora (@RISK for Excel, 2009).

Tabla 3. 26 Probabilidades de terminación del proyecto de la mejora propuesta (Elaboración propia).

Probabilidades	Tiempo de terminación total de la mejora (días)
10 %	80.4572
20 %	81.0047
30 %	81.3275
40 %	81.7828
50 %	82.1448
60 %	82.5624
70 %	82.8482
80 %	83.2352
90 %	83.7033
95 %	84.0372

La Figura 3.53 sólo muestra la gráfica de la primera simulación, de la cual se concluyó lo siguiente:

- La variable de entrada “Fabricación (interna y/o externa)” (L30) tiene el coeficiente de correlación positivo más alto con un valor de 0.76, por lo tanto, es la variable de entrada más significativa en determinar el tiempo de terminación total de la mejora del proyecto. Otras variables de entrada que son significativas para determinar el tiempo de terminación total de la mejora son las variables “Blindaje de cuchilla central” (L181) del Molino 2 y “Montaje de raspador inferior bagacero” (L316) del Molino 3, con un valor de 0.35 y 0.29, respectivamente. En cambio, las variables de entrada “Desmontaje de chumaceras de reposo” (L360) del Molino 4, “Montaje de sellos de jugo bagacero” (L198) del Molino 2 y “Blindaje de raspador inferior bagacero” (L285) del Molino 3, tienen coeficientes de correlación negativos con un valor de -0.28, -0.26 y -0.26, respectivamente, lo que significa que entre mayor sea el *tiempo de terminación total de la mejora* mayor será el valor negativo de estas variables.

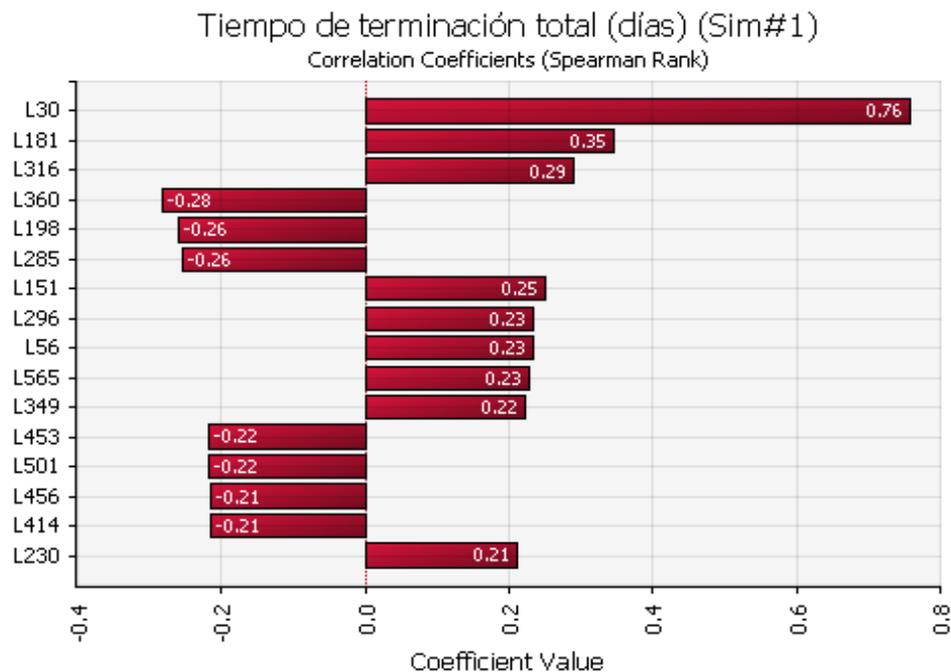


Figura 3. 53 Gráfica de tornado de coeficientes de correlación entre variables de entrada y variable de salida de la mejora propuesta (@RISK for Excel, 2009).

Para concluir con el análisis de sensibilidad se creó una gráfica de barras con las variables de entrada más significativas en determinar el tiempo de terminación total de la mejora del proyecto. La gráfica de barras se realizó tomando en cuenta los coeficientes de correlación de las variables de entrada con valor superior o igual a 0.30 los cuales se obtuvieron de las gráficas de tornado de las 10 simulaciones realizadas.

La Figura 3.54 muestra las variables de entrada más significativas de las cuales se concluye que las variables de entrada “Fabricación (interna y/o externa)” (L30) y “Receso” (L36) son las variables que más se repiten en el análisis de sensibilidad realizado y, por lo tanto, las variables que el superintendente de maquinaria, jefes de molinos y personal deben atender para que se reduzca aún más el tiempo de terminación total de la mejora o para mejorar el mantenimiento del tándem de molinos.

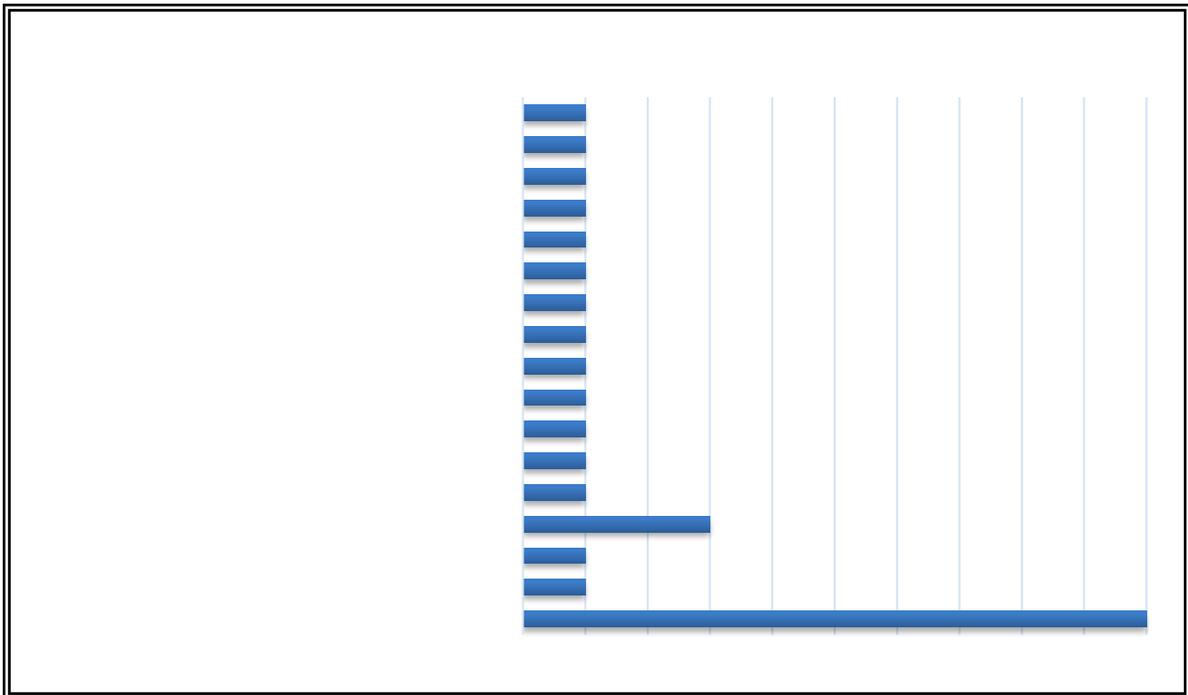


Figura 3. 54 Variables de entrada más significativas en determinar el tiempo de terminación total de la mejora del proyecto (Elaboración propia).

3.8 Comparar resultados de tiempos de terminación totales antes y después de la mejora, mediante el uso de una prueba estadística

Con la intención de conocer si se redujo el tiempo de terminación total del proyecto, se realizó una comparación de los resultados antes y después de la mejora. La Tabla 3.27 muestra la comparación de los principales resultados obtenidos en la Sección 3.6 contra los principales resultados obtenidos en la Sección 3.7. Para realizar la comparación de los resultados se realizó lo siguiente:

1. Se eligió el parámetro a evaluar.

El parámetro seleccionado fue el tiempo de terminación total.

2. Se determinó el tipo de hipótesis.

Debido a que se deseaba probar que el tiempo de terminación se reducía al agregar una segunda grúa viajera, se estableció la prueba de hipótesis para comparación de medias de tipo unilateral superior, con muestra pequeña.

3. Se eligió la hipótesis nula y la hipótesis alternativa.

La hipótesis nula y alternativa quedaron definidas de la siguiente manera:

H_0 : El tiempo de terminación total actual (μ_1) es igual al tiempo de terminación total de la mejora (μ_2).

H_1 : El tiempo de terminación total actual (μ_1) es mayor al tiempo de terminación total de la mejora (μ_2).

Tabla 3. 27 Comparación de resultados antes de la mejora vs después de la mejora propuesta (Elaboración propia).

	Antes de la mejora	Después de la mejora
Tiempo óptimo	83.57 días	63.62 días
Tiempo medio	112.03 días	80.26 días
Tiempo pésimo	160.62 días	108.3 días
Tiempo estándar	114.67 días	81.92 días
Media	115.1561 días	82.1448 días
Varianza	0.0003	0.0001594
Iteraciones	100	100
Simulaciones	10	10

Es decir:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 > \mu_2$$

4. Se estableció el nivel de significancia α .

Se consideró utilizar un nivel de significancia del 5% para la realización de la prueba de hipótesis sobre el tiempo de terminación total.

5. Se determinó la zona crítica o de rechazo.

Al establecerse en el punto 2 que la prueba es unilateral superior, la zona de rechazo quedo indicada mediante la Ecuación 3.2²³:

$$t > t_{\alpha, n_1+n_2-2} \dots \dots \dots Ec 3.2$$

Con el nivel de significancia del punto 4 y haciendo uso de la tabla de *t* de *student* se determinó que la zona de rechazo está indicada por el valor de $t=1.73$, tal como se muestra en la Ecuación 3.3.

$$t > t_{\alpha, n_1+n_2-2} = t > t_{0.05, 18} = t > 1.73 \dots \dots \dots Ec 3.3$$

6. Se calculó la media y varianza de la muestra.

La media y la varianza del tiempo de terminación total, de los paquetes de actividades de mantenimiento, se mostró en la Tabla 3.27.

7. Se calculó el estimador combinado de las varianzas muestrales S_p .

Teniendo la media y la varianza (Tabla 3.27) se calculó el estimador S_p (Ecuación 2.11, Sección 2.6.4). El estimador combinado, una vez sustituidos los datos, fue de 0.015, tal como se muestra en la Ecuación 3.4:

$$S_p = \sqrt{\frac{(n_1-1)S_1^2 + (n_2-1)S_2^2}{n_1+n_2-2}} = \sqrt{\frac{(10-1)0.0003 + (10-1)0.0001594}{10+10-2}} = 0.015 \dots \dots \dots Ec 3.4$$

²³ En la Sección 2.6.4 se describió la teoría para realizar esta prueba de hipótesis.

8. Se calculó el estadístico de prueba t .

Después de haber calculado el estimado S_p (punto 7) se realizó el cálculo del estadístico de prueba t , como se muestra en la Ecuación 3.5

$$t = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} = \frac{(115.1561 - 82.1448) - 0}{0.015 \sqrt{0.1 + 0.1}} = 4,921.03 \dots \dots \dots Ec. 3.5$$

9. Se calculó el estadístico de prueba t .

Una vez calculado el estadístico de prueba t (punto 8) se realizó la comparación entre este y el valor de t en tablas (punto 5) como se muestra en la Ecuación 3.6 (Figura 3.55):

$$4,921.03 > 1.73 \dots \dots \dots Ec 3.6$$

10. Se interpretaron los resultados.

Dado que t (4,921.03) es mayor que 1.73 se concluye que existe evidencia suficiente para rechazar H_0 , por lo tanto, existe suficiente evidencia para asegurar que el tiempo de terminación actual es mayor que el tiempo de terminación total después de la mejora, dando como resultado una reducción del tiempo de terminación total del mantenimiento del tándem de molinos.

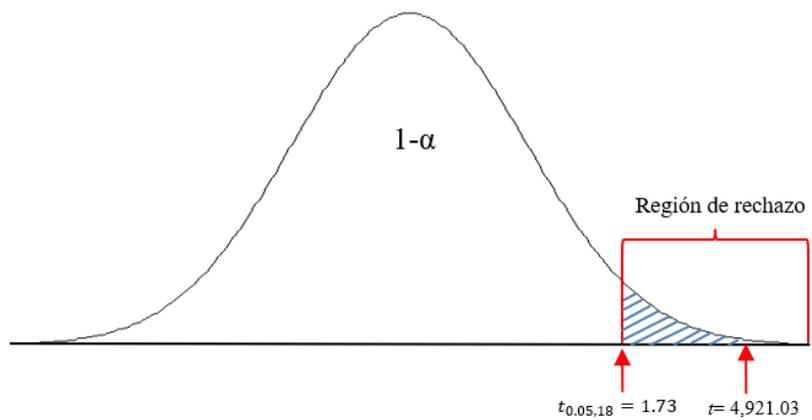


Figura 3. 55 Región de rechazo (Elaboración propia).

3.9 Análisis de resultados

En este capítulo se presentó el desarrollo de la metodología utilizada para la reducción del tiempo de las actividades de mantenimiento del tándem de molinos de un ingenio azucarero. Dicha metodología inició con la selección del proyecto, para ello, se realizó una plática con el gerente de investigación, desarrollo tecnológico e innovación del grupo azucarero, se describieron las situaciones presentes en el ingenio azucarero, se determinó el área de oportunidad (área de molinos) para realizar el presente trabajo, luego se plantearon objetivos para definir un factor común de las situaciones presentes (tándem de molinos), se definieron posibles proyectos a desarrollar y se presentaron argumentos con la finalidad de identificar el impacto que tendría cada proyecto en la solución a las situaciones presentes. Al final se seleccionó el proyecto llegando a la conclusión que el factor tiempo era vital para el grupo azucarero en su afán de mejorar su administración y control en el área de molinos.

Cuando se finalizó la selección del proyecto se establecieron las técnicas de ingeniería industrial apropiadas para la resolución de la problemática y su posterior aplicación para obtener los mejores resultados posibles.

Después de establecer las técnicas de ingeniería industrial se desarrolló una estructura de descomposición del trabajo para representar las relaciones entre las actividades de mantenimiento y el proyecto. Además, se determinó el tiempo de terminación total mediante la aplicación de la ruta crítica, la técnica *PERT* y la simulación de Monte Carlo utilizando el *software @RISK, Project y Excel*. Esta medida de desempeño fue comparada con el sistema actual para determinar si existía alguna mejoría después de la implementación de la mejora propuesta.

Finalmente, se validó la mejora observada durante la comparación del tiempo de terminación total actual y el tiempo de terminación total después de la mejora mediante la aplicación de una prueba estadística para aseverar si los resultados de la mejora fueron significativos desde el punto de vista estadístico.

Cada una de las técnicas de ingeniería industrial aplicadas en el proyecto se seleccionó por la aportación que podía hacer al presente trabajo. Algunas de las aportaciones logradas mediante la aplicación de estas técnicas fueron las siguientes:

- Estructura de descomposición del trabajo (*WBS*). Se usó para visualizar el trabajo que tendrá que realizarse para reducir el tiempo de las actividades de mantenimiento del tándem de molinos y para representar las relaciones entre las actividades de mantenimiento y el proyecto.
- Ruta crítica (*CPM*). Se utilizó para planificar las actividades de mantenimiento del tándem de molino.
- Técnica de Evaluación y Revisión de Proyectos (*PERT*). Se utilizó con el objetivo de estimar el tiempo de terminación total del proyecto y de los tiempos óptimos, medios y pésimos de las actividades de mantenimiento del tándem.
- Simulación de Monte Carlo. Se usó para introducir incertidumbre a las actividades de mantenimiento mediante distribuciones de probabilidad.

Con base en lo anterior, los resultados logrados en el presente trabajo fueron los siguientes:

- Para el mantenimiento actual:
 - Se calculó un 5% de probabilidad de que el mantenimiento del tándem de molinos termine en menos de 112.82 días.
 - Se calculó un 90% de probabilidad de que el mantenimiento del tándem de molinos termine entre 112.82 y 117.24 días.
 - Se calculó un 5% de que el mantenimiento del tándem de molinos termine después de 117.24 días.
 - La media del tiempo de terminación total actual del mantenimiento del tándem fue de 115.1561 días.
 - La desviación estándar del tiempo de terminación total actual del mantenimiento del tándem fue de 0.017.
 - Se determinó que las variables de entrada más significativas en el mantenimiento actual del tándem de molinos son las variables “Fabricación (interna y/o

externa)” (L30) y “Receso” (L36), por lo tanto, son las variables que el superintendente de maquinaria, jefes de molinos y personal deben atender para que se reduzca aún más el tiempo de terminación total actual del mantenimiento.

- Para el mantenimiento después de la mejora:
 - Se calculó un 5% de probabilidad de que el mantenimiento del tándem de molinos termine en menos de 80.24 días.
 - Se calculó un 90% de probabilidad de que el mantenimiento del tándem de molinos termine entre 80.24 y 84.04 días.
 - Se calculó un 5% de que el mantenimiento del tándem de molinos termine después de 84.04 días.
 - La media del tiempo de terminación total de la mejora, del mantenimiento del tándem, fue de 82.1448 días.
 - La desviación estándar del tiempo de terminación total de la mejora, del mantenimiento del tándem, fue de 0.012.
 - Se determinó que las variables de entrada más significativas en el mantenimiento después de la mejora son las variables “Fabricación (interna y/o externa)” (L30) y “Receso” (L36), por lo tanto, son las variables que el superintendente de maquinaria, jefes de molinos y personal deben atender para que se reduzca aún más el tiempo de terminación total de la mejora.
- Comparando los resultados de lo actual y lo propuesto, se observaron reducciones del tiempo de las actividades de mantenimiento de hasta 33 días hábiles -tomando en cuenta que se trabaja de lunes a viernes durante el mantenimiento-, es decir, el tiempo de las actividades de mantenimiento con la mejora propuesta se logró reducir un 28.67%. Estos resultados fueron validados mediante la aplicación de una prueba estadística lo que sustentó, con evidencia estadística, los resultados de la mejora que se propuso al ingenio azucarero, logrando cumplir de manera satisfactoria con el objetivo del proyecto: reducir el tiempo de las actividades de mantenimiento del tándem de molinos de un ingenio azucarero, mediante la aplicación de técnicas y herramientas de ingeniería industrial.

3.10 Conclusión

Durante este capítulo se describió el desarrollo de una metodología de siete pasos (Sección 3.1) con el objetivo de reducir el tiempo de las actividades de mantenimiento del tándem de molinos mediante la implementación de técnicas y herramientas de ingeniería industrial. Esta metodología desarrolló puntos tales como la selección del proyecto a desarrollar, la determinación de la situación actual de las actividades de mantenimiento, el establecimiento de las técnicas de ingeniería industrial, la determinación de los tiempos de terminación de las actividades de mantenimiento antes y después de la mejora y se culminó con la comparación de resultados de tiempos de terminación totales, antes y después de la mejora, mediante el uso de una prueba estadística.

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

González *et al* (2009) menciona que las industrias desarrollan estrategias para la creación de proyectos como respuesta a los avances tecnológicos, la globalización de los mercados y la alta competitividad. Por ello, una buena gestión de proyectos pueden ser una ventaja competitiva importante para las industrias (Pampliega, 2014). En este contexto, grupos empresariales en México, que poseen ingenios azucareros, han realizado proyectos tecnológicos de clase mundial y puesto en marcha prácticas innovadoras para mejorar la administración y control de sus procesos.

El presente trabajo de tesis se desarrolló en un ingenio azucarero que pertenece a un grupo empresarial formado por cuatro ingenios azucareros, ubicado en el [REDACTED] estado de Veracruz. Impulsado por mejorar la administración y control de sus procesos, se desarrolló un proyecto para reducir los tiempos de las actividades de mantenimiento del tándem de molinos del ingenio azucarero basándose en la siguiente metodología:

1. Seleccionar un proyecto.
2. Determinar la situación actual de las actividades de mantenimiento del tándem de molinos.
3. Establecer las técnicas de ingeniería industrial.
4. Desarrollar la Estructura de Descomposición del Trabajo (*WBS*).
5. Determinar el tiempo de terminación de las actividades de mantenimiento, antes de la mejora propuesta.
6. Determinar el tiempo de terminación de las actividades de mantenimiento, después de la mejora propuesta.
7. Comparar resultados de tiempos de terminación totales antes y después de la mejora, mediante el uso de una prueba estadística.

El primer paso de la metodología permitió seleccionar el proyecto, realizando lo siguiente:

- Se presentó la problemática del ingenio.
- Se determinó el área de oportunidad para realizar el presente trabajo (área de molino).
- Se plantearon objetivos para definir un factor común de la problemática (tándem de molinos).
- Se definieron posibles proyectos a desarrollar.
- Se presentaron argumentos a la problemática y los posibles proyectos a desarrollar.

Una vez seleccionado el proyecto, los pasos dos a seis, permitieron determinar la situación actual de las actividades de mantenimiento del tándem de molinos, establecer adecuadamente las técnicas de ingeniería industrial y su posterior aplicación para obtener los mejores resultados posibles.

El último paso de la metodología permitió validar la mejora observada durante la comparación del tiempo de terminación total actual y el tiempo de terminación total después de la mejora mediante la aplicación de una prueba estadística para aseverar si los resultados de la mejora fueron significativos desde el punto de vista estadístico.

Para reducir los tiempos de las actividades de mantenimiento del tándem de molinos del ingenio azucarero se implementaron las siguientes técnicas de ingeniería industrial:

- Estructura de descomposición del trabajo (*WBS*). Se usó para visualizar el trabajo que tendrá que realizarse para reducir el tiempo de las actividades de mantenimiento del tándem de molinos y para representar las relaciones entre las actividades de mantenimiento y el proyecto.
- Ruta crítica (*CPM*). Se utilizó para planificar las actividades de mantenimiento del tándem de molino.
- Técnica de Evaluación y Revisión de Proyectos (*PERT*). Se utilizó con el objetivo de estimar el tiempo de terminación total del proyecto y de los tiempos óptimos, medios y pésimos de las actividades de mantenimiento del tándem.

- Simulación de Monte Carlo. Se usó para introducir incertidumbre a las actividades de mantenimiento mediante distribuciones de probabilidad.

Para la evaluación final de resultados para el proyecto se utilizó como indicador el tiempo de terminación total del proyecto, el cual se calculó a partir de los resultados arrojados por el *software @RISK*, el *software Project* y el *software Excel*.

En comparación de los resultados de la situación actual y la propuesta de solución, se observó reducciones del tiempo de las actividades de mantenimiento de hasta 33 días. Es decir, el tiempo de las actividades de mantenimiento con la mejora propuesta se logró reducir un 28.67%. Estos resultados fueron validados mediante la aplicación de una prueba estadística lo que sustentó los resultados de la mejora que se propuso al ingenio azucarero.

Recomendaciones

Durante la realización de este proyecto de tesis se observaron diversos problemas que se presentaron dentro del área de molinos del ingenio azucarero; por lo tanto, se presentan a continuación algunas recomendaciones que podrían ayudar a la mejora de esta área:

- Monitorear el tiempo de terminación total del mantenimiento del tándem de molinos cada periodo de mantenimiento.
- Realizar un análisis económico financiero para la adquisición de la grúa que se propuso en la mejora.
- Agregar los costos de las actividades del mantenimiento en la administración del proyecto, ya que permitirá incrementar las posibilidades de éxito en la ejecución del mismo.
- Implementar 5 S's en el área de molinos del ingenio azucarero, principalmente para mejorar la organización del trabajo que se realiza en esta área debido al desorden, la falta de limpieza y la falta de esfuerzos por parte del personal en mantener la disciplina en la misma.
- Realizar capacitación constante al personal, jefes de molinos y superintendentes que se involucran en el mantenimiento del tándem de molinos.

- Implementar *SMED* para reducir el tiempo de preparación de las herramientas utilizadas para realizar el mantenimiento de los molinos.
- Implementar teoría de restricciones (*TOC*) para mejorar y administrar los procesos de producción.

Finalmente, el autor del presente trabajo desea expresar su satisfacción en la realización de este proyecto dado que se le permitió aplicar el conocimiento obtenido durante la realización de la maestría en ingeniería industrial. Además, expresar su satisfacción por la experiencia obtenida durante las visitas que se realizaron al ingenio azucarero en estudio y de las personas involucradas que colaboraron en la realización del proyecto de tesis.

Fuentes de información

- @RISK for Excel. (2009). Risk Analysis Add-in for Microsoft Excel.
- Aguilera, N., Galindo, G., Fortanelli, J., & Contreras, C. (2010). Competitividad internacional de la industria azucarera de México. *Theoria*, 7-29.
- Ahuja, H. N., & Walsh, M. A. (1995). *Ingeniería de costos y administración de proyectos*. México: Editorial Alfaomega.
- Antill, J., & Woodhead, R. (1993). *Método de la ruta crítica y sus aplicaciones a la construcción*. México: Editorial Limusa.
- Ariza, D. (2008). *WBS, herramienta de comunicación del trabajo a realizar en un proyecto*. Recuperado el 11 de Mayo de 2017, de Expert consulting: http://expertconsulting.com.co/Articulos/Proyectos/EDT_Estructura%20De%20trabajo.htm
- Arriola, M., & Hernández, J. (2015). *Estadística inferencial. Prueba de hipótesis*. Orizaba, Veracruz, México.
- Azofeifa, C. (2002). Aplicación de la simulación Monte Carlo en la administración de proyectos utilizando Excel y @Cristal Ball. *Uniciencia*, 23-30.
- Baron, C. (2012). *Gestión de obras*. Madrid: Editorial Ars et Via.
- Bazzani, C., & Cruz, E. (2008). Análisis de riesgos en proyectos de inversión un caso de estudio. *Scientia et Technica*, 309-314.
- Catalytic Construction Company. (1970). *Método del camino crítico*. México: Editorial Diana.
- Chatfield, C., & Johnson, T. (2013). *Step by step. Microsoft Project 2013*. USA: Microsoft Press.
- CONADESUCA. (2016a). *Balances mundiales de azúcar*. Recuperado el 11 de Julio de 2016, de SAGARPA: <http://www.cndsca.gob.mx/politica%20comercial/balances/Balances%20mundiales%20do%20Trimestre%202016.pdf>
- CONADESUCA. (2016b). *Guía práctica de los programas de apoyo de la SAGARPA para productores de caña de azúcar 2016*. Recuperado el 10 de Septiembre de 2016, de <http://www.conadesuca.gob.mx/>

- Dominguez, C., Bravo, H., & Sosa, R. (Octubre-diciembre de 2014). Prevención, minimización y control de la contaminación ambiental en un ingenio azucarero de México. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, XV(4), 549-560.
- Faulin, J., & Juan, Á. (2005). *Simulación de Monte Carlo con Excel*. Recuperado el 26 de Mayo de 2017, de Ciencia y técnica administrativa: http://www.cyta.com.ar/biblioteca/bddoc/bdlibros/monte_carlo/monte_carlo.htm
- García , L. R., & Escalante, R. (1997). La agroindustria azucarera en México en el marco de la apertura. *Comercio Exterior*, 975-983.
- González, D., Encarnación, M., Valdez, W., Santos, C., & De Jesús, Y. (2010). *Método del camino crítico CPM-PERT*.
- González, M., Asensio, S., Diego, J., & Alcaide, J. (2009). Análisis del método de la cadena crítica vs método del camino crítico. Viabilidad y conceptos. 56-67.
- Guerrero, N. D. (2014). *Análisis y planificación de un sistema de reutilización de agua*. Orizaba, Veracruz.
- Haugan, G. (2013). *The Government Manager's Guide to the Work Breakdown Structure*. United States of America: Management Concepts.
- Krajewski, L., Ritzman, L., & Malhotra, M. (2008). *Administración de operaciones*. México: Pearson Educación.
- Law, A. M. (2007). *Simulation modeling & analysis*. Tucson, Arizona, USA: Mc Graw-Hill.
- Levin, R., & Rubin, D. (2004). *Estadística para administración y economía*. México: PEARSON EDUCACIÓN.
- Malhotra, N. K. (2008). *Investigación de mercados*. México: PEARSON EDUCATION.
- Maneiro, N., & Mejías, A. (2010). *Estadística para ingeniería*. Valencia: Departamento de Producción Editorial.
- Melendez, R. (1969). *Administración de obras*. Monterrey, Nuevo León: Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Minitab Inc. (2017). *Revisión general de t pareada*. Obtenido de Soporte de Minitab: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/how-to/paired-t/before-you-start/overview/>
- Montaño, A. (1990). *Iniciación al método del camino crítico*. México: Editorial Trillas.

- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2014). *Applied Statistics and Probability for Engineers*. USA: John Wiley & Sons.
- Navidi, W. (2006). *Estadística para ingenieros*. México: Mc Graw Hill.
- Nielsen, S. E. (2016). *Aplicación del método de Monte Carlo para programación de túneles en roca*. Recuperado el 18 de Junio de 2017, de Repositorio académico de la Universidad de Chile: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/139902>
- OBS. (2016). *Microsoft Project: Análisis del Software*. Recuperado el 25 de Mayo de 2017, de OBS Business School: <http://www.obs-edu.com/int/blog-project-management/diagramas-de-gantt/microsoft-project-analisis-del-software>
- Olalde, K. (2016). *Introducción a la gestión del tiempo del proyecto*. Recuperado el 26 de Abril de 2017, de <http://www.ehu.eus/asignaturasKO/PM/Gestion/gespro1va.htm>
- Onofre, J. (2000). *Identificación de fases, tareas y entregables en proyectos informáticos*. Recuperado el 10 de Mayo de 2017, de UPV: <http://www.upv.es/>
- Oracle. (2008). *Oracle Crystal Ball*. Recuperado el 26 de Mayo de 2017, de Oracle: <https://www.oracle.com/lad/products/applications/crystalball/overview/index.html>
- Ortíz Flores, F. (2007). *Diseño de procedimientos matemáticos de sincronización de las operaciones de manufactura utilizando simulación como vehículo de investigación*. Orizaba, Veracruz, México.
- Palisade. (2017). *@RISK para el análisis de riesgo utilizando simulación de MonteCarlo*. Recuperado el 26 de Mayo de 2017, de Palisade: <http://www.palisade-lta.com/risk/>
- Palisade Corporation. (2009). *Guide to Using @RISK*.
- Pampliega, C. (2014). *La Gestión de Proyectos como herramienta estratégica de la empresa*. Recuperado el 10 de Agosto de 2017, de Salinero Pampliega. Project Management: <http://salineropampliega.com>
- Project Management Institute. (2013). *Guía de los fundamentos para la dirección de proyectos*. PMI publications.
- Render, B. (2012). *Métodos cuantitativos para los negocios*. México: Pearson Educación.
- RiskAmp. (2017). *RiskAmp*. Recuperado el 26 de Mayo de 2017, de RiskAmp: <https://www.riskamp.com/>

- Rosero, E., Ramírez, J., & Gómez, A. (2008). Evaluación del desempeño dinámico y la eficiencia energética en molinos de caña de azúcar con accionamientos térmicos y eléctricos. *Revista Energía y Computación*, 25-36.
- Salazar, L. R. (2016). *Planta moledora. Eficiencia y automatización*. Recuperado el 24 de Septiembre de 2016, de Soluciones para industrias SMAR: <http://www.smar.com/espanol/industrias/index#sugar>
- Santiesteban, A., Nápoles, J., & Silva, J. (2015). Propuestas de mejoras energéticas en el área del tándem de un ingenio azucarero de la provincia Las Tunas, Cuba. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 14-21.
- Seal, K. C. (2001). A Generalized PERT/CPM Implementation in a Spreadsheet. *INFORMS Transactions on Education*, 2(1), 16-26.
- Sharma, S. C. (2006). *Operation research: PERT, CPM & Cost Analysis*. New Delhi, India: Editorial Discovery Publishing House.
- SIAP. (2014). *Caña de azúcar*. Recuperado el 11 de Julio de 2016, de SAGARPA: <http://www.siap.gob.mx/cana-de-azucar/>
- Smartsheet. (2017). *The Ultimate Guide to the Critical Path Method*. Recuperado el 10 de Mayo de 2017, de Smartsheet: <https://www.smartsheet.com/critical-path-method>
- Tovar, J. A. (2001). *Metodología y aplicación de sistemas informáticos para la programación, planeación y control de los proyectos de construcción en las empresas constructoras*. México.
- Walpole, R., Myers, R., Ye, K., & Myers, S. (2012). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. México: PEARSON EDUCACIÓN.

Anexo 1

Distribución de probabilidad beta

El Anexo 1 muestra la descripción de la distribución de probabilidad beta, mencionada en la Sección 2.2.2, utilizada para representar la duración de actividades en un proyecto.

Función beta

La variable aleatoria x tiene una distribución beta comprendida en el intervalo $[0,1]$, siendo $\alpha > 0$ y $\beta > 0$, si su función de densidad es dada por la Ecuación A1.1 (Walpole *et al*, 2012):

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{B(\alpha, \beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{(\beta-1)}, & 0 < x < 1, \\ 0, & \text{en otro caso.} \end{cases} \dots\dots\dots \text{Ec. A1.1}$$

El término $B(\alpha, \beta)$ se conoce como la función beta, y de allí adquiere su nombre esta distribución. La función beta se define en la Ecuación A1.2.

$$B(\alpha, \beta) = \int_0^1 x^{(\alpha-1)} (1-x)^{(\beta-1)} dx, \quad \text{para } \alpha, \beta > 0 \dots\dots\dots \text{Ec. A1.2}$$

Media y varianza de la distribución beta

La distribución de probabilidad de cada actividad, en *PERT*, se suele caracterizar por su media y su desviación, para ello, se debe estimar el tiempo optimista (a) y el tiempo pesimista (b) de cada actividad.

Para estimar la media de la distribución beta se usa una estimación de la moda de la distribución beta (Ecuación A1.3).

$$m_0 = \frac{(p-1)b + (q-1)a}{p+q-2} \dots\dots\dots \text{Ec. A1.3}$$

La distribución beta utilizada en *PERT*, como modelo probabilístico, está especificada por sus parámetros $p = 3 \mp \sqrt{2}$ y $q = 3 \pm \sqrt{2}$. Los términos p y q de la Ecuación A1.3 son equivalentes a los términos α y β de la función beta $B(\alpha, \beta)$, antes descrita.

Multiplicando la Ecuación A1.3 por $p + q - 2$, se obtiene:

$$(p + q - 2)m_0 = (p - 1)b + (q - 1)a \dots\dots\dots Ec. A1.4$$

Restando $(p + q - 2)a$, en ambos miembros de la Ecuación A1.4, queda:

$$(p + q - 2)(m_0 - a) = (p - 1)(b - a) \dots\dots\dots Ec. A1.5$$

Dividiendo por $(b - a)$ la Ecuación A1.5, resulta:

$$(p + q - 2) \frac{m_0 - a}{b - a} = p - 1 \dots\dots\dots Ec. A1.6$$

Definiendo $k = p + q - 2$ y $m = \frac{m_0 - a}{b - a}$ se obtiene:

$$m = \frac{p - 1}{k} \dots\dots\dots Ec. A1.7$$

A partir de la Ecuación A1.7 se obtiene:

$$p = 1 + km \dots\dots\dots Ec. A1.8$$

Sustituyendo la Ecuación A1.8 en $k = p + q - 2$ se tiene:

$$q = 1 + k(1 - m) \dots\dots\dots Ec. A1.9$$

Las Ecuaciones A1.8 y A1.9 determinan los parámetros desconocidos p y q de la distribución beta, en función de unos nuevos parámetros mucho más interpretables: k (ponderación variable del valor más probable) y m (valor estándar del valor modal dado por un experto).

La expresión para el valor esperado x se muestra en la Ecuación A1.10 Teniendo en cuenta p (Ecuación A1.8) y q (Ecuación A1.9) de la moda de la distribución beta, se determina la formula PERT sustituyendo estos términos en la Ecuación A1.10, obteniendo la Ecuación A1.11.

$$E(x) = \frac{p}{p+q}b + \frac{q}{p+q}b \dots\dots\dots Ec. A1.10$$

$$E(x) = \frac{a + (p + q - 2)m + b}{p + q} \dots\dots\dots Ec. A1.11$$

Sustituyendo los valores $p = 3 \mp \sqrt{2}$ y $q = 3 \pm \sqrt{2}$ en la Ecuación A1.11 se obtiene:

$$E(x) = \frac{a + 4m + b}{6} \dots\dots\dots Ec. A1.12$$

En cuanto a la varianza de la distribución beta se tiene la Ecuación A1.13:

$$V[x] = \frac{pq(b-a)^2}{(p+q+1)(p+q)^2} \dots\dots\dots Ec. A1.13$$

Teniendo en cuenta p (Ecuación A1.8) y q (Ecuación A1.9) de la moda de la distribución beta e igualando la Ecuación A1.13 a la expresión constante 1/36, que es la característica de las distribuciones beta de varianza constante, se obtiene la Ecuación A1.14.

$$V[x] = \frac{(p-o)^2}{36} \dots\dots\dots Ec. A1.14$$

Anexo 2

Formato para registrar estimaciones de los tiempos óptimos, medios y pésimos

El Anexo 2 incluye un formato que se utilizó para registrar las estimaciones de los tiempos óptimos, medios y pésimos de los paquetes de actividades (Sección 3.6.5). El formato tiene cinco columnas: número de identificación, nombre, tiempo óptimo, tiempo medio y tiempo pésimo.

Identificador	Nombre	Tiempos (días)		
		Óptimo	Medio	Pésimo
1	REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE LAS ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO			
2	Planeación			
3	Diagnóstico y análisis			
4	Actividades de diagnóstico y análisis del Molino 1			
5	Ultrasonido y líquidos penetrantes			
6	Nivelación y alineación			
7	Actividades de diagnóstico y análisis del Molino 2			
8	Ultrasonido y líquidos penetrantes			
9	Nivelación y alineación			
10	Actividades de diagnóstico y análisis del Molino 3			
11	Ultrasonido y líquidos penetrantes			
12	Nivelación y alineación			
13	Actividades de diagnóstico y análisis del Molino 4			
14	Ultrasonido y líquidos penetrantes			
15	Nivelación y alineación			
16	Actividades de diagnóstico y análisis del Molino 5			
17	Ultrasonido y líquidos penetrantes			
18	Nivelación y alineación			
:	:	:	:	:
:	:	:	:	:
:	:	:	:	:
:	:	:	:	:
:	:	:	:	:
623	Ajuste			
624	Ajuste de cuchilla central y raspadores			
625	Gramilación			
626	Gramilación de mazas y cuchilla central			
627	Acoplamiento			
628	Acoplamiento entre molino y transmisión			
629	Prueba e inspección			
630	Prueba e inspección			
631	Inspección de líneas de presión hidráulica			
632	Inspección de líneas de lubricación y enfriamiento			
633	Inicio de zafra			
634	Inicio de zafra			

Figura A2. 1 Formato de registro de las estimaciones de los tiempos óptimos, medios y pésimos (Elaboración propia).

Anexo 3

Formato para estimar tiempos óptimos, medios y pésimos de las actividades “Fabricación interna y/o externa” y “Mantenimiento”

El Anexo 3 contiene un formato en *Excel* que ayudó a estimar los tiempos óptimos, medios y pésimos de las actividades “Fabricación interna y/o externa” y “Mantenimiento” en un escenario ideal (Sección 3.6.2), haciendo uso de la estadística juntamente con la experiencia de los expertos en el mantenimiento para validar la obtención de estos tiempos. Las acciones que se realizaron para llenar el formato se mostraron en la Sección 3.6.5.

No.	COMPONENTES	TOTAL DE COMPONENTES	AÑO 1		...	AÑO 6	
			MANTENIMIENTO	FABRICACIÓN	...	MANTENIMIENTO	FABRICACIÓN
1	CAMPANAS DE MACERACIÓN	4			...		
2	LÍNEAS DE MACERACIÓN	4			...		
3	RASPADORES INFERIORES BAGACEROS	6			...		
4	RASPADORES SUPERIORES TIPO L	6			...		
5	FLAUTAS DE AGUA DE IMBIBICIÓN	4			...		
6	CONDUCTORES DONELLY	5			...		
7	SHUTES	6			...		
8	COPLÉS FLEXIBLE	6			...		
9	CABEZOTES	12			...		
10	CHUMACERAS INTEGRALES	12			...		
11	CHUMACERAS DE REPOSO	12			...		
12	BOTAS	12			...		
13	BRIDAS DE MAZA SUPERIOR	12			...		
14	CHUMACERAS DE 4TA. MAZA	12			...		
15	TAPAS DE CHUMACERAS INFERIORES	24			...		
16	BISAGRAS	24			...		
17	SILLETAS INFERIORES (BAGACERAS Y CAÑERAS)	24			...		
18	CHUMACERAS INFERIORES (BAGACERAS Y CAÑERAS)	24			...		
19	CUCHILLA CENTRAL	6			...		
20	PERNOS EXCÉNTRICOS	12			...		
21	PUENTE DE CUCHILLA CENTRAL	6			...		
22	SOPORTES DEL PUENTE DE CUCHILLA CENTRAL	6			...		
23	REMAQUINADO DE MAZAS	18			...		
24	ENCAMISADO DE MAZAS	18			...		
25	CORONAS	18			...		
TOTAL DE PIEZAS		293	0	0	...	0	0
TIEMPO ÓPTIMO					...		
TIEMPO MEDIO					...		
TIEMPO PÉSIMO					...		

PROMEDIO DE COMPONENTES A DAR MANTENIMIENTO	0
PROMEDIO DE COMPONENTES FABRICADOS	0

PROMEDIO DE TIEMPO ÓPTIMO (MANTENIMIENTO)	0
PROMEDIO DE TIEMPO ÓPTIMO (FABRICACIÓN)	0
PROMEDIO DE TIEMPO MEDIO (MANTENIMIENTO)	0
PROMEDIO DE TIEMPO MEDIO (FABRICACIÓN)	0
PROMEDIO DE TIEMPO PÉSIMO (MANTENIMIENTO)	0
PROMEDIO DE TIEMPO PÉSIMO (FABRICACIÓN)	0

Figura A3. 1 Formato para estimar tiempos óptimos, medios y pésimos de las actividades “Fabricación interna y/o externa” y “Mantenimiento” (Elaboración propia).

Anexo 4

Pasos para desarrollar el modelo de simulación

El Anexo 4 muestra, de manera detallada, los pasos que se realizaron para crear del modelo de simulación que se describe en el Anexo 5 (Archivo A5.7). El modelo de simulación se desarrolló utilizando un total de 11 hojas de trabajo de *Excel*:

1. La primera hoja, nombrada “MATRIZ PRINCIPAL”, se utilizó para registrar la información principal del modelo de simulación, para ello, se realizaron los siguientes pasos:

A. Se registró, en las columnas de *Excel* (Figura A4.1), la siguiente información, tomando como base el formato realizado para registrar las estimaciones de los tiempos del Anexo 2:

- En la columna A, el número de identificación (ID).
- En la columna B y renglón 5 el nombre del proyecto (Reducción de las actividades de mantenimiento del tándem de molinos).

ID	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5	Nivel 6	Precesora	Óptimo	Medio	Pésimo	Estándar	
1	REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE LAS ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO DEL TÁNDEM DE MOLINOS											
2	Planeación											
3	Diagnóstico y análisis											
4	Actividades de diagnóstico y análisis del Molino 1											
5	Ultrasonido y líquidos penetrantes						48,61,68	0.188	0.375	0.563	0.375	
6	Nivelación y alineación						74	1.250	1.500	2.000	1.542	
7	Actividades de diagnóstico y análisis del Molino 2											
8	Ultrasonido y líquidos penetrantes						148,161,168	0.188	0.375	0.563	0.375	
9	Nivelación y alineación						174	1.250	1.500	2.000	1.542	
10	Actividades de diagnóstico y análisis del Molino 3											
11	Ultrasonido y líquidos penetrantes						250,263,270	0.188	0.375	0.563	0.375	
12	Nivelación y alineación						276	1.250	1.500	2.000	1.542	
13	Actividades de diagnóstico y análisis del Molino 4											
14	Ultrasonido y líquidos penetrantes						365,352,372	0.188	0.375	0.563	0.375	
15	Nivelación y alineación						378	1.250	1.500	2.000	1.542	
16	Actividades de diagnóstico y análisis del Molino 5											
17	Ultrasonido y líquidos penetrantes						453,466,473	0.188	0.375	0.563	0.375	
18	Nivelación y alineación						479	1.250	1.500	2.000	1.542	
19	Actividades de diagnóstico y análisis del Molino 6											
20	Ultrasonido y líquidos penetrantes						551,564,571	0.188	0.375	0.563	0.375	
21	Nivelación y alineación						577	1.250	1.500	2.000	1.542	

Figura A4. 1 Información principal del modelo de simulación en la hoja “MATRIZ PRINCIPAL” (Elaboración propia).

- En el renglón 4 y las columnas B, C, D, E, F y G los nombres de los niveles: 1 2, 3, 4, 5 y 6, respectivamente.
- Debajo de cada nivel, las actividades y paquetes de actividades
- En la columna H las precedencias de los paquetes de actividades.
- En las columnas I, J, K y L las estimaciones de los tiempos óptimos, medios, pésimos y estándar, respectivamente.

B. Se realizó una representación matricial de la red del proyecto y sus precedencias en *Excel*.

De acuerdo con Seal (2001) se puede obtener la ruta crítica de un proyecto representando la red de actividades y las relaciones de precedencias con una matriz, utilizando las hojas de cálculo de *Excel*. Tomando como base el procedimiento implementado por Seal (2001) se crearon cuatro macros en *Excel* ocupando el lenguaje *Visual Basic for Applications* (VBA) con el objetivo de:

- Automatizar la creación de las 543 columnas que conformaron la matriz, debido a que cada columna representa el número de identificación (ID) de los paquetes de actividades (543 paquetes). Para ello, se realizaron los siguientes pasos:
 - Se dio clic a la pestaña *Programador* (Figura A4.2).
 - Se seleccionó el comando *Visual Basic* (Figura A4.2) para entrar al Editor de *Visual Basic* (Figura A4.3).
 - Se escribió la macro “Sub Crear_Columnas ()” en el área de trabajo (Figura A4.3). La Figura A4.4 muestra parte de la macro escrita.

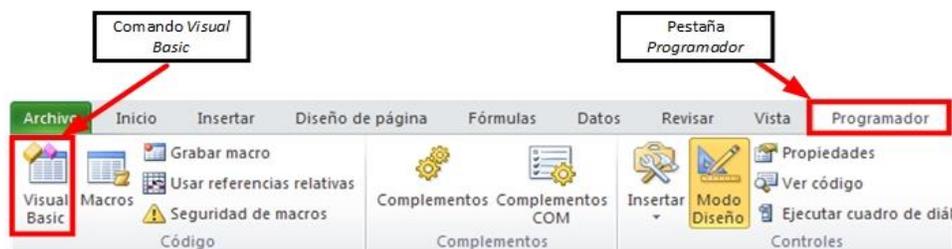


Figura A4. 2 Pestaña *Programador* y comando *Visual Basic* (Elaboración propia).

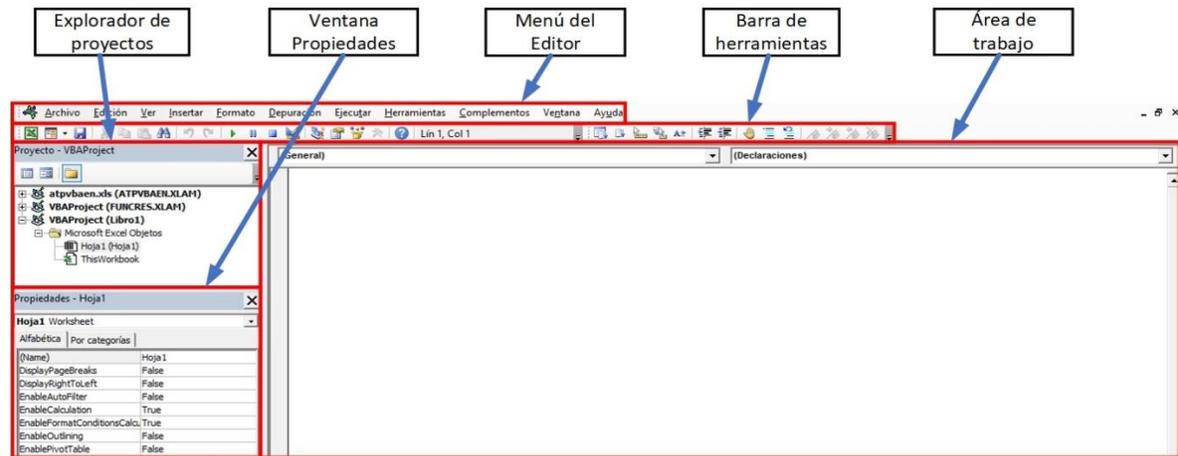


Figura A4. 3 Interfaz del Editor de *Visual Basic* (Elaboración propia).

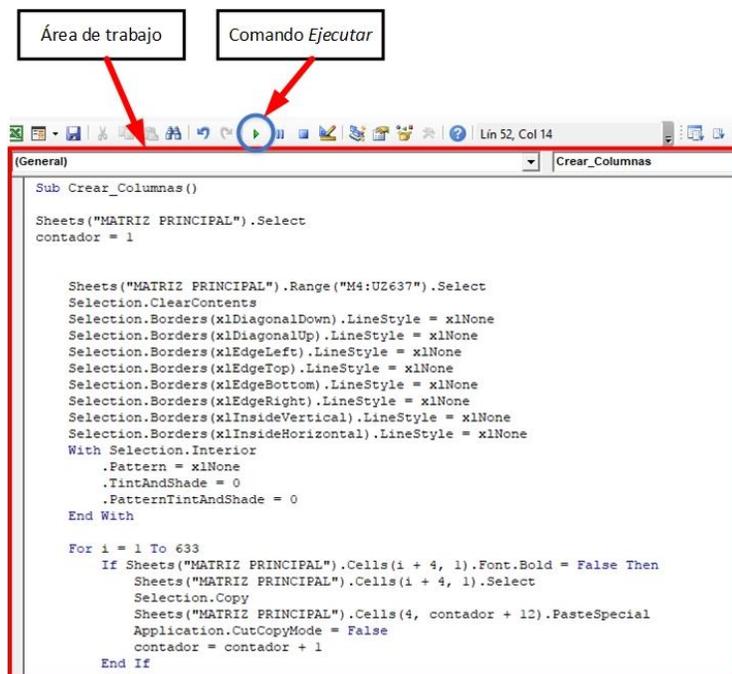


Figura A4. 4 Parte de la macro escrita para automatizar la creación de las 543 columnas de la matriz, destacando el comando *Ejecutar* (Elaboración propia).

- iv. Se hizo clic el comando *Ejecutar* (Figura A4.4) para iniciar la macro creada. El resultado se muestra en la Figura A4.5. La macro se realizó con el fin de dar formato a la matriz, agregando bordes y, para ubicar el número de identificación de los paquetes de actividades en las columnas de la matriz. Cada fila y columna representa un nodo de la red.

Actividades y Paquetes de actividades						Matriz de la red del proyecto y de precedencias de los p										
ID	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5	Nivel 6	Predecesora	5	6	8	9	11	12	14	15	
1	REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE LAS ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO															
2	Planeación															
3	Diagnóstico y análisis															
4	Actividades de diagnóstico y análisis del Molino 1															
5							Ultrasonido y líquidos penetrantes	48,81,68								
6							Nivelación y alineación	74								
7	Actividades de diagnóstico y análisis del Molino 2															
8							Ultrasonido y líquidos penetrantes	148,161,168								
9							Nivelación y alineación	174								
10	Actividades de diagnóstico y análisis del Molino 3															
11							Ultrasonido y líquidos penetrantes	250,263,270								
12							Nivelación y alineación	276								
13	Actividades de diagnóstico y análisis del Molino 4															
14							Ultrasonido y líquidos penetrantes	365,352,372								
15							Nivelación y alineación	378								

Figura A4. 5 Matriz de la red del proyecto y de precedencias (Elaboración propia).

- b. Automatizar la introducción de un “1” en las celdas de la matriz, representando las precedencias de los paquetes de actividades. Para ello, se realizaron los siguientes pasos:
 - i. Se repitieron los pasos i, y ii descritos en el paso a.
 - ii. Se escribió la macro “Sub Precedencias ()” (Figura A4.6) en el área de trabajo.
 - iii. Se hizo clic al comando *Ejecutar* (Figura A4.6) para iniciar la macro creada. El resultado se muestra en la Figura A4.7.
- c. Automatizar el cálculo de los tiempos óptimos, medios, pésimos y estándar en días. Para ello, se realizaron los siguientes pasos:
 - i. Se insertó un botón de opción (*OptionButton1*) nombrado “Días” (Figura A4.8), junto al título “Tiempos”.
 - ii. Se dio doble clic sobre el botón de opción (*OptionButton1*) para entrar al Editor de *Visual Basic*, creando automáticamente el procedimiento “Private Sub *OptionButton1* Click()” (Figura A4.9).
 - iii. Se mandó a llamar la macro “Calculo_Dias²⁴” (Figura A4.9). La macro programada se muestra en la Figura A4.10.

²⁴ La macro no acepta acentos.

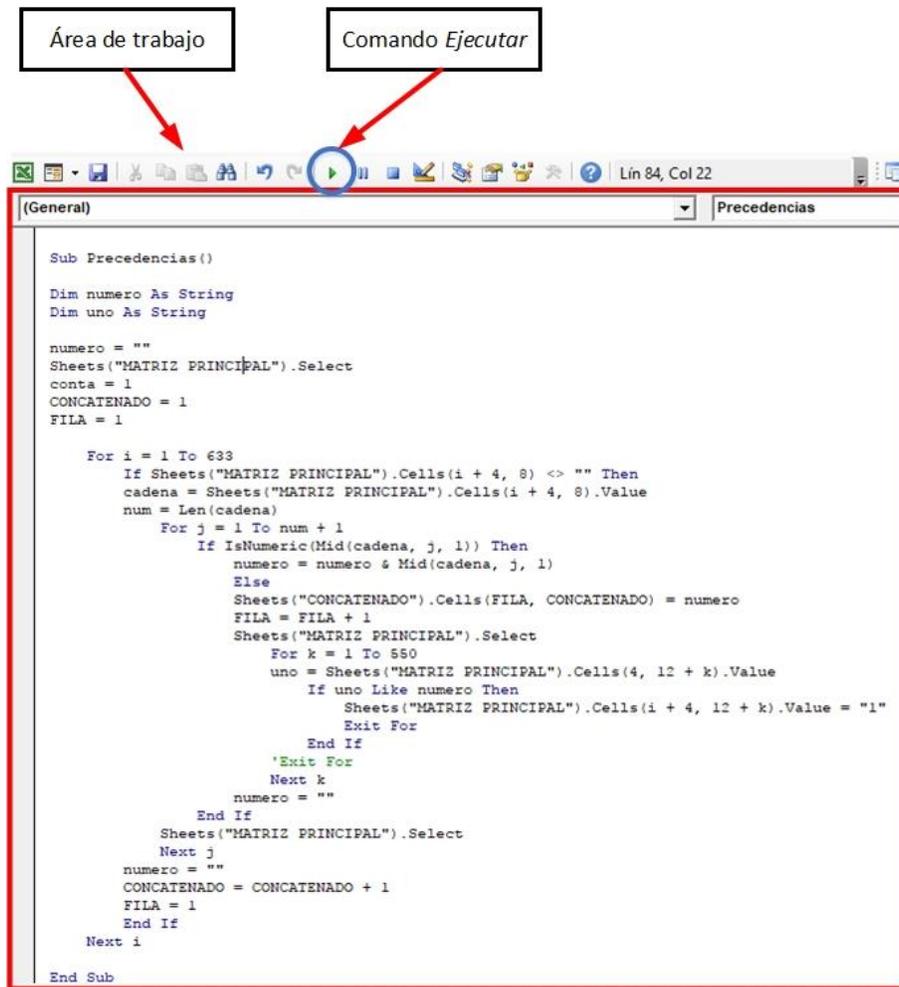


Figura A4. 6 Macro escrita para automatizar la introducción de un “1” en las celdas de la matriz (Elaboración propia).

Nivel 6	Predecesora	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58
Desmontaje de corona p/mov de 4ta. Maza	49		1									
Desmontaje de bridas	48	1										
Desmontaje de chumaceras de reposo	48	1										
Desmontaje de 4ta. maza	44											
Desmontaje de corona de 4ta. Maza	50			1								
Desmontaje de chumaceras de 4ta. Maza	53						1					
Desmontaje de botas	53,48	1					1					
Desmontaje de tornillos de bisagras cañeras	56								1			
Desmontaje de sellos de jugo cañeros	57										1	
Desmontaje de maza cañera	58											1
Desmontaje de corona transmisión cañera	54							1				
Desmontaje de silletas cañeras	62											

Figura A4. 7 Matriz con números 1 los cuales representan las precedencias de los paquetes de actividades (Elaboración propia).

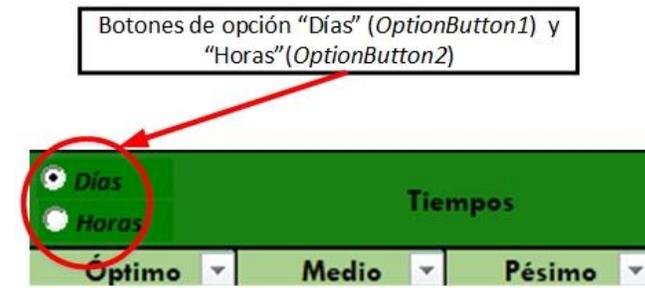


Figura A4. 8 Botones de opción "Días" y "Horas" (Elaboración propia).

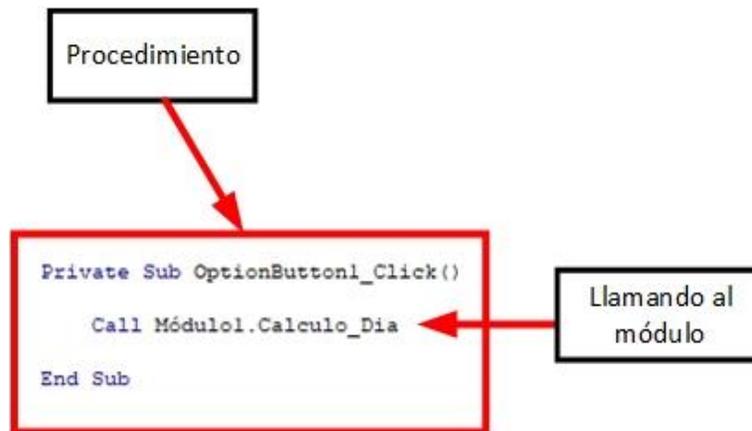


Figura A4. 9 Procedimiento "Private Sub OptionButton1_Click()", llamando al módulo "Calculo_Dia (Elaboración propia)".

```
Sub Calculo_Dia()
    For j = 1 To 3
        For i = 1 To 634
            If Sheets("MATRIZ PRINCIPAL").Cells(i + 4, 1).Font.Bold = False Then
                numerador = Sheets("MATRIZ PRINCIPAL").Cells(i + 4, 8 + j).Value

                resultado = numerador / 16
                Sheets("MATRIZ PRINCIPAL").Cells(i + 4, 8 + j).Value = resultado
            Else
                numerador = ""
            End If
        Next i
    Next j
End Sub
```

Área de trabajo

Figura A4. 10 Macro escrita para automatizar el cálculo de los tiempos óptimos, medios, pésimos y estándar en días (Elaboración propia).

- d. Automatizar el cálculo de los tiempos óptimos, medios, pésimos y estándar en días. Para ello, se realizaron los siguientes pasos:
- iv. Se insertó un botón de opción (*OptionButton2*) nombrado “Horas” (Figura A4.8), junto al título “Tiempos”.
 - v. Se dio doble clic sobre el botón de opción (*OptionButton2*) para entrar al Editor de *Visual Basic*, creando automáticamente el procedimiento “Private Sub *OptionButton2_Click()*” (Figura A4.11).
 - vi. Se mandó a llamar la macro “*Calculo_Horas*” (Figura A4.11). La macro programada se muestra en la Figura A4.12.

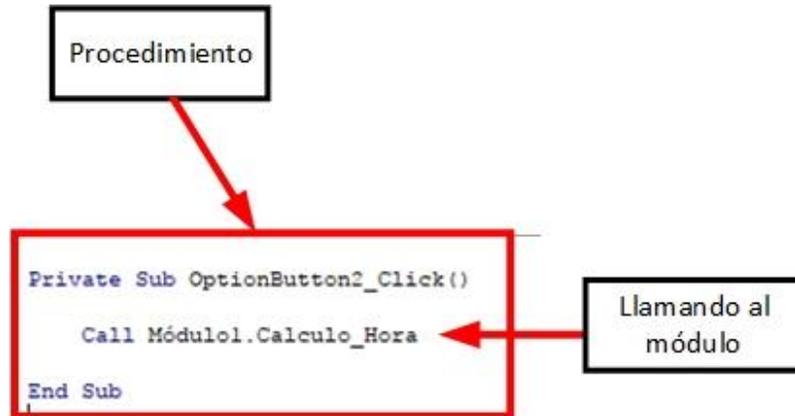


Figura A4. 11 Procedimiento “Private Sub *OptionButton1Click()*”, llamando al módulo “*Calculo_Dia* (Elaboración propia”.

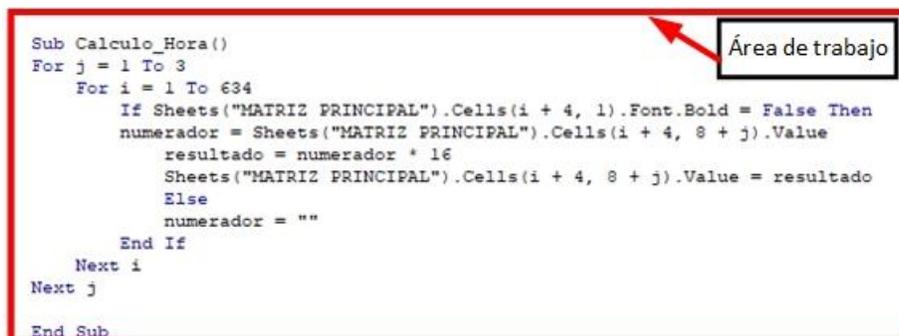


Figura A4. 12 Macro escrita para automatizar el cálculo de los tiempos óptimos, medios, pésimos y estándar en horas (Elaboración propia).

2. Las hojas 2 a 5 nombradas “EST-EFT OPT”, “EST-EFT MED”, “EST-EFT PES” y “EST-EFT ESTAND”, respectivamente, se utilizaron para calcular los tiempos de terminación y de inicio más próximos de cada paquete de actividad en la red, para encontrar la ruta crítica. Para ello, se realizaron los siguientes pasos:
 - A. Se copió de la columna A hasta la columna G, de la hoja “MATRIZ PRINCIPAL”.
 - B. En las columnas H e I se colocaron los tiempos *EST* y *EFT*, respectivamente.
 - C. Se copió el formato de la matriz creada en la hoja “MATRIZ PRINCIPAL”.
 - D. En todas las celdas que forman la matriz se utilizó la formula “=SI('MATRIZ PRINCIPAL'!M5=1,BUSCARV(J\$3,TablaESTEFT,9,FALSO),0)”.
 - E. En la columna H, se copió en todas las filas que contienen los paquetes de actividades la fórmula “=MAX(J8:UJ8)” para calcular el tiempo *EST* de los paquetes de actividades.
 - F. En la columna I, se copió en todas las filas que contienen los paquetes de actividades la fórmula “=H8+BUSCARV(A8,Entrada,9,FALSO)” para calcular el tiempo *EFT* de los paquetes de actividades.
3. Las hojas 6 a 9 nombradas “LST-LFT OPT”, “LST-LFT MED”, “LST-LFT PES” y “LST-LFT ESTAND”, respectivamente, se utilizaron para calcular los tiempos de terminación y de inicio más lejanos de cada paquete de actividad en la red, para encontrar la ruta crítica. Para ello, se realizaron los siguientes pasos:
 - A. Se copió de la columna A hasta la columna G, de la hoja “MATRIZ PRINCIPAL”.
 - B. En la fila 2 se colocaron los números de identificación de los paquetes de actividades.
 - C. En las filas 3 y 4 se colocaron los tiempos *LST* y *LFT*, respectivamente.
 - D. Se copió el formato de la matriz creada en la hoja “MATRIZ PRINCIPAL”.
 - E. En todas las celdas que forman la matriz se utilizó la formula “=SI('MATRIZ PRINCIPAL'!M5=1,BUSCARH(\$A6,TablaLSTLFT,2,FALSO),TmaxOPT)”.
 - F. En la fila 3, se copió en todas las columnas que tienen los números de identificación de los paquetes de actividades la fórmula “=I4-

BUSCARV(I2,Entrada,9,FALSO)” para calcular el tiempo *LST* de los paquetes de actividades.

- G. En la fila 3, se copió en todas las columnas que tienen los números de identificación de los paquetes de actividades la fórmula “=MIN(I6:I638)” para calcular el tiempo *LFT* de los paquetes de actividades.
4. La hoja 10 nombrada “TABLA CPM-PERT”, se utilizó para mostrar la ruta crítica, así como para calcular el tiempo de terminación de los tiempos óptimos, medios, pésimos y estándar de los paquetes de actividades. Además, en esta hoja se calcula la varianza de los paquetes de actividades que pertenecen a la ruta crítica del proyecto.
 5. La hoja 11 nombrada “TABLA RESULTADOS” se utilizó para mostrar los resultados principales que se obtuvieron en las hojas de cálculo de Excel:
 - A. Tiempo de terminación total.
 - B. Cantidad de paquetes de actividades en la ruta crítica.
 - C. Varianza total.
 - D. Desviación estándar total.

Anexo 5

Descripciones de archivos

El Anexo 5 muestra la descripción de los archivos que se realizaron en el presente trabajo. Los archivos que se realizaron fueron los siguientes:

- El Archivo A5.1, que tiene una lista con las 1,023 actividades de mantenimiento registradas de las pláticas que se tuvieron con los expertos (Sección 3.6.2).
- El Archivo A5.2, que tiene las agrupaciones de las actividades en paquetes, las cuales se optó por agruparlas en “*paquetes*” para reducir la cantidad de actividades de mantenimiento a utilizar en la planificación del proyecto (Sección 3.6.2).
- El Archivo A5.3, que tiene la lista con los 543 paquetes de actividades conjuntados de la agrupación de las actividades en paquetes, que se realizó en el Archivo A5.2 (Sección 3.6.2).
- El Archivo A5.4, que se realizó en *Project*. Las acciones que se realizaron en este archivo fueron las siguientes:
 - Introducir las actividades de mantenimiento de los niveles 1 a 5 en la estructura del proyecto (Sección 3.6.3.2).
 - Introducir los paquetes de actividades de mantenimiento del nivel 6 en la estructura del proyecto (Sección 3.6.3.2).
 - Introducir las columnas “Predecesoras” y “Sucesoras” en la hoja de *Project* (Sección 3.6.3.3)
 - Establecer las precedencias y secuencias de los paquetes de actividades (Sección 3.6.3).
 - Utilizar las vistas “Diagrama de Gantt” y “Diagrama de relaciones” para facilitar el establecimiento de las precedencias y secuencias de los paquetes de actividades (Sección 3.6.3.3).
 - Crear la red de los paquetes de actividades (Sección 3.6.4).
 - Introducir los tiempos óptimos, medios y pésimos a las hojas de entradas *PERT* (Sección 3.6.6).

- Calcular los tiempos de terminación óptimos, medios, pésimos y estándar (Sección 3.6.6).
- Mostrar la ruta crítica del proyecto (Sección 3.6.6).
- El Archivo A5.5, que tiene el formato para registrar los tiempos óptimos, medios y pésimos, obtenidos de una investigación con los expertos en el mantenimiento del tándem de molinos (Sección 3.6.5).
- El Archivo A5.6, que tiene el formato en *Excel* que ayudó a calcular el promedio de los tiempos óptimos, medios y pésimos de las actividades “Fabricación interna y/o externa” y “Mantenimiento”, haciendo uso de la estadística juntamente con la experiencia de los expertos en el mantenimiento (Sección 3.6.5).
- El Archivo A5.7, que tiene el modelo de simulación que calcula los tiempos de terminación totales óptimos, medios y pésimos, que identifica los paquetes de actividades que están en la ruta crítica, que calcula la varianza total y que calcula la desviación estándar total de cada tiempo. Además, este modelo se utilizó como modelo para desarrollar la simulación de Monte Carlo (Sección 3.6.7.1).
- El Archivo A5.8, que se realizó en *Project* contiene las siguientes acciones:
 - Establecer las nuevas precedencias y nuevas secuencias de los paquetes de actividades (Sección 3.7.2).
 - Utilizar las vistas “Diagrama de Gantt” y “Diagrama de relaciones” para facilitar el establecimiento de las nuevas precedencias y nuevas secuencias de los paquetes de actividades (Sección 3.7.2).
 - Crear la red de los paquetes de actividades, de la mejora (Sección 3.7.2).
 - Calcular los tiempos de terminación óptimos, medios, pésimos y estándar, de la mejora (Sección 3.7.3).
 - Mostrar la ruta crítica del proyecto, de la mejora (Sección 3.7.3).
- El Archivo A5.9, que tiene el modelo de simulación de la mejora basado en el modelo de simulación que se creó en la Sección 3.6.7.1 (Archivo A5.7).

Los nueve archivos que se describieron en los puntos anteriores se encuentran en el CD adjunto al presente trabajo.