

**CÁLCULO DE COSTOS OCULTOS POR OBSOLESCENCIA DE
MAQUINARIA EN UN SISTEMA DE MANUFACTURA**

**DIANA XIMENA ARENAS BECERRA
LAURA VIVIANA SÁNCHEZ VARÓN**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
GUADALAJARA DE BUGA
2018**

**CÁLCULO DE COSTOS OCULTOS POR OBSOLESCENCIA DE
MAQUINARIA EN UN SISTEMA DE MANUFACTURA**

**DIANA XIMENA ARENAS BECERRA
LAURA VIVIANA SÁNCHEZ VARÓN**

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Industrial

**Director:
JUAN JOSÉ BRAVO BASTIDAS
PhD Ingeniería Industrial**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
GUADALAJARA DE BUGA
2018**

Nota de aceptación:

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Guadalajara de Buga, fecha (03.11.2018)

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo agradecemos a Dios y nuestros padres por el apoyo incondicional y brindarnos la oportunidad de desarrollarnos como profesionales, a nuestro director el profesor Juan José Bravo Bastidas, por guiarnos en este proceso y contribuir en la realización exitosa de este proyecto.

Igualmente, agradecemos a todos los profesores y compañeros que nos acompañaron en este camino, por su colaboración y por ser partícipes de nuestra formación profesional integral.

CONTENIDO

1. RESUMEN	10
2. INTRODUCCIÓN	11
DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	13
3. OBJETIVOS	15
4. MARCO TEÓRICO	16
4.1. Procesos de manufactura y sus costos	16
4.2. Maquinaria y equipos en un proceso de manufactura	16
4.2.1. Obsolescencia de la maquinaria o equipos	17
4.2.2. Costos de Obsolescencia	18
4.2.3. Costos Ocultos asociados a la obsolescencia	18
4.3. Simulación de procesos	19
4.4. Revisión de la Literatura	20
5. INDUCTORES DE COSTOS OCULTOS	27
6. HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN	33
7. CASO DE ESTUDIO: SISTEMA DE MANUFACTURA CON OBSOLESCENCIA DE MAQUINARÍA	37
7.1. Descripción modelo Caso de estudio	37
7.2. Red de Petri: Caso de estudio.	46
8. SIMULACIÓN Y RESULTADOS	54
8.1. Inicialización de variables y parámetros	54
8.2. Desarrollo y resultados	56
CONCLUSIONES	68
BIBLIOGRAFÍA	70
ANEXOS	75

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Inductores de costos pertinentes al caso de estudio.....	28
Tabla 2 Símbolos de la Red de Petri	36
Tabla 3 Suposiciones de Modelo Caso de Estudio.....	43
Tabla 4 Variables Principales del Modelo	44
Tabla 5 Variables auxiliares y parámetros.	44
Tabla 6 Descripción de las variables de los Costos.....	45
Tabla 7 Ecuaciones asociadas a los costos	45
Tabla 8 Símbolos Red de Petri: Sistema básico	46
Tabla 9 Símbolos Red de Petri: Desgaste máquina 1.	49
Tabla 10 Símbolos Red de Petri: Desgaste máquina 2.	51
Tabla 11 Valores de iniciales del modelo.....	54
Tabla 12 Costos unitarios del caso de estudio.....	55
Tabla 13 Edad de las máquinas en las corridas de muestra inicial.....	57
Tabla 14 Determinación de n para la simulación	57
Tabla 15 Tasa de desgaste en los escenarios planteados.	58
Tabla 16 Costos, venta y utilidad en cada escenario.....	59
Tabla 17 Distribuciones de probabilidad en VBA.....	82
Tabla 18 Datos sobre las piezas procesadas en cada escenario	83
Tabla 19 Desgaste y Edad final de las máquinas en cada escenario	83
Tabla 20 Tiempo y cantidad de mantenimientos en cada escenario.	84

LISTADO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1	Componentes del sistema del caso de estudio	37
Ilustración 2	Diagrama de Flujo sistema de manufactura.....	39
Ilustración 4	Red de Petri Sistema básico.	47
Ilustración 5	Red básica: Ejemplo proceso producción.	48
Ilustración 6	Red básica: Ejemplo proceso de inspección.....	49
Ilustración 7	Red de Petri: Desgaste en Máquina 1.....	51
Ilustración 8	Red de Petri: Desgaste en Máquina 2.....	52
Ilustración 9	Red de Petri: Caso de estudio.....	53
Ilustración 10	Condiciones de llegada de materia prima	75
Ilustración 11	Calculo de probabilidad de fallas.....	75
Ilustración 12	Evaluación de Falla tipo II en M1	76
Ilustración 13	Evaluación de falla tipo I en M1.....	77
Ilustración 14	Proceso de producción de M1.....	78
Ilustración 15	Evaluación de falla tipo II en M2.....	79
Ilustración 16	Evaluación de falla tipo I en M2.....	80
Ilustración 17	Proceso de producción en M2.....	81
Ilustración 18	Inspección y clasificación de piezas.....	82

LISTADO DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Costos vs desgaste del sistema	58
Gráfico 2 Costos vs Venta.....	59
Gráfico 3 Probabilidad de falla de la máquina 1 de acuerdo a su edad (con tasa de desgaste igual a 0,4)	60
Gráfico 4 Probabilidad de falla de la máquina 2 de acuerdo a su edad (con tasa de desgaste igual a 0,4)	60
Gráfico 5 Probabilidad de falla de la máquina 1 de acuerdo a su edad (con tasa de desgaste igual a 0,8)	61
Gráfico 6 Probabilidad de falla de la máquina 2 de acuerdo a su edad (con tasa de desgaste igual a 0,8)	61
Gráfico 7 Costos ocultos y visibles relacionados con la cantidad de mantenimientos	62
Gráfico 8 Desgaste vs falla tipo 1 de la máquina 1	62
Gráfico 9 Relación entre el mantenimiento de la máquina 2 y la producción de la máquina 1 con una tasa de desgaste de 0,4	63
Gráfico 10 Relación entre el mantenimiento de la máquina 2 y la producción de la máquina 1 con una tasa de desgaste de 0,8	64
Gráfico 11 Producción vs ventas (en unidades)	65
Gráfico 12 Producción vs ventas (en valores monetarios)	65
Gráfico 13 Costo oculto asociado a los reprocesos de piezas	66
Gráfico 14 Costo oculto asociado a la cantidad de piezas rechazadas por calidad no adecuada	67
Gráfico 15 Costo oculto asociado a la clasificación de piezas por falla tipo 1	67

LISTADO DE ANEXOS

Anexo A Formulación del modelo de simulación en Visual Basic	75
Anexo B Datos obtenidos de la simulación	82

1. RESUMEN

Dentro de los procesos de un sistema de manufactura, la maquinaria es una parte importante para convertir la materia prima en producto terminado, sin embargo, el uso constante de estos equipos puede con llevar a un envejecimiento, lo cual genera que la maquinarias fallen por diversas causas y generan paros de tal forma que deben ser sometidas a ciertas actividades de mantenimiento, incrementándose los costos usuales de operación, los costos de mantenimiento y reparación. Adicionalmente, junto con estos costos surgen los costos ocultos, relacionados con la calidad del producto terminado y la productividad de la máquina como consecuencia de las fallas y los paros constantes. No obstante estos costos ocultos no se evidencian claramente en los estados financieros de una empresa, lo cual impide la toma de decisiones sobre reemplazos e inversiones futuras en maquinaria y equipos del sistema de manufactura.

Este trabajo pretende mostrarle al lector un método para calcular los costos ocultos, utilizando la herramienta de simulación de redes de Petri, que se generan como consecuencia de mantener en funcionamiento una maquina obsoleta dentro de un sistema de manufactura considerando la no calidad y la no productividad del sistema.

Palabras claves: *Costos ocultos, obsolescencia, sistema de manufactura, mantenimientos, fallas, No calidad e improductividad, Redes de Petri.*

2. INTRODUCCIÓN

Los procesos industriales son un grupo de operaciones productivas dedicadas a la transformación de materias primas en productos para el consumo final o intermedio (Rebolledo Noriega, Duque Gallego, Velasco , & Ángel López, 2013). En la mayoría de estos procesos es necesaria la utilización de máquinas que permitan llevar a cabo la transformación de la materia prima en un producto terminado. Sin embargo, con el correr de los años y con los niveles cambiantes de producción estos equipos van perdiendo su vida útil, manifestada en la capacidad de producción tanto en cantidad como en calidad y generando costos adicionales. Esto es debido a que en la medida en que los equipos son operados estos envejecen, fallan por diversas causas y generan paros de tal forma que deben ser sometidos a ciertas actividades de mantenimiento, incrementándose a los costos usuales de operación los costos de mantenimiento y reparación, disminuyendo los beneficios (Viveros Folleco, González, & Rodríguez, 2004). Adicionalmente, junto con estos costos surgen los costos ocultos, relacionados con la calidad del producto terminado y la productividad de la máquina, que pueden generar para las empresas problemáticas en rentabilidad financiera y competitividad, puesto que no se encuentran debidamente identificados ni registrados, obstaculizando la visión clara y completa de las posibles pérdidas generadas como consecuencia de contar con un equipo obsoleto dentro del proceso de manufactura.

Como ya se mencionó, dentro de los costos que se pueden generar por la obsolescencia de maquinaria, se encuentran los llamados costos ocultos, que son la consecuencia económica de los disfuncionamientos que no se encuentran evidenciados en los estados de situación financiera, flujo de efectivo, variación patrimonial y estados de resultados de las empresas, por mencionar algunos; aunque pueden aparecer en las notas de dichos estados. Además, es importante tener en cuenta que los costos ocultos no sólo son pérdidas o déficits, estos representan una fuente de recursos mal utilizados o potenciales, que pueden mejorar el desempeño global sostenible y que pueden representar el 50% de sobregastos y/o el 50% de no productos (Zardet & Krief, 2006), debido a que el monto de costos ocultos en una empresa proviene no solamente de la cantidad de los indicadores, sino también del valor de los recursos empleados para efectuar las regulaciones elegidas con el fin de reducir o eliminar los disfuncionamientos, bien sea de manera eventual o correctiva.

No obstante, algunas organizaciones no los incluyen dentro de sus análisis, ya que no ven la importancia que tiene el hecho de identificar y evidenciar los costos ocultos para el apoyo en la toma de decisiones, e ignoran el impacto que pueden generar, no solo en los costos de manufactura sino los costos totales de la empresa, lo que puede llegar a omitir información relevante en cuanto a valores monetarios e impedir el planteamiento de acciones de mejora en este aspecto.

En cuanto al cálculo de los costos ocultos, es el Instituto de Socioeconomía de Empresas y Organizaciones (ISEOR), quien desde 1975 ha dado un enfoque de búsqueda y estudio a estos costos, diseñando una metodología cualitativa que permite calcular estos costos basándose en la percepción de los trabajadores acerca de sus condiciones laborales, la comunicación en la empresa, la gestión del tiempo y la organización del trabajo, entre otros factores. Sin embargo, se considera que este método puede llegar a omitir información relevante en cuanto a valores monetarios debido a la presentación de sesgos y limitaciones en la recopilación de los datos necesarios para realizar dicho cálculo.

Teniendo en cuenta que la simulación es un método de representación que busca obtener la imitación de la operación de un proceso de la vida real o de un sistema a través del tiempo, permitiendo el análisis de las respuestas del sistema real ante las diferentes acciones o propuestas y evitando los inconvenientes económicos, de seguridad, de calidad o éticos que se pueden presentar al intentar realizar los cambios en el sistema real, (Tarifa, 2005) se propone la aplicación de un método simulación para obtener los costos ocultos generados por la obsolescencia de equipos de manera cuantitativa.

Este modelo permitirá tanto la evaluación del impacto de los cambios en los diversos inductores de costos ocultos, que pueden afectar la rentabilidad, la competitividad, la productividad y la calidad de los procesos de manufactura de una organización, como obtener información relevante para la toma de decisiones estratégicas en el área de manufactura, principalmente sobre los equipos obsoletos, mediante la evaluación de los resultados obtenidos, evitando los sesgos que se tienen con el método propuesto por ISEOR.

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Dentro de los sistemas de costeo de los procesos de manufactura se hace uso de tres componentes conocidos como los elementos del costo de producción: materias primas, mano de obra y costos indirectos de fabricación CIF, dentro de los cuales solo se consideran la depreciación y el mantenimiento como costos asociados a la maquinaria (Sinisterra Valencia, 2006). Aquí se deja de lado la obsolescencia de los equipos, factor muy relevante que puede generar costos de oportunidad significativos para la compañía, representados por la diferencia entre el funcionamiento actual de la maquinaria y el funcionamiento esperado o ideal de ésta.

Debido a que, en un sistema de manufactura, la maquinaria es una parte importante para convertir la materia prima en producto terminado, la renovación de los equipos utilizados conlleva a obtener procesos más eficaces, una mayor cantidad de bienes producidos, mejor calidad, continuidad en la entrega y seguridad en términos de programación de producción, entre otros. Además, la adquisición de nuevo equipamiento genera un ahorro de costos, ya que lo normal es que los equipos nuevos tengan menores costos de operación, mantenimiento y menores costos por falla del equipo. (Ministerio de Planificación de Chile, 2005)

No obstante, a pesar de las metodologías existentes para el reemplazo de equipos, algunas empresas deciden no realizar este proceso de manera adecuada. De acuerdo con Cantillo (1998) y Agudelo & Arias (2010) algunos factores que influyen para no realizar el reemplazo de equipos son el poco capital disponible, la falta de percepción del beneficio que se obtiene con la máquina o recurso físico nuevo o la espera de oportunidades en el mercado de equipos, lo que puede conllevar a pérdidas de liquidez o de competitividad, dependiendo de lo tarde o temprano que se tome esta decisión. Si una empresa no controla la decadencia de la capacidad productiva de sus equipos para determinar con oportunidad el fin de su servicio y su desplazamiento por otros, está recargando costos a su producción, los que se reflejarán en el costo final del producto y en la menor calidad de este (Berger Vidal , Olazo, & Oré Lujan, 2003)

Así mismo, algunas de las investigaciones sobre obsolescencia de equipos se limitan a la decisión de reemplazo en el tiempo óptimo basado en un análisis marginal de lo que sucedería con las cantidades producidas al no tomar la decisión en el tiempo adecuado, omitiendo los costos por problemas en el área de manufactura que puede ocasionar una maquina obsoleta, como son el incremento de los disfuncionamientos, y por ende, de las inversiones en las que se debe incurrir para solucionarlos. Otros estudios, por el contrario, exponen la necesidad de estrategias de mantenimiento que permitan a la compañía seguir utilizando un maquina obsoleta por más tiempo, mediante modelos que buscan disminuir los costos asociados a las fallas que se pueden presentar y las interrupciones ocasionadas por la realización de dichos mantenimientos.

Por otra parte, Henri Savall quien ha dirigido el ISEOR (grupo de estudios en Costos Ocultos creado por él en la Universidad de Lyon, Francia), menciona que todos los costos ocultos que se generan en una organización, se pueden agrupar en cinco indicadores, tres de ellos sociales: rotación del personal, ausentismos, accidentes de trabajo, y dos económicos: costos de no calidad y falta de productividad. Estos últimos se relacionan directamente con la producción y operación de la maquinaria, lo que conlleva a un vínculo directo de la obsolescencia con dichos costos.

El estudio de los costos ocultos en las organizaciones es realizado por medio de un análisis socio-económico, el cual se basa en gran medida en variables cualitativas asociadas a una cadena de disfuncionamientos existentes en una empresa como: las condiciones laborales, la comunicación, la gestión del tiempo, la capacitación adecuada y la organización del trabajo, además de los mecanismos que se ponen en práctica para detener estas perturbaciones, a los que posteriormente se les otorga un valor, interpretado como la consecuencia monetaria de los disfuncionamientos, partiendo de entrevistas a los empleados. Sin embargo, el análisis de estos costos ocultos permite obtener una información complementaria a la ofrecida por los estados financieros, que puede ser relevante en la toma de decisiones estratégicas de la empresa porque ofrecen un control, una medida, una interpretación de las situaciones y una sensibilidad económica. (Zardet & Krief, 2006). A pesar de esto, como ya se mencionó, el método socio- económico tiende a estar sesgado a la percepción que tienen los empleados sobre estos problemas, por lo que es clara la necesidad de disminuir dichos sesgos.

Adicionalmente, los costos ocultos han sido estudiados por diversos autores como Zardet, Savall, & Bonnet (2008), (Berrocal Huerta (2013), además de Peña González (2014); los cuales han mostrado que los costos ocultos son aquellos que no están identificados, ni cuantificados, ni controlados en los estados financieros tradicionales de la empresa. Por tal motivo, el no realizar un análisis de los costos ocultos generados por la obsolescencia de equipos en el área de manufactura mediante una herramienta que muestre las perturbaciones económicas partiendo de un análisis cuantitativo, puede ocasionar la omisión de información relevante que sirva de base para la elección adecuada de alternativas y la toma de medidas de control para las problemáticas generadas por la maquinaria obsoleta y los costos ocultos operativos, entendiéndose estos como la consecuencia monetaria directa de la operación de la máquina, asociadas a estas. Con base en lo anterior, surge la pregunta de investigación principal:

¿Cómo calcular los costos ocultos operativos por obsolescencia de equipos en un sistema de manufactura objeto de estudio, con apoyo de un método de simulación?

3. OBJETIVOS

Objetivo General

Calcular los costos ocultos operativos por obsolescencia de equipos en un sistema de manufactura, con apoyo de un método de simulación.

Objetivos Específicos

- a) Identificar los inductores de costos ocultos en manufactura a partir de la revisión bibliográfica, enfatizando en la problemática asociada a la obsolescencia de equipos.
- b) Determinar la herramienta de simulación apropiada para el cálculo cuantitativo de costos operativos ocultos.
- c) Diseñar el sistema de manufactura caso de estudio, viable de ser simulado, considerando los elementos relacionados con obsolescencia de equipos y posibilidades de reemplazo.
- d) Simular el sistema caso de estudio, identificando los costos operativos ocultos por medio de diferentes escenarios que permitan el análisis y comparación de resultados, sacando conclusiones de utilidad práctica.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. Procesos de manufactura y sus costos

Los procesos de manufactura son actividades y operaciones relacionadas, ordenadas y consecutivas, a través del uso de máquinas-herramientas o equipos, con el fin de transformar materiales para la obtención de un producto industrial (Eraso Guerrero, 2008). Requieren de tres componentes esenciales: materia prima, mano de obra y maquinaria o equipos. La materia prima hace referencia a los elementos que se transforman e incorporan en un producto terminado, es decir, todos los elementos materiales que intervienen en el proceso productivo de un producto determinado. La mano de obra es el personal necesario para la realización de las actividades y operaciones del proceso de manufactura. Estos componentes generan un costo para la compañía, específicamente, para el proceso de manufactura, donde se pueden identificar como costos directos o indirectos dependiendo la relación o contribución en la fabricación del producto (Jiménez Lemus, 2010).

En cuanto a la materia prima, los costos que se asocian a ella son el aprovisionamiento, es decir, el valor por el cual son comprados todos los materiales necesarios para la fabricación y los inventarios. Los costos de mano de obra se identifican como todos los salarios, prestaciones sociales, aportes parafiscales y demás conceptos laborales, que se pagan a las personas que participan de forma directa o indirecta en la producción del bien o la prestación del servicio (Jiménez Lemus, 2010).

Los costos indirectos de fabricación (CIF), agrupan aquellos recursos que son utilizados en la fabricación del bien o la prestación del servicio pero que no pueden clasificarse como material directo o como mano de obra directa, como la depreciación de la maquinaria y costo del mantenimiento de las mismas (Jiménez Lemus, 2010), siendo estos dos los únicos que se asocian a la maquinaria y equipo necesario para la fabricación de un producto determinado.

4.2. Maquinaria y equipos en un proceso de manufactura

Como ya se mencionó anteriormente, para llevar a cabo el proceso de manufactura se requiere de maquinaria- herramientas o equipo que ayuden a realizar las actividades u operaciones requeridas. No obstante, la maquinaria tiene una vida útil, es decir, un período durante el cual un determinado equipo presta el servicio para el cual fue diseñado, manteniendo su integridad estructural. Durante este tiempo la maquinaria va envejeciendo y perdiendo su valor inicial, es decir, se va depreciando (Viveros Folleco, González, &

Rodríguez, 2004), lo cual genera un costo por depreciación de maquinaria que se ve reflejado en el costo de producción.

El uso constante de las máquinas y la degradación de las misma genera fallas de diversas formas, que en algunas ocasiones puede ocasionar el paro de la producción, por lo cual es necesario que sean sometidas a actividades de mantenimiento, conllevando un costo adicional de fabricación del producto (Viveros Folleco, González, & Rodríguez, 2004). El mantenimiento de una maquina puede ser: preventivo, el cual se trata de un sistema de inspecciones periódicas programadas con el fin de detectar condiciones y estados inadecuados que pueden generar ocasionalmente paros en la producción o deterioros graves en las máquinas o correctivo, el cual se entiende como la reparación de las averías o fallas (cuando éstas se presentan). Es la habitual reparación tras una avería que obligó a detener la instalación o máquina afectada por el fallo (Gacía Garrido , 2010).

4.2.1. Obsolescencia de la maquinaria o equipos

Al hablar de la maquinaria, es necesario considerar la obsolescencia de la misma. Es decir, la disminución económica y productiva que se produce a lo largo del tiempo debido a los avances tecnológicos y al desgaste de las partes de la máquina (Bhurisith & Touran, 2002). En general, los equipos industriales durante los periodos de utilización, sufren desgaste en sus diversas partes y mecanismos, por lo cual es necesario repararlos o sustituirlos para que el equipo pueda seguir trabajando, esto principalmente porque los equipos con el tiempo se vuelven obsoletos, lo que genera averías más frecuentes y aumenta los tiempos improductivos, afectando la productividad de otros equipos y de la empresa y aumentando los costos, dejando al propietario en desventaja frente a otros competidores que poseen equipos más modernos y eficientes (Viveros Folleco, González, & Rodríguez, 2004).

Lo anterior conlleva a una necesidad de reemplazo de los equipos, que puede significar sustituirlo por otro igual, otro cuya tecnología es más moderna o por otro totalmente diferente al original (Berger Vidal , Olazo, & Oré Lujan, 2003). Por lo general, esta decisión de reemplazarlo se basa en la comparación del costo de mantener el equipo actual por un año más, en comparación con el costo anualizado de la maquinaria nueva. Este costo anualizado se estima de acuerdo con el costo anual equivalente según el ciclo de vida de la maquinaria y los costos del equipo obsoleto, e incluye el costo de mantenimiento, cualquier disminución en el valor de reventa y los costos asociados con la disminución del rendimiento en relación con un nuevo artículo (Hasting, 2015).

De acuerdo con lo anterior, el criterio para decidir el reemplazo de un equipo por otro nuevo estará dado al comparar el costo anual equivalente, CAE, del equipo nuevo con el costo marginal de seguir operando el equipo viejo por un período adicional. Se entiende aquí al costo anual equivalente como los costos anuales

de tener y mantener la maquinaria, y como costo marginal aquel costo relevante para continuar operando un equipo durante un lapso adicional de tiempo; es decir, el CAE asociado a mantener un año más la maquinaria obsoleta (Ministerio de Planificación y Cooperación, 2015). Cabe destacar también que algunas de las consecuencias de usar maquinaria obsoleta deberían tenerse en cuenta apropiadamente como costos en los análisis de reemplazo de equipos, ya que se convierten en costos ocultos dentro del proceso de planeación que son generalmente ignorados.

Durante el tiempo que el equipo decide mantenerse en la empresa estando obsoleto, se hace necesaria la implementación de un programa de mantenimiento que mitigue los problemas que pueden presentarse como: fallas frecuentes que disminuyan la productividad, rechazos de productos por no calidad o accidentes de trabajo por averías, los cuales son aspectos considerados al definir la criticidad del equipo. (Espinosa, Salinas, & Leiva, 2011), entendiendo la criticidad, de acuerdo con Aguilar Otero et. al (2010), como la frecuencia de ocurrencia de las fallas y las consecuencias que estas tienen sobre los procesos relacionados, es decir, que dentro de las empresas existen equipos que al detenerse o fallar tienen un impacto significativo en los resultados de la empresa, y estos equipos son conocidos como equipos críticos (Gacía Garrido , 2010).

4.2.2. Costos de Obsolescencia

La obsolescencia de los equipos del proceso de manufactura puede generar problemas, como los ya mencionados, que ocasionan costos adicionales a la empresa o que incrementan los costos de producción como son los costos de mantenimiento preventivo y correctivo, y los costos de inventario.

De acuerdo con el modelo económico expuesto por Al- Salamah (2018) el costo esperado en un proceso de manufactura propenso a fallas incluye un costo de inventario que se incrementa debido al almacenamiento de productos de calidad perfecta para suplir las necesidades de los clientes durante los tiempos de reparación y el mantenimiento en inventario de los ítems imperfectos que deben esperar para ser reprocesados.

Por otra parte, Fitouhi et. al (2017) mencionan que los costos y la duración del mantenimiento depende de la condición de la máquina al momento de iniciar este proceso, además exponen que estos costos también se ven afectados por la cantidad de reparaciones que se deban realizar durante el ciclo de producción, es decir, a mayor desgaste de las máquinas, mayor cantidad de reparaciones y mayor duración de las mismas.

4.2.3. Costos Ocultos asociados a la obsolescencia

La obsolescencia, como se ha mencionado líneas arriba, genera costos adicionales, dentro de los que se encuentran los costos ocultos, que son la

traducción monetaria de las medidas tomadas para solucionar las diferencias entre el funcionamiento esperado y el real. Adicionalmente, son aquellos elementos de los gastos y de los productos no evidenciados por el sistema de información contable de la empresa (presupuesto, contabilidad general, contabilidad analítica, balance y cuenta de resultado, sistema de indicadores financieros). Recordemos que estos costos ocultos se pueden agrupar en cinco indicadores: ausentismo, accidentes de trabajo, rotación del personal, falta de productividad y no calidad (Zardet & Krief, 2006).

Teniendo en cuenta lo anterior, se observa como los aspectos considerados en la criticidad del equipo, es decir las consecuencias que pueden generar los equipos obsoletos, se relacionan con los indicadores de costos ocultos de la siguiente manera:

- Las fallas frecuentes que pueden ocasionar tiempos improductivos, es decir, falta de productividad de los equipos lo que produce sobretiempos, haciendo que se requiera de horas extras para cumplir con los pedidos, generando costos asociadas a estas (Berrocal Huerta, 2013).
- El rechazo del producto por no calidad, que se asocia a los costos de no calidad que representan el “precio del incumplimiento” o costos de hacer las cosas mal, y son aquellas erogaciones producidas por ineficiencias o incumplimientos, las cuales son evitables, como, por ejemplo: reprocesos, desperdicios, devoluciones, reparaciones, reemplazos, gastos por atención a quejas y exigencias de cumplimiento de garantías, entre otras (Flores Preciado & Pérez Cruz, 2006)
- Los accidentes de trabajo generados por las averías de las máquinas, se relacionan con el indicador de accidentes laborales y ausentismo por incapacidad del trabajador. Para estos indicadores se debe evaluar el impacto en el desempeño de la empresa traduciendo las horas inactivas en dinero o producto no fabricado, lo que conllevaría unos costos para la compañía (Berrocal Huerta, 2013). Sin embargo, debido a que el enfoque de este trabajo son los costos operativos ocultos, estos no serán tenidos en cuenta durante el desarrollo.

4.3. Simulación de procesos

García & Azarang (1996) definen la simulación como el desarrollo de un modelo lógico-matemático de un sistema, que busca obtener la imitación de la operación de un proceso de la vida real o de un sistema a través del tiempo. Dentro de esta se consideran dos conceptos importantes como son los sistemas y los modelos.

Un modelo se entiende como la representación de los objetos del sistema y el reflejo de las actividades en las que se involucran (García & Azarang, 1996). Por su parte, un sistema se puede definir como un conjunto de elementos unidos por

relaciones de interacción o interdependencia y que en el ámbito de los sistemas productivos estos elementos normalmente tienen un objetivo común.

Estos sistemas se pueden dividir en tres tipos:

- **Sistemas estáticos y sistemas dinámicos:** Se dice que un sistema es estático cuando sus variables de estado, es decir una magnitud medible, no cambian a lo largo del tiempo. Por el contrario, en un sistema dinámico los valores de sus variables cambian a lo largo del tiempo.
- **Sistemas deterministas y sistemas estocásticos:** Si un sistema no tiene ningún componente con características probabilistas, es decir, aleatorias, se considera determinista y para este caso, el comportamiento se determina una vez se establezcan las condiciones iniciales y la relación de sus componentes. En cambio, un sistema estocástico tiene algún elemento con comportamiento aleatorio y se debe estudiar en términos probabilísticos.
- **Sistemas continuos y sistemas discretos.** En un sistema continuo las variables de estado cambian de forma continua a lo largo del tiempo, mientras que en uno discreto cambian instantáneamente de valor en ciertos instantes de tiempo.

También es importante tener en cuenta que los procesos o sistemas productivos varían con el tiempo y que la mayoría de estos tienen características de sistemas discretos, puesto que los cambios se producen en intervalos de tiempo determinados (García Sánchez & Ortega Mier, 2006). Todos estos conceptos mencionados anteriormente, se tendrán en cuenta durante el desarrollo del trabajo, debido a que permiten una mejor comprensión sobre las teorías tomadas en cuenta para llevar a cabo el proyecto de investigación.

4.4. Revisión de la Literatura

Tomando en cuenta lo mencionado hasta este momento, se observa que los costos ocultos no son un tema que se consideren ni en el sistema de costos de las empresas ni en el análisis de obsolescencia de equipos. Además, este último al ser un tema complejo son pocas las empresas que deciden realizar el estudio de reemplazo de equipos, y, por ende, no consideran dentro de sus costos aquellos que son generados por los equipos obsoletos y que pueden afectar a la organización.

No obstante, el estudio de estos dentro de las organizaciones puede ser de gran importancia, pues de acuerdo con Zardet & Krief (2006) los costos-desempeños ocultos son la consecuencia económica de un disfuncionamiento, es decir, la traducción monetaria de las perturbaciones que sufre la empresa y de los mecanismos organizacionales que se ponen en práctica para controlar los

efectos de estos disfuncionamientos. Además, estos autores exponen el método socio- económico para el análisis de los disfuncionamientos, debido a que todas las personas en una empresa son testigos de la ocurrencia de estos y pueden determinar la frecuencia con que ocurren para posteriormente, darles un valor monetario a los disfuncionamientos de acuerdo con la información obtenida.

Por su parte, Savall (2006) explica más a fondo la metodología propuesta por ISEOR, el modelo de gestión socio-económica, el cual se da por dos facetas: desempeños sociales y desempeños económicos, que están siempre estrechamente relacionados; por lo que el núcleo central del modelo es el concepto de calidad integral, que se desglosa en tres niveles: los productos, el funcionamiento de la organización y el management de las personas. Asimismo, el análisis y mejora el desempeño económico se realiza con cinco indicadores, tres sociales: ausentismo, accidentes de trabajo y rotación del personal; y dos económicos: calidad del producto y productividad directa. Finalmente, el método busca dinamizar al personal por medio de la metodología HORIVET, que conlleva una acción horizontal y otra vertical donde se integran todos los niveles y actividades de la organización.

En otro estudio realizado por Savall et. al (2008) se demostró que la gestión socioeconómica mejora los desempeños ocultos de las organizaciones, debido a que brinda una base para la toma de decisiones estratégicas que no solo mitiguen o controlen los disfuncionamientos, sino que también creen valor y potencial en las organizaciones. Para explicar esto de manera más clara, los autores proponen varios ejemplos de diferentes empresas de manufactura, donde se aplica la gestión socio-económica para obtener el valor de los costos ocultos y tomar decisiones con base en ellos.

Más tarde, N' Guess (2013) proponen el método SOF o GQFI, que es una técnica de evaluación de costos ocultos que consiste en descubrir el valor o destinación de los recursos financieros asignados a la regulación de los disfuncionamientos y de las anomalías, al igual que algunos valores que pueden ser movilizados para la creación de valor económico. Los autores también realizan el cálculo de los costos ocultos utilizando esta técnica para cada indicador propuesto por ISEOR.

Respecto a la aplicación del método socio- económico de ISEOR, Franco (2017) lo implementa en una Pyme de Aguascalientes, donde se comienza por un inventario de disfuncionamientos en la empresa, para observar directamente el proceso y llevar a cabo un análisis financiero de la empresa, y se relacionan los costos ocultos con la información obtenida en las entrevistas, el conteo de la frecuencia de las situaciones contadas por los empleados y el costo total relacionado. Finalmente, se concluye que el análisis de costos ocultos puede ser una fuente importante para la competitividad y disminución de costos con inversión para recuperación a corto plazo generando eficacia y productividad en la operación del negocio, haciendo más rentable y más competitiva a la Pyme al crear potencial.

Berrocal (2013) También utiliza esta metodología en una empresa de cerrajería identificando altos niveles de inventarios, falta de producto a los clientes, ausentismo, accidentes de trabajo, bajo índice de rotación de personal, no calidad de los productos por fuentes internas y por falta de habilidad del personal como algunos de los inductores de costos ocultos de la organización, con los cuales se realizó el análisis de los impactos en el área de manufactura de la empresa. Sin embargo, durante la investigación se determinó que querer analizar todos los desperdicios y su impacto en las áreas que se relacionan con ellos es una tarea muy ambiciosa por lo cual fue necesario limitarlo sólo a los profit centers de manufactura.

Igualmente, González et. al (2011) realizaron una investigación con el objetivo de identificar los disfuncionamientos de las Pymes, caso concreto, una pequeña empresa del sector metal mecánico establecida en la ciudad de Pachuca, Hidalgo, con el interés principal en la planeación, aplicando la metodología del modelo socio económico. En este estudio se obtuvo que la falta de una planeación formal sobre todo a lo que se refiere a formación integral y aplicación estratégica, llevaba a que la empresa se viera afectada en las áreas administrativas y operativas por los costos ocultos, especialmente por el ausentismo.

Peralta et. al (2011) también llevaron a cabo una investigación en una Pyme del sector metalmecánico, pero en este caso el objetivo era determinar los costos ocultos en la implementación de estrategias en la organización utilizando la intervención socio-económica, con lo que se logró identificar que la problemática principal proviene de las actividades de la organización del trabajo, por lo que se recomienda generar estrategias-proyectos que propicien mejorar los resultados de la empresa, a través de la implementación de una metodología clara y sobre todo la reflexión del personal, a través de la autoevaluación y por equipos de trabajo.

Como se puede observar, la metodología utilizada para el análisis de los costos ocultos en el método socio-económico de ISEOR, se basa en la percepción de los empleados en todos los niveles de la empresa, obteniendo la información por medio de entrevista, con la cual, posteriormente, se les otorga un valor a los costos ocultos. Estos estudios realizados por diversos autores sirven de base para entender la manera en que actualmente se realiza el cálculo y el análisis de estos costos en diversas empresas y su aplicación.

Ahora bien, en cuanto a la maquinaria obsoleta, Viveros et. al (2004) llevaron a cabo una revisión de la literatura sobre los métodos de reemplazo y adicionalmente, propusieron la investigación de operaciones como una herramienta óptima para realizar el análisis de reemplazo adecuado. Con este trabajo concluyen que los modelos antiguo- nuevo, modelo de optimización y el modelo de límite toman la decisión sobre una base netamente económica

producto de los costos de mantenimiento, incremento de productos defectuosos y gastos de energía adicionales, entre otros, olvidándose de otros factores técnicos o tecnológicos y que pueden ser considerados si se aplicaran técnicas como programación no lineal, el análisis de decisiones o técnicas multicriterio.

Por su parte, Tsai et. al (2017) proponen una política de reemplazo para un sistema con dos unidades basándose en la cantidad de fallas tipo I, es decir, fallas menores, la ocurrencia de la primera falla tipo II, entendiéndose esta, como una falla catastrófica que detiene el proceso productivo, y la cantidad de daños acumulativos que se generan en el sistema como consecuencia del deterioro. Teniendo en cuenta esto, los autores definen que el sistema se puede reemplazar de manera preventiva, de acuerdo con la cantidad de fallas tipo I, o de manera correctiva, al ocurrir una falla tipo II. Adicionalmente, para el desarrollo de este trabajo se tienen en cuenta algunos costos como son: costos de reparación, costos de reemplazo preventivo, de reemplazo correctivo, costos por cada inspección, el costo de penalización para el período de inactividad, y el costo esperado de operación.

Además de los métodos de reemplazo, algunos autores deciden definir políticas de mantenimiento para las máquinas considerando sistemas de producción imperfectos, con el fin de reducir los costos asociados y mejorar la calidad de los productos, tal es el caso de Gouiaa-Mtibaa et. al (2016), que desarrollan una política integrada de mantenimiento y calidad para un sistema de fabricación que falla aleatoriamente, con el objetivo de disminuir los productos no conformes y reducir la cantidad de fallas, considerando los costos de mantenimiento preventivo, correctivo, de reelaboración, costos de producción y costo de preparación, aportando finalmente una estrategia de mantenimiento preventivo basada en la cantidad de lotes de fabricados e integrando la actividad de reproceso para mejorar la calidad del producto.

Así mismo, Ahmadi & Fouladirad (2017) proponen un modelo para definir el tiempo óptimo de operación de un sistema sujeto a la degradación con tres estados de calidad, en el cual se disminuyen los ingresos generados por el sistema debido a la degradación del mismo. Para ello, suponen que a medida que la calidad disminuye, las inspecciones ocurren con mayor frecuencia, lo que implica un costo de reemplazo mayor, que en todos los estados de calidad se genera un ingreso, que es mayor a medida que la calidad incrementa y que los costos de inspección dependen del tiempo. Obteniendo finalmente una política de tiempos de producción que incluye inspecciones y que tiene como medida de optimización la ganancia neta generada por el sistema.

Igualmente, Dellagi et. al (2017) consideran un sistema compuesto por una máquina sujeta a degradación y fallas aleatorias que debe satisfacer con un stock determinado una demanda aleatoria. Sin embargo, la tasa de fallas aumenta con el tiempo y la tasa de producción, por lo que deben programarse acciones de mantenimiento preventivo que reduzcan la probabilidad de ocurrencia de dichas fallas y permita mantener un nivel de inventario adecuado.

Obteniendo como resultado un modelo matemático, que incluye un costo total esperado de mantenimiento de la producción que considera los costos de producción e inventario, los costos de mantenimiento y los costos de instalación, adicionalmente, el modelo toma en cuenta las limitaciones de capacidad, el nivel de servicio y el balance del inventario.

Kang & Subramaniam (2018) proponen un modelo integrado de control de producción y mantenimiento para un sistema de fabricación de una sola máquina en deterioro y con fallas aleatorias, con el objetivo de disminuir el costo total de producción por medio de una política que incluya la tasa de producción, los niveles de cobertura, tasa de mantenimiento y los niveles del mismo. Para lograr, desarrollar la política de control casi óptima, realizan análisis de sensibilidad donde se evidencia que dicha política se ve afectada por los costos de excedentes, retrasos, reparaciones y mantenimientos preventivos. Adicionalmente, los autores comparan el modelo con otros anteriores, para demostrar la mejora en el rendimiento económico generado por el modelo propuesto en este trabajo debido a las consideraciones que ya se mencionaron.

A su vez, Beheshti et. al (2018) Desarrollan un modelo de optimización que integra el mantenimiento, la calidad y la producción que toma en cuenta la posibilidad de deterioro del sistema y la existencia de artículos no conformes en los lotes de producción, con el objetivo de maximizar el beneficio esperado. Bajo las consideraciones de encontrar un punto de equilibrio donde el incremento en el nivel de mantenimiento reduzca los impactos relacionados con la calidad y sus costos no sean tan altos hasta el punto de no compensar la mejora de calidad. El modelo propuesto por estos autores se puede utilizar para determinar los valores óptimos del plan de producción, las ventas y los tiempos y niveles de mantenimiento preventivo, teniendo en cuenta la calidad de los artículos producidos por una máquina.

Así mismo, Ouaret et. al (2018) abordaron el tema de planificación de la producción de un sistema de manufactura sujeto al deterioro en la máquina, el cual tiene efectos sobre su disponibilidad y la calidad de las piezas producidas, además consideraron que las tasas de falla y defectos aumentan con la edad de la máquina. Dentro de este trabajo, también se toma en cuenta la opción de reemplazar la máquina para mitigar el efecto del deterioro a fin de garantizar la satisfacción de la demanda a largo plazo. Todo esto, con el fin de determinar la tasa de producción adecuada y una la política de reemplazo que minimice el costo total descontado, que incluye los costos de inventario, retraso, producción, reparación y reemplazo.

Al igual que los autores hasta aquí mencionados, algunos otros también han abordado en sus trabajos los temas de deterioro y obsolescencia de maquinaria obteniendo como resultados políticos y/o modelos que permitan encontrar estrategias de mantenimiento, inspección y producción que minimizan las fallas y reducen ciertos costos. Sin embargo, debido a que en este trabajo se busca proponer un cálculo de costos ocultos con ayuda de una herramienta de simulación como Montecarlo, simulación dinámica o simulación discreta, es

importante tener en cuenta algunos casos asociados a costos en los que se utilizan estas herramientas.

En cuanto a la simulación Montecarlo Azofeifa (2004) la utiliza para analizar el riesgo financiero de un proyecto, debido a que esta herramienta es básicamente un muestreo experimental cuyo propósito es estimar las distribuciones de las variables de salida que depende de variables probabilísticas de entrada. Para el caso puntual de este estudio se tienen en cuenta los costos de mano de obra, los costos de los componentes y la posible demanda del primer año, a los cuales se les asocia una función de probabilidad para poder desarrollar muchos escenarios de “qué pasaría si”, mediante valores aleatorios para dichas funciones. Con esta herramienta se realiza una estimación del rendimiento esperado, mediante la probabilidad de que ocurran los escenarios pesimistas y optimistas simulados.

Por otra parte, Mejía et. al (2016) aplicaron la metodología de Dinámica de Sistemas, para representar un sistema real de producción, y acorde a esto plantear diferentes escenarios de mejora, que permitan evaluar alternativas diferentes y su impacto en las variables críticas del proceso. Esta metodología permite tener una perspectiva holística de los elementos que componen un sistema y poder evaluar diferentes alternativas de decisión, teniendo como base el Pensamiento Sistémico. El estudio incluyó el análisis de variables como: tiempos de producción, materias primas necesarias, demanda, consumo de energía, la política de inventario, costos de producción, tiempo total de producción, entre otros. Adicionalmente, con la ayuda de simulación mediante el Diagrama Forrester se pudo analizar de forma precisa y profunda, el sistema actual de la microempresa, obteniendo resultados sobre las fallas y aspectos positivos con respecto al comportamiento actual, para luego realizar un análisis sobre la implementación de mejoras que eliminen estas fallas.

En contraste, Kendall et. al (1998) realizaron un análisis de costos para la optimización de fabricación mediante simulación discreta combinada con una técnica de modelado de costos técnicos (TCM), debido que la simulación de eventos discretos tiene una limitación en la información de costos que proporciona, pues no toma en cuenta los costos variables como mano de obra, materiales y costos operativos, que se pueden evaluar con la herramienta TCM, pues esta permite determinar el costos total de fabricación del producto de sistemas complejos. Con este estudio se logró demostrar que la simulación discreta es una herramienta útil para planificar y evaluar una serie de escenarios de fabricación, antes del comienzo de la producción, que al mezclarse con un modelo de costo técnico proporcionó predicciones detalladas del costo de los componentes que serían necesarias para ayudar a las decisiones de fabricación y que puede utilizarse para llevar a cabo estudios de sensibilidad para una imagen completa de las opciones de fabricación.

Posteriormente, Vargas & Giraldo (2014) propusieron un modelo de predicción de costos en los servicios de salud soportado en simulación discreta, donde se puede percibir nuevamente la limitación de esta herramienta en cuanto a los costos, debido a que el estudio presenta el cálculo de la cantidad de pacientes que llegarán a cada departamento de salud en cada escenario planteado, basados en una distribución de probabilidad. Una vez se obtuvo los datos de la cantidad de pacientes, se multiplicaron estos por los costos unitarios de los servicios de salud por áreas, y así poder obtener la predicción de los costos totales para los servicios de salud.

Estas investigaciones realizadas permiten evidenciar la aplicación de diferentes herramientas de simulación para el cálculo, predicción o análisis de los costos de manufactura, considerando los aportes y limitaciones de dichas herramientas, lo cual servirá de base para definir la técnica de simulación más adecuada para este proyecto. Adicionalmente, en este trabajo se presenta un modelo de simulación por redes de Petri que permite tener una visión más amplia de las consecuencias de la obsolescencia en un proceso de manufactura, lo que conlleva a los analistas de procesos y financieros puedan tomar acciones con base en los costos totales, principalmente, en los costos ocultos que son los que no se consideran en los estados y análisis financieros y de reemplazo de equipos.

5. INDUCTORES DE COSTOS OCULTOS

Los inductores de costos son conocidos generalmente como “Cost drivers” o generadores de costos. Hanse & Mowen (2007), definen los generadores como factores que ocasionan cambios en los recursos, en el consumo de actividades, en los costos y en los ingresos de una organización. Por su parte, Horngren et. al (2012) manifiestan que un generador de costos es una variable, como el nivel de actividad o volumen, que tiene una relación causa-efecto con los costos variables, por lo que un cambio en dicha variable conlleva una variación proporcional en los costos. Adicionalmente, Amorim-Melo et. al (2014) mencionan que los inductores de costos se pueden definir como cualquier actividad, indicador, producto o proceso que tienen un impacto directo en el costo del sistema analizado.

En cuanto a los costos ocultos, estos son el resultado de los disfuncionamientos y de las acciones que se deben poner en marcha para contrarrestar los efectos de estos, entendiendo un disfuncionamiento, como la diferencia entre cómo debería funcionar el sistema y cómo realmente está funcionando. Además, los costos ocultos, son aquellos elementos de los gastos que no se evidencian dentro del sistema contable de un empresa. (Zardet & Krief, 2006).

Con base en lo anterior, se puede concluir que los inductores de costos ocultos son tanto las actividades que ocasionan un disfuncionamiento en el sistema evaluado, como las realizadas para contrarrestar los malos funcionamientos, las cuales conllevan un consumo de recursos y tiempo que se puede traducir en un valor monetario, es decir, un costo que generalmente no se encuentra registrado en los sistemas financieros de la empresa de manera explícita.

Ahora bien, para identificar los inductores de un sistema de manufactura con un problema de obsolescencia de maquinaria es importante caracterizar los efectos del desgaste y envejecimiento de los equipos. Para esto, se tiene de base autores como Gouiaa-Mtibaa et. al (2016) y Pasandideh et. al (2015) los cuales consideraron en sus estudios sistemas de manufactura sujetos a la degradación de las máquinas y fallas aleatorias que causan un deterioro progresivo en la calidad de los productos, bajo el supuesto que un sistema defectuoso genera productos de calidad perfecta o imperfecta, y que estos últimos, pueden dividirse en productos aptos para reproceso o productos que deben desecharse.

Por otra parte, Bouslah et. al (2016) y Cheng et. al (2018) expusieron que una vez el sistema falla se realiza un mantenimiento correctivo inmediato, además de considerar una política mantenimiento preventivo con el fin de reducir las fallas en la máquina. Sin embargo, este último, está sujeto a un sistema de inspección que se realiza al finalizar el ciclo de producción. Para ambos autores, los productos no conformes hallados en el control de calidad son desechados, mientras que los conformes son almacenados para satisfacer la demanda durante el tiempo que la máquina estará detenida por el mantenimiento preventivo. Adicionalmente, Bouslah et. al (2016) consideró que sí el sistema

falla durante un ciclo de producción, este es detenido para realizar la reparación de la máquina y una evaluación al lote en proceso de producción para determinar la conformidad o no del mismo, pero, si la muestra se halla no conforme, se lleva a cabo una inspección al 100% de los productos para separar los conformes de los no conformes, enviar los primeros al almacén y desechar los segundos.

Por su parte, Fakher et. al (2018) fundamentó su estudio en dos tipos de fallas, I y II. La primera, es una falla que ocasiona que el sistema fabrique una proporción de productos no conformes y solo es detectada en la inspección realizada al final de la producción. La falla II es la que detiene el sistema y requiere de una reparación de la falla para que un ciclo de producción pueda empezar.

Teniendo en cuenta la problemática objeto de estudio, que es un sistema de producción con maquinaria obsoleta que genera costos ocultos tanto por falta de productividad (por tiempos improductivos debidos a paros en el sistema o fallas que reducen la tasa de producción de las máquinas) como costos ocultos por no calidad (por productos no conformes), se puede inferir que las fallas, resultado del desgaste y envejecimiento de la máquina, son el inductor principal de dichos costos, adicionalmente todas las medidas tomadas para reducir los impactos negativos de estas fallas y mitigarlas o eliminarlas también serán causantes de costos visibles u ocultos, debido a que requieren un consumo de recursos.

Por lo cual, con base en lo mencionado hasta el momento, el mantenimiento correctivo para reparar las fallas, las inspecciones, los reprocesos y el desecho de productos son los inductores de costos en esta problemática. En la tabla 1, se presenta un resumen de su relación con los costos ocultos y visibles pertinentes de esta problemática.

Tabla 1. Inductores de costos pertinentes al caso de estudio.

COSTOS OCULTOS		COSTOS VISIBLES
Falta de productividad	No calidad	
• Tiempo que dura la maquina detenida por mantenimiento correctivo • Tiempo dedicado a los reprocesos.	• Inspección exhaustiva • Cantidad de productos reprocesados. • Cantidad de productos desechados	• Cantidad de mantenimientos correctivos • Inspección de productos

Fuente: Elaboración propia.

Ahora bien, habiendo establecido la relación de los inductores con sus costos bien sea ocultos o visibles, es importante considerar la manera en que se calcula el valor económico de estos, pues al evaluar estos valores de manera cuantitativa se cuenta con una base para tomar decisiones relativas a la obsolescencia de una maquinaria.

En cuanto a esto, Lam & Banjevic (2015) proponen que los costos asociados a una falla como la pérdida de ingresos debido a un tiempo de inactividad no planificado son una función del tiempo de reparación y su cálculo se puede realizar mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Costo de inactividad} = CFP * t_{ina} \quad (1)$$

Donde CFP es el costo de penalización por el tiempo de inactividad y T_{ina} es el tiempo inactivo, es decir, el tiempo que dura el mantenimiento preventivo o correctivo.

Por su parte, Yanga et. al (2018) mencionan que la perdida económica ocasionada por las fallas, se relaciona directamente con la diferencia entre la tasa de producción en estado normal y en estado de falla, Ecuación 2.

$$CFP = Cfp (g_{nor} - g_{fal}) \quad (2)$$

Donde Cfp es el costo unitario, g_{nor} es la tasa de producción en estado normal y g_{fal} es la tasa de producción en estado de falla.

Ahora bien, teniendo en cuenta lo mencionado por estos autores sobre la inactividad y las pérdidas económicas que estos generan, se determina en esta tesis que el costo oculto por falta de productividad se puede obtener con la Ecuación 3, la cual relaciona las Ecuación 1 y Ecuación 2. Esto considera que para el caso propuesto en este trabajo, si el modelo presenta una falla tipo I (leve) se mantiene la misma tasa de producción y en caso de que la falla sea tipo II (Mayor) el sistema se detiene, por lo que tasa de producción es igual a cero (0). Además, se tiene en cuenta que la falta de productividad en este caso, no solo se debe a un mantenimiento, si no al hecho de tener que reprocesar piezas que salieron defectuosas anteriormente, y que restan tiempo al sistema para fabricar nuevos productos.

$$CFP = Cfp * T_{ina} * g_{nor} \quad (3)$$

Entonces, para el modelo presentado en este trabajo, CFP es el costo por falta de productividad y T_{ina} es el tiempo que la máquina dura inactiva por mantenimiento y/o reprocesando piezas defectuosas y g_{nor} es la tasa de producción de la máquina.

En cuanto al costo oculto ocasionado por no calidad se tienen tres aspectos a considerar: los reprocesos, los desechos de productos y las inspecciones.

- Los reprocesos, se ocasionan debido a una falla tipo I la cual genera que el sistema fabrique piezas no conformes que pueden ser reprocesadas o desechadas con base en una tasa de recuperación.

En cuanto al costo asociado a los reprocesos se tiene la Ecuación 4, usada por Mohammadi et. al (2015), donde se establece que el costo de reproceso es igual al producto del valor esperado de piezas aptas para reproceso $E(n)$ y el costo unitario de reprocesarlas c_r

$$CR = c_r * E(n) \quad (4)$$

Por su parte, Taleizadeh et. al (2013), propusieron que el costo por reprocesos anual se puede calcular de acuerdo a la Ecuación 5, que será la ecuación a utilizar en este trabajo, debido a que permite evaluar el costo de los reprocesos teniendo en cuenta los lotes de producción que se realizan al año, lo que implícitamente, permite tener en cuenta que existen momentos donde no se llevará a cabo un proceso de fabricación debido a las reparaciones de las máquinas y los mismos reprocesos, es decir tiempos de improductividad.

$$CR = \sum_{i=1}^n k R_i \quad (5)$$

Donde, k representa el costo unitario de reelaboración, R la cantidad de productos para reproceso en cada i -ésimo ciclo.

El obtener de un proceso productivo un producto categorizado como desecho, conlleva una falta de inventario que permita satisfacer la demanda de los clientes ocasionando un costo de rechazo, el cual se obtiene como el producto del costo unitario de rechazar un ítem c_{rec} y el número de productos defectuosos que serán rechazados N_{rec} , Ecuación 6. (Cheng, Zhou, & Li, 2018).

$$Cre = c_{rec} * N_{rec} \quad (6)$$

Adicionalmente, Cheng et. al (2018) propusieron en su estudio mantener un inventario que permita cubrir la cantidad de productos rechazados, con lo cual buscaban tener un valor óptimo de producción e inventarios que satisfagan la demanda de los clientes. Sin embargo, no todas las veces estos inventarios logran suplir los pedidos de los clientes, por lo que se genera un costo de escasez de producto o como algunos autores lo llaman un costo de venta perdido (Ecuación 7).

$$C_{rec} = \sum_{i=1}^n \pi s_i \quad (7)$$

En donde, π es el precio de venta por unidad de producto perdida y s es la proporción de escasez en el i -ésimo ciclo de producción. (Taleizadeha, Jalali-Nainib, Weec, & Kuo, 2013).

Considerando las dos ecuaciones anteriores, y el estudio que se propone en este trabajo, además de las propuestas realizadas por los autores en cuanto a los costos por desechar o rechazar un ítem defectuoso, se puede concluir que la Ecuación 7 es la más adecuada, puesto que permite abordar con mayor detalle y claridad las consecuencias económicas de obtener productos defectuosos de un proceso con maquinaria obsoleta, y además para este trabajo se supone que s_i es igual al número de productos rechazados.

- Finalmente, de acuerdo con Mohammadi et. al (2015) bajo un supuesto de inspección parcial de piezas producidas durante un tiempo t , el costo de inspección se puede obtener con la ecuación 8.

$$CI = c_{in}(1 - \mu) N \quad (8)$$

Donde c_{in} es el costo de inspección por unidad, μ es la proporción de productos no inspeccionados, N es el tamaño del lote de producción.

No obstante, es importante tener en cuenta que autores como Ouaret et. al (2018) consideran el costo de inspección como parte del costeo de producción, por lo cual, este sería un costo visible en dichos casos. Aun así cuando la inspección es total el tiempo que el trabajador requiere para realizar esta actividad es mayor, y en caso de encontrar productos defectuosos debe separar los productos conformes y los no conformes, que de acuerdo con Beheshti (2018) genera un costo adicional a la inspección y que se calcula mediante la ecuación 9.

$$CS = cs * x \quad (9)$$

Donde cs representa el costo unitario por separación y x es la cantidad de ítems defectuosos.

Tomando en cuenta lo mencionado por Beheshti (2018) y Mohammadi et. al (2015) se puede concluir que la inspección es un costo en el que se incurre para evitar que al cliente lleguen productos defectuosos. Sin embargo, al seguir una política de inspección parcial o por muestreo se puede llegar a aceptar productos o lotes defectuosos y venderlos a los clientes lo que ocasionaría un reclamo por parte de estos, una devolución de producto y la pérdida de la imagen y la lealtad de estos para con la empresa, conllevando a unas consecuencias económicas mayores, debido a costos de retornos, de pérdida de imagen, de transporte y de fabricación de nuevos lotes. (Mohammadi, Taleizadeh, Noorossana, & Noorossana, 2015)

Por tal motivo, en este trabajo se asumirá una política de inspección 100%, lo que generará un costo visible de inspección, que se obtendrá mediante la Ecuación 10, que se deriva de asumir, en la Ecuación 8, μ igual a cero, y un costo oculto, llamado costo de separación que se calcula mediante la Ecuación 9.

$$CI = c_{in} N \quad (10)$$

Por otra parte, en el calculo de los costos visibles asociados con los disfuncionamientos por obsolescencia de maquinaria se tiene el mantenimiento correctivo, el cual se realiza despues de que ocurre una falla, y se puede determinar mediante la ecuación 11.

$$C_{MC} = M_c * Nb \quad (11)$$

Donde, M_c es el costo unitario de cada mantenimiento correctivo y Nb es el número de mantenimientos correctivos realizados durante un intervalo de tiempo.

6. HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN

A través del tiempo, la aplicación de herramientas de simulación ha cobrado gran importancia en las empresas para la toma de decisiones, debido a que permiten evaluar diferentes acciones evitando la complejidad y los riesgos asociados a la implementación directa de las decisiones dentro de la organización, además, de que permite obtener con mayor velocidad resultados o recolectar datos relevantes para analizar la viabilidad de las acciones a implementar. (Álvarez Pomar & Centeno, 2015)

Por otra parte, el manejo del tema de la obsolescencia dentro de las empresas implica reactividad, proactividad y estrategia, para respectivamente identificar e implementar inmediatamente la solución, determinar potenciales fallas u obsolescencia de los componentes y planear, a más largo plazo y con ayuda de la recolección de datos a través del tiempo, las acciones a tomar y las optimizaciones a realizar, (Sandborn, 2013), para lo cual, se hace necesario contar con un método que permita a las organizaciones la recolección de los datos, que servirán de base para la toma de decisiones en cuanto a los equipos obsoletos.

Asimismo, dada la necesidad de evaluar cuantitativamente los escenarios de un proceso de manufactura con diversos cambios en el nivel actual y previsto de degradación de la maquinaria, la cantidad y costo de los mantenimientos, el nivel de producción deseado, restricciones de recursos de mantenimiento y disponibilidad de repuestos, entre otros, se usan herramientas de simulación que permitan una visión holística del sistema y su comportamiento ante el cambio de variables, sin el riesgo y los costos generados por llevar a cabo la implementación inmediata de alternativas (Yang, Djurdjanovic, & Ni, 2007). Es por esto, que para el cálculo de los costos ocultos operativos propuesto en este trabajo se hace uso de una herramienta de simulación que permita evaluar el estado de un sistema de manufactura obsoleto y las repercusiones, tanto operativas como económicas, de continuar operando bajo estas condiciones.

Sin embargo, cabe mencionar que Borgonovo et. al (1999), establecieron en su estudio que los métodos analíticos, no captan con facilidad elementos o aspectos para la gestión y el funcionamiento de una planta, como el envejecimiento, la reparación, la obsolescencia y la renovación de las máquinas. Con base en esto, se hace necesaria entonces, la generación de modelos de costos a lo largo de la vida que incorporen gestión de obsolescencia, para que se puedan entender los costos de sostenimiento durante la toma de decisiones, y se puedan establecer futuras acciones de gestión con miras al cumplimiento de la estrategia de la empresa (Sandborn, 2013).

Un ejemplo de estos modelos que involucran el comportamiento y el deterioro progresivo de las máquinas es el planteado por Lee & Ni (2013), donde se resalta la importancia de la interacción entre las condiciones de la máquina y la calidad del producto, aunque, el enfoque heurístico utilizado puede generar resultados

donde se requieran limpiezas o mantenimientos innecesarios, que aumentan los costos al querer asegurar la calidad de los productos.

Usualmente, el proceso de deterioro de las máquinas se modela con cadenas de Markov. Un proceso estocástico con una propiedad Markoviana indica que los estados pasados y futuros de un sistema son independientes de su estado actual. Lee & Ni muestran un enfoque en la naturaleza estocástica del problema, ignorando voluntariamente las interdependencias entre las estaciones del sistema, enfatizando en que el análisis de largo plazo se emplea para la planeación, mientras que el análisis a corto plazo se utiliza para realizar control. Cabe destacar que las operaciones no solo dependen de la condición de la máquina, sino de su limpieza y tratamiento, que previenen residuos cuya presencia afecte otros productos, o aún más, la vida útil de la máquina.

Además, es importante tener en cuenta la posibilidad o necesidad de cambio, producida por el nivel de daño de la maquinaria. Es por esto que en el trabajo realizado por Clavareau & Labeau (2009), las políticas de mantenimientos incluyen la estrategia de reemplazo como alternativa a los problemas que trae la obsolescencia tecnológica como la oferta de nueva maquinaria y la poca o nula existencia de repuestos usados en el mantenimiento o reparación de maquinaria antigua. Ellos realizaron una simulación Monte Carlo que incluyó los costos asociados a la aplicación de las tres estrategias planteadas: Reemplazo de todos los componentes correctivamente, reemplazo de una pieza correctivamente y las demás preventivamente después de la primera falla, o reemplazo de todos los componentes preventivamente, tomando en cuenta que estas piezas nuevas tendrán mejor desempeño y menor tasa de fallas. La falla es modelada exponencialmente y algunos de los costos asociados al proceso de implementación de la estrategia son:

- Costos de consumo (generalmente de energía)
- Costo de adquisición de los componentes
- Costo de labor (atribuido el o los equipos necesarios para realizar el mantenimiento y reemplazo)
- Pérdidas por producto no fabricado debido a paradas, tanto programadas como no programadas.

Ahora bien, teniendo en cuenta, que la simulación se puede entender como un proceso conformado por la representación de un sistema real, por medio del diseño de un modelo con el cual se realizan experimentos con el objetivo de entender el comportamiento del sistema y/o evaluar estrategias alternas dentro de los límites impuestos por los criterios y/o características propias del sistema (Álvarez Pomar & Centeno, 2015), es evidente que las características del sistema real que se desea estudiar condicionan el tipo de simulación y la herramienta a utilizar. Por esto, para establecer el método de simulación más adecuado para este trabajo conviene tener en cuenta los tipos de sistemas mencionados en el marco teórico y su relación con el estudio que se pretende realizar.

Por tanto, considerando que el caso de estudio de este trabajo, el cual se explicará con mayor detalle en el siguiente capítulo, es un sistema de manufactura sujeto a la obsolescencia de maquinaria, que tiene como consecuencias la aparición aleatoria de fallas y la realización de mantenimientos que garanticen la continuidad del sistema, se puede inferir que el sistema estudiado es de tipo dinámico, debido a que el tiempo influye en las variables principales como la edad y el desgaste de la máquina; estocástico, dado que, las fallas siguen una distribución de probabilidad al igual que la tasa de producción y los tiempos de mantenimiento y finalmente, discreto debido a que los eventos que generan cambios en el sistema se presentan en un instante de tiempo determinado. Teniendo en cuenta esto, se establece que el método de simulación más adecuado es la simulación de eventos discretos.

Además, de acuerdo con Negahban & Smith (2014) la simulación de eventos discretos (DES) es una de las técnicas más utilizadas para analizar y comprender la dinámica de los sistemas de fabricación, debido a que es una herramienta altamente flexible que permite evaluar diferentes alternativas de configuraciones de sistema y estrategias operativas para respaldar la toma de decisiones en el contexto de fabricación.

No obstante, dentro de este método se encuentran diferentes herramientas y técnicas que permiten llevar a cabo la simulación de eventos discretos de distintas maneras dependiendo del objetivo final, los recursos con los que se cuentan y las habilidades de la persona encargada de realizar la simulación. Para esto, Diallo et. al (2015) dentro su estudio presentan una lista de las diferentes técnicas o herramientas que se pueden utilizar en el desarrollo de una simulación, entre las cuales se encuentra, las redes de Petri.

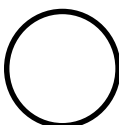
Esta técnica, es un enfoque de simulación tomado por algunos autores, en el que se maneja el paralelismo y la sincronización entre los eventos (que generan cambio en las variables de estado) y las actividades (que relaciona lo que sucede entre dos eventos), determinando inmediatamente los eventos que aparecen en cierto estado y los que desencadenaría a futuro. Adicionalmente, las redes de Petri permiten descomponer un sistema en varios subsistemas más sencillos lo que genera un análisis más detallado de las consecuencias de la aparición de un evento, la determinación de bloqueos, los posibles caminos que se pueden tomar para llegar a un estado final y el costo de cada uno. (Guasch, Piera, Casanovas, & Figueras, 2005).

Entonces, dada la versatilidad, el detalle y la facilidad de implementación de una red de Petri para modelar un sistema, se determina que esta es la herramienta a utilizar para el desarrollo de este trabajo.

Las redes de Petri son un caso particular de grafo dirigido que está conformado por tipos de nodos llamados transiciones, representadas por un rectángulo, y los lugares, representados por círculos, que se encuentran conectados por arcos. Las transiciones sirven para modelar los eventos que aparecen en la dinámica del sistema y los lugares se utilizan para escribir los recursos o elementos que

integran el sistema. En cuanto a los arcos, estos pueden ser de dos tipos: el arco normal, representado por una flecha y el arco de inhibición, representado por una línea punteada con un círculo en su extremo. Adicionalmente, dentro del modelo gráfico de la red de Petri se hace uso de un símbolo llamado Token (punto), los cuales tienen un significado dependiendo el lugar donde este se encuentre, como, por ejemplo, si se ubican en una bodega, pueden simbolizar la disponibilidad de producto y su ausencia indicaría la ausencia del mismo. (Guasch, Piera, Casanovas, & Figueras, 2005)

Tabla 2 Símbolos de la Red de Petri

Símbolo	Significado
	Transición, momento de ocurrencia de un evento.
	Lugares, donde ocurre un proceso o donde se almacena algo.
	Marca o Token
	Arco Normal: el valor de este arco, indica la cantidad de tokens (t) que deben existir en el lugar, para que la transición que lo sucede pueda ocurrir.
 t	Arco Inhibidor: Es el inverso al arco normal, es decir, indica que en el lugar que lo antecede debe haber menos de t tokens para que la transición ocurra.

Fuente: Elaboración propia, basado en (Guasch, Piera, Casanovas, & Figueras, 2005)

Con relación a la programación de la red de Petri, se utiliza un modelo de programación basado en condicionales, con los que se establece la relación causal de los eventos y las consecuencias que pueden ocurrir en el sistema a lo largo de la simulación con base en ciertas condiciones. Para esto, se pueden utilizar diversos softwares de programación entre los que se encuentra el complemento de Excel Visual Basic, que será el utilizado en este trabajo.

7. CASO DE ESTUDIO: SISTEMA DE MANUFACTURA CON OBSOLESCENCIA DE MAQUINARÍA

Como ya se ha mencionado, este estudio se enfoca en el cálculo de los costos ocultos operativos inducidos por las fallas presentadas en la maquinaria y las actividades que se deben realizar para que un proceso productivo, que se encuentra sujeto a la obsolescencia, no se detenga y pueda cumplir con los requerimientos de los clientes. Bajo estas consideraciones, se propone un sistema de manufactura compuesto por dos máquinas en serie, sujetas a dos tipos de fallas como consecuencia del desgaste acumulado, las cuales fabrican un único tipo de producto con una tasa de producción variable. Adicionalmente, el sistema de manufactura también cuenta con una inspección final, donde se evalúa la conformidad de los productos fabricados.

7.1. Descripción modelo Caso de estudio

El sistema de manufactura propuesto en este trabajo tiene tres características fundamentales para su desarrollo, que son: el proceso productivo, la obsolescencia y el mantenimiento.

- **Proceso productivo**

Se considera un proceso de producción, de un único ítem, compuesto por dos máquinas en serie M_1 y M_2 con igual tasa de producción, la cual es un valor constante de g_1 y g_2 piezas/ día, que en un entorno real, están dados por las características de fabricación de la maquinaria. La siguiente ilustración muestra de manera sencilla como se conforma el sistema:



Ilustración 1 Componentes del sistema del caso de estudio

Además, para que el proceso productivo inicie, es decir M_1 comience a trabajar, se requiere de la llegada de una cantidad J de materia prima a la bodega (representada en la Red de Petri como P_1), el tiempo entre llegadas de la materia prima se define como un valor constante t_{lmp} , que permita contar con disponibilidad de producto en todo momento, con el fin de evitar la interrupción de la fabricación debido a la ruptura del inventario.

Por otra parte, el proceso de fabricación en M_2 inicia cuando M_1 entrega la primera pieza producida. Es importante tener en cuenta, que debido a que las

máquinas tienen igual tasa de producción, en este trabajo no se considera inventario en proceso. Finalmente, el ciclo de producción termina cuando se haya fabricado un lote de tamaño N completo.

Una vez el lote está completo es enviado a control de calidad, donde se realiza una inspección 100% para definir si los productos están conformes o no, y este proceso tiene una duración constante representada por t_{ins} . Si el producto está conforme, se envía a una bodega de producto terminado, desde donde se dispone para la venta, si, por el contrario, el producto se encuentra no conforme, el inspector debe clasificar las piezas entre reproceso y rechazo, lo cual tiene un tiempo adicional, denominado tiempo de clasificación t_{cl} . Para entender mejor el proceso ver ilustración 2.

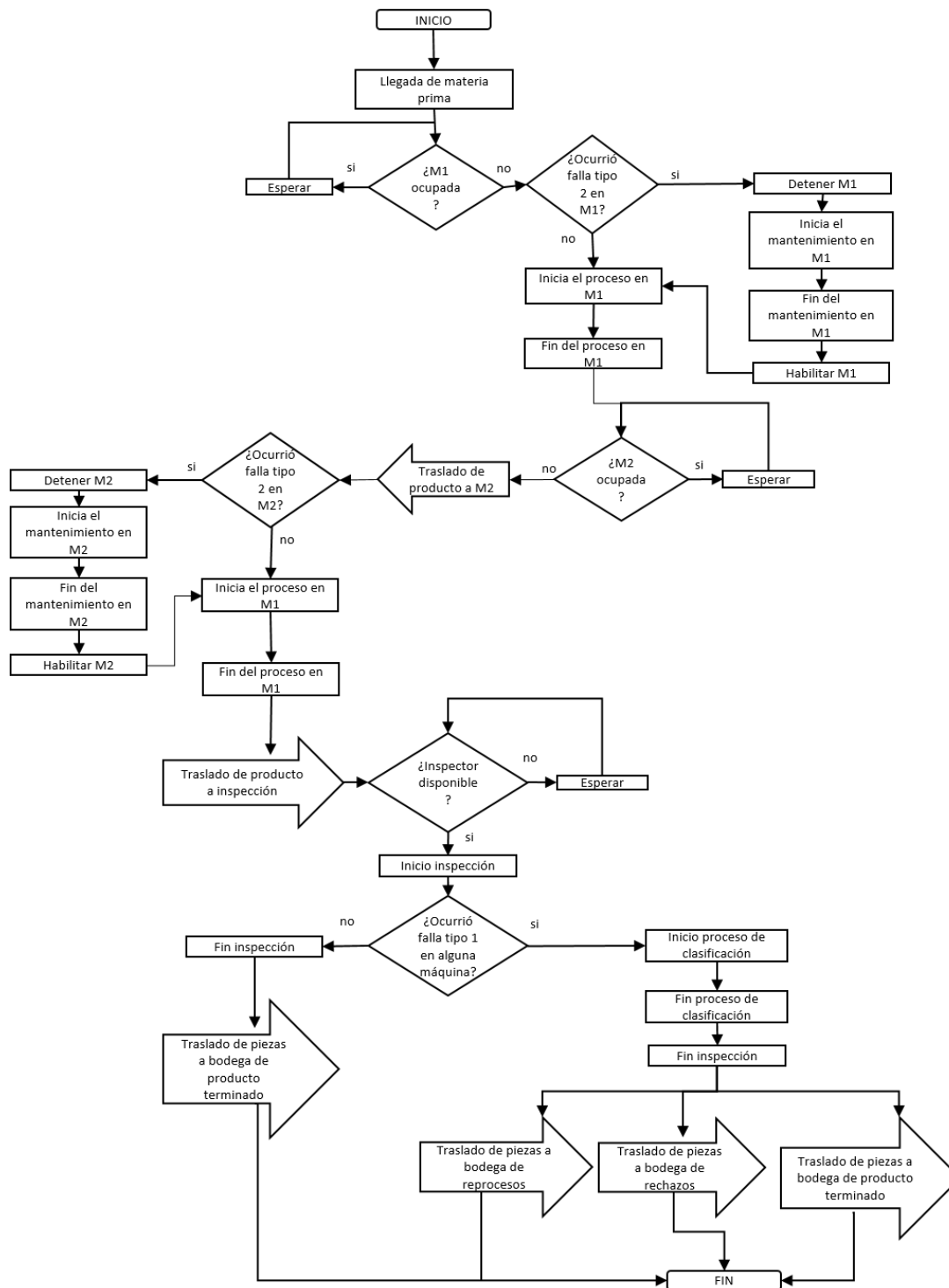


Ilustración 2 Diagrama de Flujo sistema de manufactura

Ahora bien, la proporción de productos no- conformes que puede generar la máquina a causa de una falla tipo I, está dada por la Ecuación 12, y a su vez la clasificación de los productos en aptos para reproceso y rechazados es representado por una tasa de reprocesos, es decir, de todos los productos no-

conformes sólo un porcentaje σ , establecido inicialmente, son aptos para reprocesos.

$$P_{ki} = P_k^0 + \eta * f_k(A_{ki}) \quad (12)$$

En esta ecuación P_k^0 representa la proporción de defectuosos producidos, por cualquier máquina M_k , en un estado de control y η es la tasa de defectuosos cuando hay falla tipo I y $f_k(A_{ki})$ es la probabilidad de falla para la máquina k dependiente del desgaste acumulado (Cheng, Zhou, & Li, 2018). Cabe resaltar que para el modelo desarrollado en este trabajo tanto la cantidad de defectuosos obtenida, como el producto de la proporción de defectuosos y el tamaño del lote fabricado, se aproximarán al entero superior, dado que se asume la producción de unidades completas, es decir, productos que se cuentan en valores enteros.

Una vez se conoce la cantidad de productos que se encuentran aptos para reproceso, son enviados a la máquina M_1 , donde inician el proceso productivo nuevamente. En este trabajo se asume que la tasa de producción del i -ésimo ciclo es la misma con la que se reprocesarán los productos en cada máquina, lo que ocasiona que las máquinas dejen de procesar nuevas piezas durante un tiempo, tr_{ik} , que está dado por la cantidad de reprocesos y la inversa de la tasa de producción, Ecuación 13.

$$tr_{ik} = R_i * \frac{1}{g_{ik}} \quad (13)$$

En cuanto a los productos rechazados, esto serán desechados en su totalidad, lo que conlleva a ventas perdidas, bajo el supuesto de que todas las piezas que se fabrican se venden.

- **La obsolescencia**

Como se mencionó anteriormente, la obsolescencia es una disminución económica y productiva de las máquinas debido al envejecimiento de estas. Adicionalmente, el desgaste de las máquinas tiene una relación directa con la tasa de producción, debido a que el constante funcionamiento de la maquinaria conlleva a un incremento en la tasa de fallas del sistema, lo que incrementa el desgaste acumulado y disminuye la edad de la máquina. (Boulash, Gharbi, & Pellerin, 2018) (Ouaret, Kenné, & Gharbi, 2018).

En este modelo se consideran dos tipos de fallas: tipo I, llamada falla mínima, la cual ocasiona que la máquina que la presenta genere productos defectuosos y solo es detectada en la inspección; puesto que se asume que el sistema genera productos conformes cuando se encuentra en estado perfecto, es decir sin fallas. La falla tipo II, catastrófica, es auto anunciante debido a que ocasiona que la máquina no funcione, por lo cual el proceso productivo es detenido hasta que la falla sea reparada. La probabilidad de ocurrencia de fallas, en el ciclo i para cada

máquina k , sigue una distribución de Weibull que aumenta con el desgaste acumulado, Ecuación 14 tomada de Boulash et. al (2018)

$$f_k(A_{ki}) = 1 - e^{-\beta * A_{ki}^\lambda} \quad (14)$$

Donde, β y λ son valores constantes que representan los parámetros de escala y forma de la distribución, respectivamente, A_{ki} es el desgaste acumulado de la máquina k en el i -ésimo ciclo de producción. Se debe tener en cuenta que, debido a que se está manejando la distribución de probabilidad Weibull y sus valores oscilarán de acuerdo a los parámetros β y λ asignados, en este trabajo se asume que las fallas en las máquinas se presentan de acuerdo con la ecuación 15, en donde m y n son valores constantes.

$$f_k(A_{ki}) = \begin{cases} < m & \text{No hay fallas} \\ m \leq f_k \leq n & \text{Falla tipo I} \\ > n & \text{Falla tipo II} \end{cases} \quad (15)$$

Cada máquina k tiene una edad inicial, E_k , que está dada en términos de la cantidad máxima de producción y se ve afectada negativamente por el desgaste acumulado que presentan las máquinas como consecuencia de la producción, lo que genera una reducción de la vida útil de la máquina en cada ciclo de producción i (Ecuación 16).

$$Em_{ik} = E_k - A_{ki} \quad (16)$$

En el caso de M_1 el desgaste para cada ciclo i , D_{1i} , tiene una relación lineal con la tasa de producción de la máquina uno tal como se muestra en la Ecuación 17.

$$D_{1i} = \varphi * g_i \quad (17)$$

Donde, φ es una constante positiva que representa el tiempo de desgaste de la máquina en el i -ésimo ciclo de producción debido a una tasa de producción g_i . (Ouaret, Kenné, & Gharbi, 2018)

En el caso de la máquina dos (M_2) este desgaste, además de verse afectado por la tasa de producción de la máquina, puede presentar un desgaste adicional, ϕ debido a recibir productos defectuosos de la máquina uno (Ecuación 18), es decir, cuando en M_1 se presente una falla tipo I el desgaste en M_2 es mayor (Boulash, Gharbi, & Pellerin, 2018).

$$D_{2i} = \varphi * g_i + \phi \quad (18)$$

Y para ambas máquinas el desgaste acumulado en el i -ésimo ciclo de producción, A_{ki} , es igual al desgaste acumulado en el ciclo $i-1$ más el desgaste de la máquina k en el i -ésimo ciclo, y puede disminuir si se presenta un mantenimiento para reparar la falla tipo I o II, en la máquina k en el i -ésimo ciclo, Ecuación 19, adapta de Boulash et.al (2018)

$$A_{ki} = A_{ki-1} + (1 - \vartheta - \theta)D_{kt} \quad (19)$$

Donde, ϑ y θ son valores constantes que representan el porcentaje de recuperación de edad de la máquina dado un mantenimiento debido a una falla tipo I y tipo II, respectivamente. Estos factores se pueden relacionar con el tiempo que dure el mantenimiento, puesto que algunos autores relacionan el tiempo de duración con las mejoras que se pueden presentar en la máquina. Como por ejemplo algunos autores, establecen una función que permite determinar la tasa de restauración de la edad de la máquina, con base en el instante antes del mantenimiento y después de este. (Kang & Subramaniam, 2018). Otros autores (Fakher , Nourelfath , & Gendreau , 2018), consideran que la restauración del equipo es proporcional al costo, es decir, el modelo propuesto el mantenimiento es una variable de decisión, con la que se busca obtener el mayor beneficio el cual corresponde a el nivel óptimo de mantenimiento bajo el supuesto de que existe un número finito de alternativas de mantenimiento con distintos costos e impactos en la confiabilidad de la máquina.

Adicionalmente, se debe tener en cuenta que ϑ y θ son valores constantes que representan el porcentaje de recuperación de edad de la máquina dado un mantenimiento debido a una falla tipo I y tipo II, sin embargo, si no se presenta un mantenimiento en la máquina estos valores eran igual a cero, por tanto, el mantenimiento acumulado puede incrementar entre un ciclo de producción y el anterior, es decir, si la máquina no tuvo mantenimiento durante el ciclo de producción el desgaste acumulado sería igual a $A_{ki} = A_{ki-1} + (1)D_{ki}$

- **La reparación o mantenimiento**

Para este trabajo se asume que el sistema de manufactura no tiene una política de mantenimiento preventivo, por lo tanto, sólo se somete a reparación o mantenimiento cuando se presenta una falla, bien sea mínima o catastrófica, con el fin de garantizar la continuidad de la producción y la conformidad de los productos. Estos mantenimientos tienen una duración aleatoria que sigue una distribución exponencial con media de μ_1 para las reparaciones por falla tipo I y μ_2 para las fallas tipo II, en donde, $\mu_2 > \mu_1$, debido a que la falla II tiene un nivel de gravedad mayor. (Gouiaa-Mtibaa A. , Dellagi, Achour, & Erray, 2018)

Adicionalmente, el mantenimiento también tiene un efecto sobre la edad la máquina debido a que devuelve al equipo a un estado mejor, de acuerdo con una tasa de recuperación, es decir que cuando se hace una reparación, el desgaste acumulado de la máquina, A_{ki} es menor y por ende, la vida útil de la máquina aumenta.

Teniendo en cuenta estas tres características del sistema de manufactura y las suposiciones resumidas en la tabla 3, se cuenta entonces con diez variables principales (Tabla 4) que se obtienen como resultado de la simulación y que permitirán realizar el cálculo de los costos ocultos operativos y visibles de un sistema de manufactura sujeto a fallas.

Tabla 3 Suposiciones de Modelo Caso de Estudio.

SUPOSICIONES
• En ningún momento se tiene inventario en proceso entre las máquinas. • El proceso en estado normal (sin fallas) no fabrica productos no-conformes. $P_k^0 = 0$ • La probabilidad de fallas sigue una distribución de Weibull. • Los tiempos de mantenimientos están dados por una distribución exponencial. • Las reparaciones devuelven a la máquina a un estado mejor, es decir, disminuye el desgaste acumulado de acuerdo con una tasa de recuperación. • Todos los productos conformes son vendidos, por tanto, un producto rechazado equivale a una venta perdida. • Los reprocesos tienen la misma tasa producción establecida para el ciclo • Todos los reprocesos inician en la máquina uno • Cuando se tienen piezas para reproceso, M_1 toma estas en vez del inventario de Materia prima hasta reprocesar toda las piezas. • Las inspecciones de productos y la clasificación tienen un tiempo constante. • Cuando se presenta una falla en la máquina dos, la máquina uno también se detiene debido a que no se cuenta con un búfer intermedio que garantice la fluidez del proceso.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4 Variables Principales del Modelo

g_t	Tasa de producción en el i -ésimo ciclo de producción. [und/día]
$Tina_i$	Tiempo de inactividad en el ciclo i . [día]
tm_{lk}	Tiempo de mantenimiento para la falla l en la máquina k en el i -ésimo ciclo. [día]
tr_{ik}	Tiempo de reproceso en la máquina k en el i -ésimo ciclo. [día]
Pr_i	Proporción de productos para reproceso obtenidos en el ciclo de producción i
S_i	Cantidad de productos rechazados en el i -ésimo ciclo de producción. [Und]
t_{ins}	Tiempo de inspección. [día]
t_{cl}	Tiempo de clasificación. [día]
f_k	Función de probabilidad de falla en la máquina k . (Distribución Weibull)
D_{ki}	Desgaste de la máquina k en i -ésimo ciclo. [Und]

Fuente: Elaboración propia.

Además de las variables principales, para el funcionamiento del modelo de simulación es necesario establecer variables auxiliares y los parámetros de las distribuciones utilizadas en este trabajo, las cuales se resumen en la tabla 5

Tabla 5 Variables auxiliares y parámetros.

N	Tamaño del lote de producción. [und]
t_{lmp}	Tiempo entre llegadas de materia prima [día]
J	Cantidad de materia prima que llega a la Bodega [und]
η	Tasa de defectuosos cuando hay falla tipo I
σ	Proporción de productos defectuosos que son rechazados.
g	Tasa de producción. [und/día]
μ_l	Media de tiempos de mantenimiento dada una falla tipo l que siguen una distribución exponencial. [día]
P_{ki}	Proporción de productos defectuosos fabricados por la máquina k en el i -ésimo ciclo.
β y λ	Parámetros de escala y forma para la función de probabilidad de falla en la máquina k . (Distribución Weibull)
φ	Tiempo de desgaste de la máquina en el i -ésimo ciclo de producción [día]
ϕ	Desgaste adicional en la máquina dos por recibir productos defectuosos provenientes de la máquina uno. [Und]
δ	Factor de recuperación de edad por mantenimiento de falla tipo I.
θ	Factor de recuperación de edad por mantenimiento de falla tipo II.
A_{ki}	Desgaste acumulado de la máquina k en i -ésimo ciclo. [Und]
Em_{ik}	Vida útil de la máquina k en i -ésimo ciclo. [Und]
E_k	Edad o vida útil inicial de la máquina k . [Und]
Nb_i	Cantidad de mantenimiento en el i -ésimo ciclo. [und]

Fuente: Elaboración propia.

Una vez se obtengan los resultados del modelo de simulación se debe proceder a calcular los costos ocultos y visibles asociados al sistema de manufactura, para lo cual se utilizarán las ecuaciones presentadas en la tabla 6, que fueron explicadas en el capítulo de inductores de costos ocultos. Adicionalmente, en la tabla 5 se presenta un resumen de la descripción de cada variable utilizada en el cálculo de los costos.

Tabla 6 Descripción de las variables de los Costos

Costos Ocultos	Costos Visibles
CFP_{ik} Costo por falta de productividad en la máquina k en el i -ésimo ciclo [\\$]	CI_i Costo de inspección en el ciclo i . [\\$]
c_{fp} Costo unitario por falta de productividad en la máquina k . [\$/día]	c_{ins} Costo unitario de inspección. [\$/Und]
CR_i Costo de reproceso en el i -ésimo ciclo. [\\$]	MC_i Costo de mantenimiento en el ciclo i . [\\$]
c_{rep} Costo unitario de reproceso. [\$/Und]	c_{Mc} Costo unitario de mantenimiento. [\$/# mantenimiento]
CRE_i Costo de rechazo en el i -ésimo ciclo. [\\$]	CP Costos de producción. [\\$]
π Precio unitario. [\$/Und]	c_p Costo de producción unitario. [\$/Und]
CS_i Costo de separación en el ciclo i [\\$]	
c_s Costo unitario de separación. [\$/Und]	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7 Ecuaciones asociadas a los costos

Tipo de costo	Costo	Ecuación
Costos Ocultos	Costo por falta de productividad en cada ciclo de producción	$CFP_{ki} = c_{fp} * (Tina_{ik} * g_i)$ Donde, $Tina_{ik} = tm_{ik} + tr_{ik}$
	Costo de reproceso para cada ciclo de producción	$CR_i = cr * (Pr_i * N) * \sigma$
	Costo de rechazo en el i -ésimo ciclo.	$CRec_i = \pi * S_i$ Donde, $S_i = (P_{ki} * N) * (1 - \sigma)$
	Costo de separación o clasificación de productos en cada i -ésimo ciclo.	$CS_i = c_s * (P_{ki} * N)$
Costos visibles	Costo de inspección en cada i -ésimo ciclo.	$CI = c_{in} * N$
	Costo de mantenimiento en cada i -ésimo ciclo.	$CMC_i = Mc * Nb_i$
	Costo de producción.	$CP = c_p * N$

Fuente: Elaboración propia.

7.2. Red de Petri: Caso de estudio.

Al modelar el sistema caso de estudio por medio de redes de Petri, se hace necesaria la creación del grafo que permita visualizar de manera detallada las relaciones causales entre los eventos, a los que está expuesto el sistema, y sus consecuencias, antes de realizar la respectiva programación. Para este caso, se recomienda la lectura del libro de Guasch et al. (Modelado y simulación, Aplicación a procesos logísticos de fabricación y servicios, 2005), con el fin de visualizar algunos ejemplos de representación de Redes de Petri.

Para la realización del modelo gráfico, se toma como base un sistema de manufactura básico compuesto por dos máquinas, una llegada de materia prima, un inspector y una clasificación de productos dependiendo el estado de calidad.

Gráficamente, este sistema básico de manufactura se representa por medio de la ilustración 1, en donde se tienen seis transiciones o eventos (rectángulos) y once lugares (círculos) que simbolizan la consecuencia del evento, (explicados en la tabla 8), los cuales están unidos por arcos normales, que no presentan un número, lo que indica que para este modelo sólo se requiere que en cada lugar existan un token para que la transición que lo precede pueda ocurrir.

Tabla 8 Símbolos Red de Petri: Sistema básico

Símbolo	Significado
T1	Representa el evento de llegada de materia prima al sistema.
P1	Es la bodega donde se almacena la materia prima.
T2	Inicio de proceso de la máquina 1.
P2	Máquina 1 en operación.
P3	Disponibilidad de la Máquina 1.
T3	Inicio de proceso de la máquina 2.
P12	Disponibilidad de la Máquina 2.
P15	Máquina 2 en operación.
T16	Inicio inspección de piezas.
P16	Disponibilidad del inspector.
P17	Inspector en proceso.
T17	Inicio de Clasificación de piezas.
P18	Clasificación en proceso.
T18	Fin de clasificación.
P19	Almacén de productos conformes.
P20	Almacén de productos rechazados.
P21	Almacén de productos para reproceso.

Fuente: Elaboración propia.

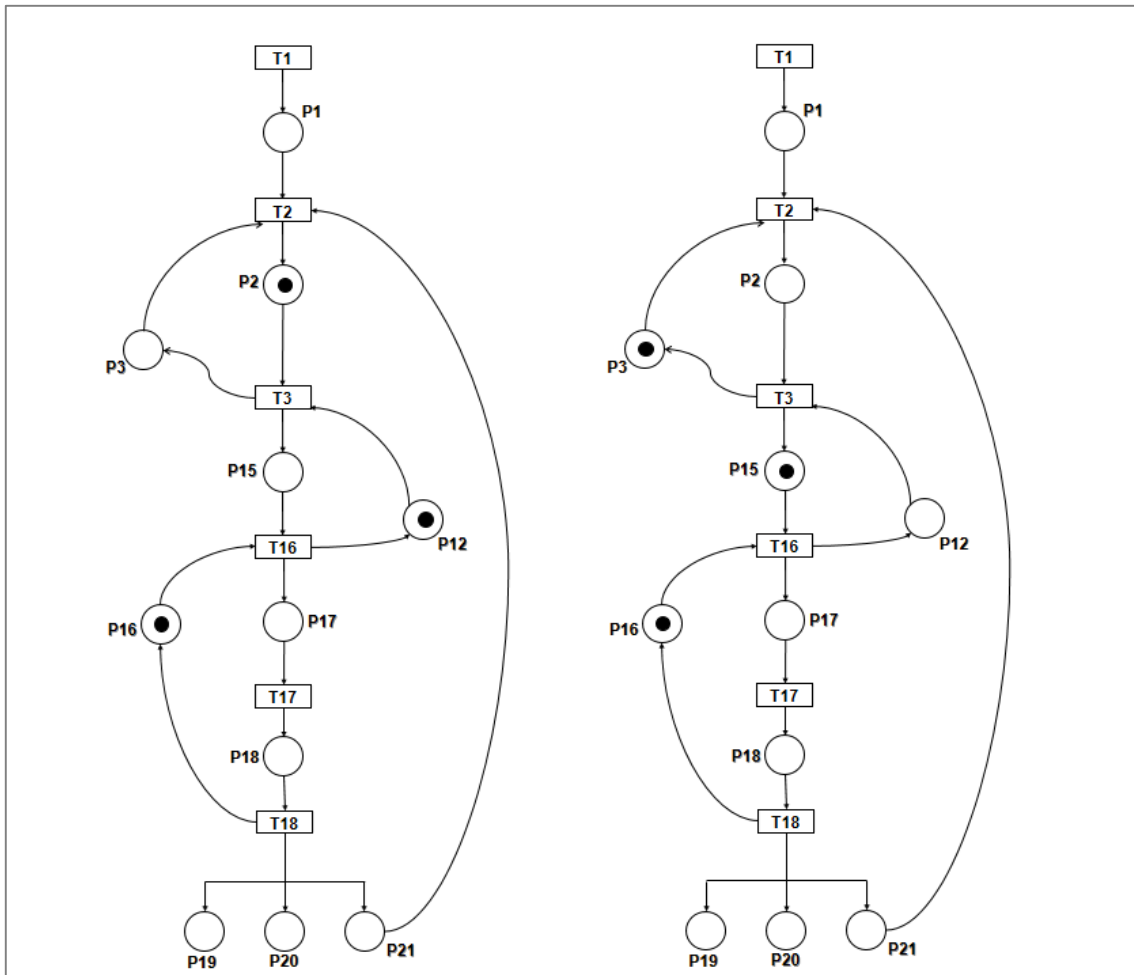


Ilustración 4 Red básica: Ejemplo proceso producción.

Una vez finalizado el proceso de producción en la maquina 2, esta vuelve a estar disponible y la transición 16 puede ocurrir, es decir, el proceso de inspección comienza (token en P17), y cuando este finaliza, la transición 17 sucede, iniciando así el proceso de clasificación de piezas. Cuando se finaliza la clasificación (transición T18), el producto es enviado a las bodegas, P19, P20, P21, dependiendo de la calidad del producto, y por tanto, puede suceder que aparezcan tokens, en las tres bodegas o en solo una de ellas, indicando que se tiene producto disponible, para rechazo, para venta o para reproceso. Adicionalmente, cuando sucede T18, el token de disponibilidad del inspector se devuelve a P16 (ilustración 4).

Finalmente, en caso de que en P21 exista un token, la transición T2 puede ocurrir, inicia el proceso de producción de la máquina 1, tomando como materia prima el token de P21. Si en algún caso existe token en P21 (producto para reproceso) y en P1 (materia prima), la maquina 1 tomará prioritariamente los tokens disponibles en P21, es decir, primero se realiza el reproceso de productos.

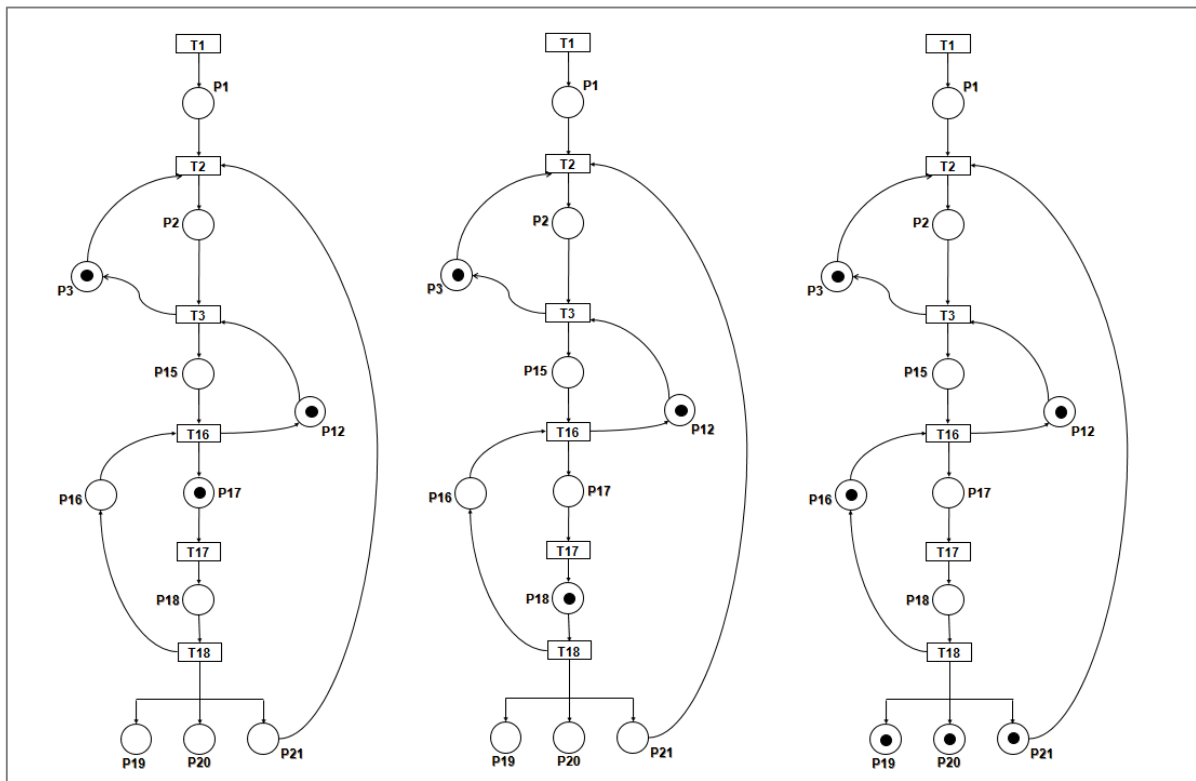


Ilustración 5 Red básica: Ejemplo proceso de inspección

Teniendo en cuenta este modelo base y el concepto de obsolescencia, además de las suposiciones planteadas en este trabajo, se deben adicionar al grafo, las consecuencias del desgaste de las máquinas, como las fallas y sus debidos mantenimientos, de manera que, con relación a la máquina 1 y su desgaste se tienen seis transiciones adicionales (rectángulos) y cinco lugares nuevos (círculos) explicados en la tabla 9.

Tabla 9 Símbolos Red de Petri: Desgaste máquina 1.

Símbolo	Significado
P4	Desgaste de la máquina 1.
T4	Falla tipo II en máquina 1.
P5	Máquina 1 en falla tipo II.
T5	Inicio reparación máquina 1 por falla tipo II.
P6	Máquina 1 en reparación falla tipo II.
T6	Fin de reparación falla tipo II en máquina 1.
T7	Falla tipo I en máquina 1.
P7	Máquina 1 en falla tipo I.
T8	Inicio reparación máquina 1 por falla tipo I.
P8	Máquina 1 en reparación falla tipo I.
T9	Fin de reparación falla tipo I en máquina 1.

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al desgaste de la máquina 1 (ilustración 4), se debe tener en cuenta que este está directamente relacionado con la producción, por lo cual al ocurrir la transición 2, que equivale al inicio de operación de la máquina 1, se genera un desgaste, lo que trasladaría un token a P4 cada vez que la máquina inicie operaciones. En cuanto a la ocurrencia de las fallas T4 y T7, aunque están unidas al desgaste por un arco normal (de color verde), su activación depende de la probabilidad de falla, ligada internamente (por medio de la programación del código en Visual Basic) al desgaste. Es decir, cuando la probabilidad de falla tiene como resultado un valor que representa la ocurrencia de la falla 1, entonces T7 es activado y se ubica un token en P7, indicando que la máquina 1 se encuentra en falla tipo I, lo que conllevaría a la necesidad de realizar una reparación de la máquina (T8), lo que a su vez quitaría el token de P3, disponibilidad de la máquina, hasta finalizar la reparación.

Si, por el contrario, el valor de la probabilidad de falla indica la ocurrencia de la falla tipo II, entonces se activa la transición 5, trasladando un token a P6 y quitando el token de disponibilidad de la máquina. Además, la realización de los mantenimientos, como se mencionó anteriormente, conlleva un porcentaje de recuperación para la máquina, es decir, el desgaste se disminuye en cierta cantidad, y es por esto, que el arco que une los mantenimientos y el desgaste se encuentra de un color diferente (verde y naranja), indicando que no se elimina una unidad completa de desgaste, algo que no es común en las redes de Petri tradicionales, pues estas siempre funcionan con el movimiento completo de los tokens, lo que convierte a esta Red de Petri en una de alto nivel.

Por otra parte, se tiene el desgaste de la máquina 2 (ilustración 5), que al igual que en M_1 , está relacionado con el proceso de producción de la máquina, sin embargo, en este caso, el desgaste también se ve afectado por aparición de una falla tipo I en la máquina 1 (T7), debido a que esta falla ocasiona que la máquina genere productos defectuosos, con llevando a que M_2 procese productos con defectos que la desgastan aún más, sin embargo aunque T7 (Falla tipo I en M_1) está unido por un arco normal a P9 (Desgaste de M_2), el efecto que tiene la falla I en M_1 , en el desgaste de M_2 , no es igual a una unidad, por esto, se presenta el arco en otro color (azul). Finalmente, en cuanto a los mantenimientos y su relación la disponibilidad y el desgaste la máquina, funcionan de la misma manera que para M_1 , teniendo así seis transiciones (rectángulos) adicionales y cinco lugares nuevos (círculos), estos son explicados en la tabla 10.

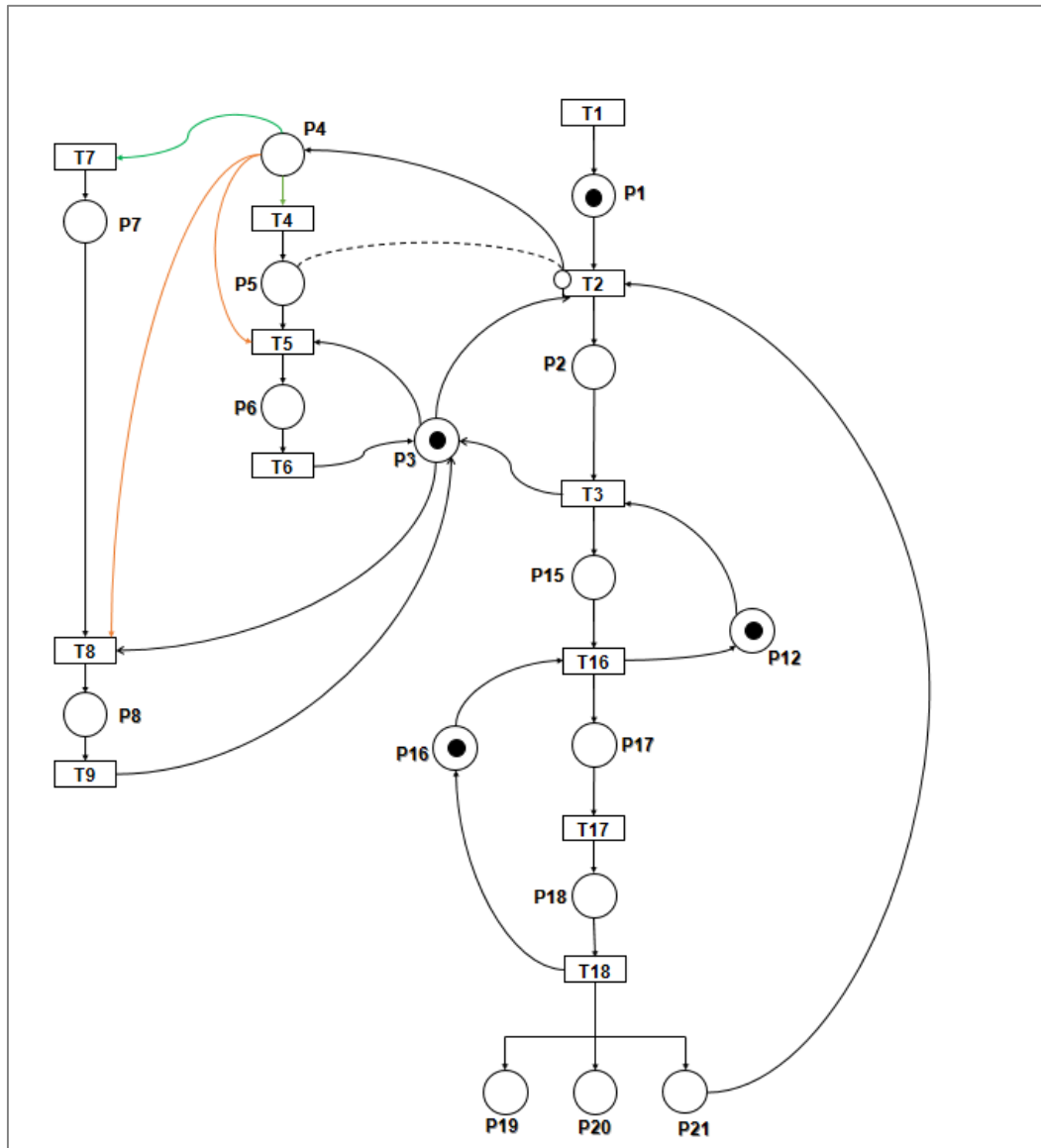


Ilustración 6 Red de Petri: Desgaste en Máquina 1.

Tabla 10 Símbolos Red de Petri: Desgaste máquina 2.

Símbolo	Significado
P9	Desgaste de la máquina 2.
T10	Falla tipo II en máquina 2.
P10	Máquina 2 en falla tipo II.
T11	Inicio reparación máquina 2 por falla tipo II.
P11	Máquina 2 en reparación falla tipo II.
T12	Fin de reparación falla tipo II en máquina 2.
T13	Falla tipo I en máquina 2.
P13	Máquina 2 en falla tipo I.
T14	Inicio reparación máquina 2 por falla tipo I.
P14	Máquina 2 en reparación falla tipo I.
T15	Fin de reparación falla tipo I en máquina 2.

Fuente: Elaboración propia.

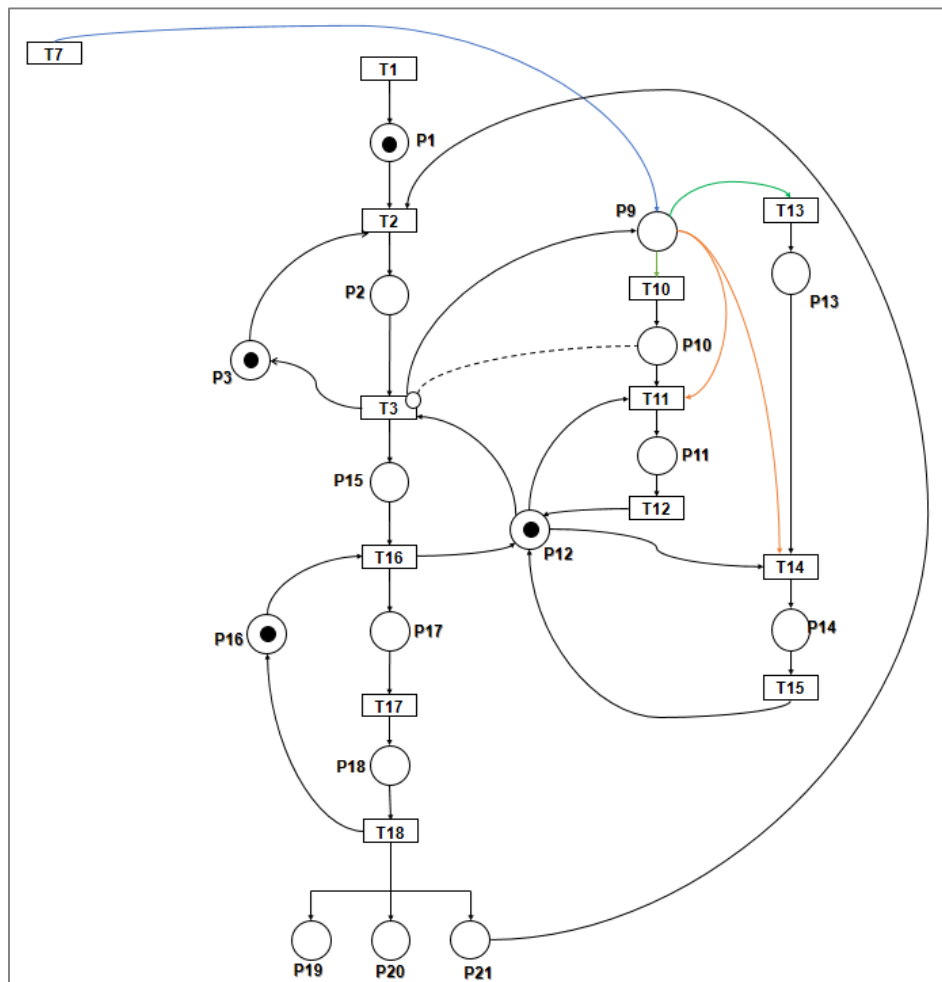


Ilustración 7 Red de Petri: Desgaste en Máquina 2.

La red completa que representa el sistema caso de estudio propuesto en este trabajo se presenta en la ilustración 6. Por otra parte, la programación interna del modelo, realizada en Visual Basic, con las ecuaciones mostradas en la descripción del modelo caso de estudio se encuentra sección de anexos.

8. SIMULACIÓN Y RESULTADOS

8.1. Inicialización de variables y parámetros

Antes de iniciar la simulación del modelo caso de estudio, se establecen los valores iniciales para los parámetros de las distribuciones y variables auxiliares que lo requieren, Tabla 11. Cabe aclarar que estos valores son estipulados por las autoras, teniendo en cuenta la literatura mencionada a lo largo de este trabajo.

Tabla 11 Valores de iniciales del modelo

Variable / Parámetro	Valor inicial
N	10 [und]
t_{imp}	2 [días]
J	5 [und]
E_K	200 [und]
g	0,5 [und /día]
λ	0,001
β	3
t_{ins}	0,5 [días]
t_{cl}	0,2 [días]
σ	0,2
η	0,5
μ_1	0,25 [días]
μ_2	0,75 [días]
ϕ	0,2 [und]
m	0,75
n	0,85
∂	0,5
θ	0,8

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, para establecer los valores de los costos unitarios del modelo se tienen en cuenta los siguientes criterios:

- Salario mínimo mensual legal vigente en Colombia para el 2018 (\$781.242), lo que equivale a \$26.000 /día aproximadamente.
- Un costo de materia prima de \$500/und.
- Los tiempos de inspección y clasificación por unidad.
- La tasa máxima de producción diaria.
- Y un margen de ganancia del 20%.

Con esto se tiene entonces, que el costo unitario de producción equivale al costo de una unidad de materia prima, más el costo por unidad, con base en la tasa de producción máxima, de tener dos operarios, uno por cada máquina (Ecuación 20).

$$c_p = \left(\left(\frac{26.000 \left[\frac{\$}{\text{día}} \right]}{5 \left[\text{Und}/\text{día} \right]} \right) * 2 \right) + 500 [\$/und] \cong 10.900 [\$/und] \quad (20)$$

El costo de reproceso, sería igual al costo de producción menos el valor de la materia prima, debido a que en este caso no se requiere consumir de ella. En cuanto a los costos de inspección y de clasificación, estos se establecen de acuerdo con el tiempo que toma inspeccionar o clasificar una unidad, es decir, es el producto del salario mínimo por día de un operario y el tiempo que toma realizar estas actividades.

El costo de falta de productividad (Ecuación 21), se determina teniendo en cuenta, que al no producir se tendrían dos operarios ociosos y se tendría una cantidad J de materia prima almacenada más de lo debido, por tanto, el costo de falta de productividad, se estipula como la suma entre el salario de día de los dos operarios y el valor de 5 und de materia prima almacenada, que equivalen a la cantidad máxima de piezas que se pueden producir por día, y, por ende, el número máximo de consumo diario. Cabe aclarar que el costo de almacenamiento para efectos prácticos es igual al costo unitario de la materia prima (\$500/und).

$$c_{fp} = (26.000 [\$/\text{día}] * 2) + (500 [\$/und] * 5 [\text{und}/\text{día}])$$

$$c_{fp} \cong 54.500 [\$/\text{día}] \quad (21)$$

Finalmente, el costo de mantenimiento se hace igual al salario mínimo diario de un operario y el precio de venta equivale al 120% de la suma de los costos de producción e inspección. Estos costos se resumen en la tabla 12.

Tabla 12 Costos unitarios del caso de estudio

Variable	Valor
c_p	10.900 [\$/und]
c_{rep}	5.700 [\$/und]
c_s	2.600 [\$/und]
c_{ins}	7.800 [\$/und]
c_{fp}	35.000 [\$/día]
c_{Mc}	26.000 [\$/mantenimiento]
π	22.440 [\$/und]

Fuente: Elaboración propia.

8.2. Desarrollo y resultados

Una vez establecidos los parámetros iniciales del modelo, y considerando un periodo arbitrario de doscientos (200) días como el tiempo de funcionamiento del sistema productivo (tiempo de proceso), se determina que para realizar un análisis que permita evaluar los costos ocultos operativos como consecuencia de la obsolescencia de la maquinaria y su efecto en las utilidades, se debe identificar una variable que permita visualizar el efecto del desgaste de las máquinas en el funcionamiento del sistema y, por ende, en los costos operativos, tanto ocultos como visibles. Teniendo en cuenta esto, se determina como parámetro a variar la tasa desgaste de cada máquina en cuatro escenarios diferentes (Tabla 13).

El marco de muestreo utilizado para la determinación del tamaño de una muestra y por tanto, la forma de seleccionarla, constituyen pilares fundamentales para la validez externa de una investigación (Klinger Angarita, 2005), y es por esto que para determinar el número total de corridas del modelo, se aplicó el método de muestreo de dos pasos de Cox (Estimation by Double Sampling), el cual de manera sencilla permite determinar el número de veces que debe realizarse una prueba para obtener la variabilidad esperada. Siguiendo la metodología explicada por Cox, se elige inicialmente un tamaño de muestra inicial aleatorio (por ejemplo 20 réplicas) y una variable de interés, la cual en este caso es la edad de la máquina. A dicha variable se le calcula la varianza, y un resumen del comportamiento de la variable en la muestra inicial se observa en la tabla 13. Acto seguido, se procede a calcular el valor de referencia nuevo, conocido como m con la ecuación 22, para la cual v es el valor esperado de varianza de los datos.

$$m = \frac{S^2}{v} \left(1 + \frac{2}{n1} \right) \quad (22)$$

Tabla 13 Edad de las máquinas en las corridas de muestra inicial.

Corrida	Edad M1	Edad M2
1	(472)	(470)
2	(447)	(446)
3	(410)	(410)
4	(447)	(446)
5	(410)	(410)
6	(447)	(446)
7	(410)	(410)
8	(447)	(446)
9	(410)	(410)
10	(447)	(446)
11	(447)	(446)
12	(410)	(410)
13	(447)	(446)
14	(410)	(410)
15	(447)	(446)
16	(410)	(410)
17	(447)	(446)
18	(410)	(410)
19	(410)	(410)
20	(447)	(446)

Fuente: Elaboración propia.

Al ser un método nuevo y con el fin de probar la máxima varianza que por confiabilidad deberían tener los datos, se elige un valor de 15 para v de ambas edades de las máquinas. Obteniendo para cada máquina respectivamente valores de m iguales a 32 y a 30, se procede a realizar la corrida por el máximo entre ambos, obteniendo finalmente el número de corridas n :

Tabla 14 Determinación de n para la simulación

	Edad M1	Edad M2
Media muestral	(432)	(431)
Varianza muestral	441	412
Valor esperado de varianza	15	15
m	32	30
n	32	

Fuente: Elaboración propia.

Este valor de n implica que las conclusiones de cada escenario se deben asociar al comportamiento promedio de $n=32$ corridas, y la Tabla 15 muestra los resultados de la tasa de desgaste por escenario.

Tabla 15 Tasa de desgaste en los escenarios planteados.

Escenario	Tasa de desgaste [φ]
1	0,4
2	0,6
3	0,8
4	1

Fuente: Elaboración propia.

Con los resultados de la simulación de estos cuatro escenarios se puede observar la influencia del desgaste del sistema, entendiéndose este, como la suma del desgaste máximo en la máquina 1 y en la máquina 2, debido a que a medida que el desgaste total aumenta, los costos operativos tanto como ocultos como visibles, incrementan considerablemente, tal como se muestra en la gráfica 1.

Cabe resaltar que los datos en los que se basaron las siguientes gráficas se encuentran plasmados en la sección de Anexos.

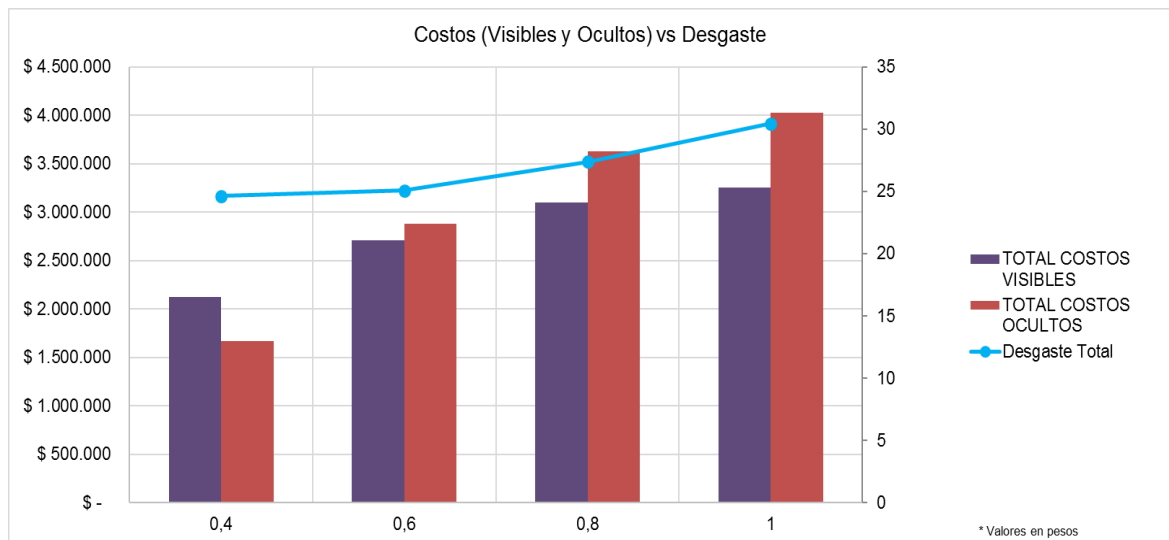


Gráfico 1 Costos vs desgaste del sistema

Adicionalmente, es importante tener en cuenta, que en un sistema de manufactura el incremento de costos puede ocasionar una pérdida en la utilidad de la empresa, debido a que los ingresos pueden no ser suficientes para cubrir la totalidad de los costos en los que se debe incurrir para garantizar el funcionamiento del sistema. Esto sucede para el caso de estudio propuesto en este trabajo, debido a que los ingresos por venta no son tan altos para cubrir los costos totales, es decir, costos ocultos y visibles. (Grafica 2)

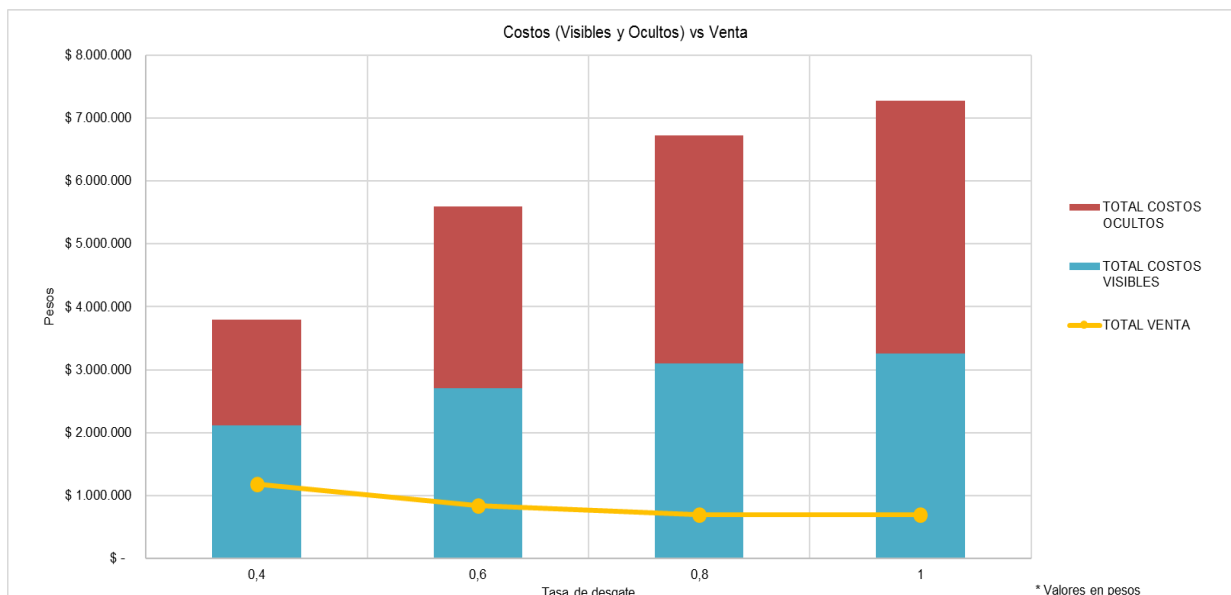


Gráfico 2 Costos vs Venta

Parámetro tasa desgaste (td)		0,4	0,6	0,8	1
	COSTO UNIT.	COSTO TOTAL	COSTO TOTAL	COSTO TOTAL	COSTO TOTAL
Costo producción	\$ 10.900	\$ 890.053	\$ 789.909	\$ 739.156	\$ 667.284
Costo inspeccion	\$ 7.800	\$ 629.119	\$ 563.550	\$ 521.138	\$ 473.606
Costo mantenimiento	\$ 26.000	\$ 601.250	\$ 1.352.000	\$ 1.837.875	\$ 2.110.063
TOTAL COSTOS VISIBLES		\$ 2.120.422	\$ 2.705.459	\$ 3.098.169	\$ 3.250.953
Costo reproceso	\$ 5.700	\$ -	\$ 2.316	\$ -	\$ -
Costo clasificacion	\$ 2.600	\$ 71.906	\$ 90.513	\$ 92.219	\$ 76.375
Costo improductividad	\$ 35.000	\$ 1.552.480	\$ 2.721.490	\$ 3.499.658	\$ 3.918.148
Costo rechazo	\$ 22.440	\$ 44.880	\$ 67.320	\$ 34.361	\$ 32.959
TOTAL COSTOS OCULTOS		\$ 1.669.266	\$ 2.881.638	\$ 3.626.238	\$ 4.027.482
Precio venta	\$ 22.440	\$ 1.189.320	\$ 840.098	\$ 703.354	\$ 703.354
TOTAL VENTA		\$ 1.189.320	\$ 840.098	\$ 703.354	\$ 703.354
UTILIDAD		-\$ 2.600.368	-\$ 4.747.000	-\$ 6.021.053	-\$ 6.575.082

Tabla 16 Costos, venta y utilidad en cada escenario.

Sin embargo, al evaluar estos costos y sus efectos en la utilidad de la empresa, es necesario analizar la razón por la cual se están generando e incrementando dichos costos, para esto es importante mencionar los inductores de costos y el efecto de la obsolescencia sobre estos.

Tomando en cuenta esto y analizando los cuatro escenarios propuestos se puede identificar el efecto del desgaste en las máquinas sobre la edad de las mismas y la probabilidad de fallas, que al aumentar la tasa de desgaste de un valor de 0,4 (gráfica 3 y 4) a un valor, como por ejemplo, 0,8 se puede observar como la probabilidad de falla se vuelve más errática (Gráfica 5 y 6), debido a que esta toma valores de cero cuando la máquina se encuentra en mantenimiento, por lo que se puede inferir que a mayor desgaste, es decir, mayor obsolescencia son más los mantenimientos para reparar las fallas que se deben realizar.

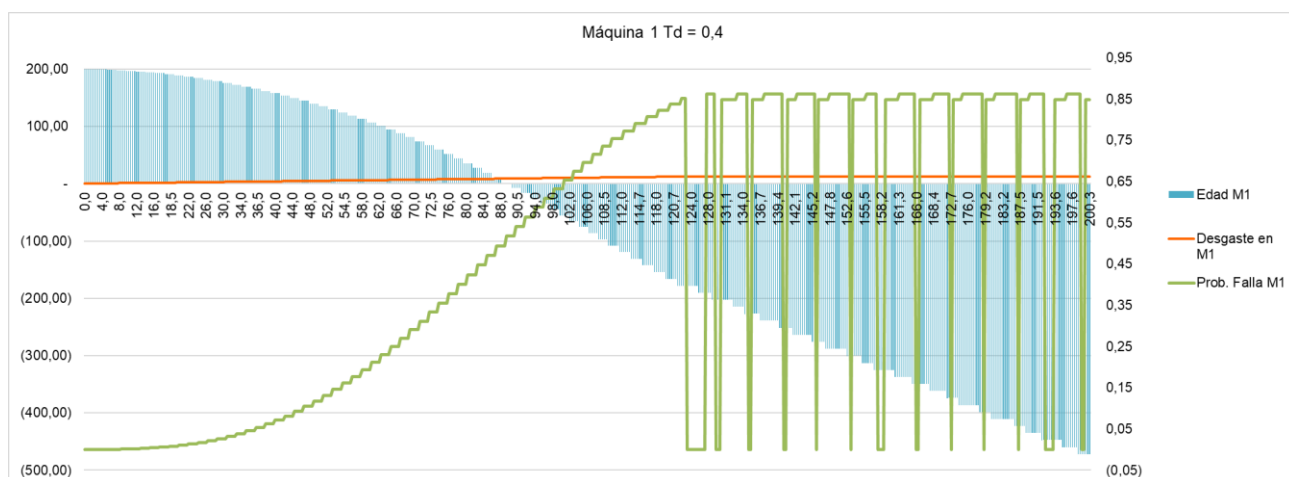


Gráfico 3 Probabilidad de falla de la máquina 1 de acuerdo a su edad (con tasa de desgaste igual a 0,4)

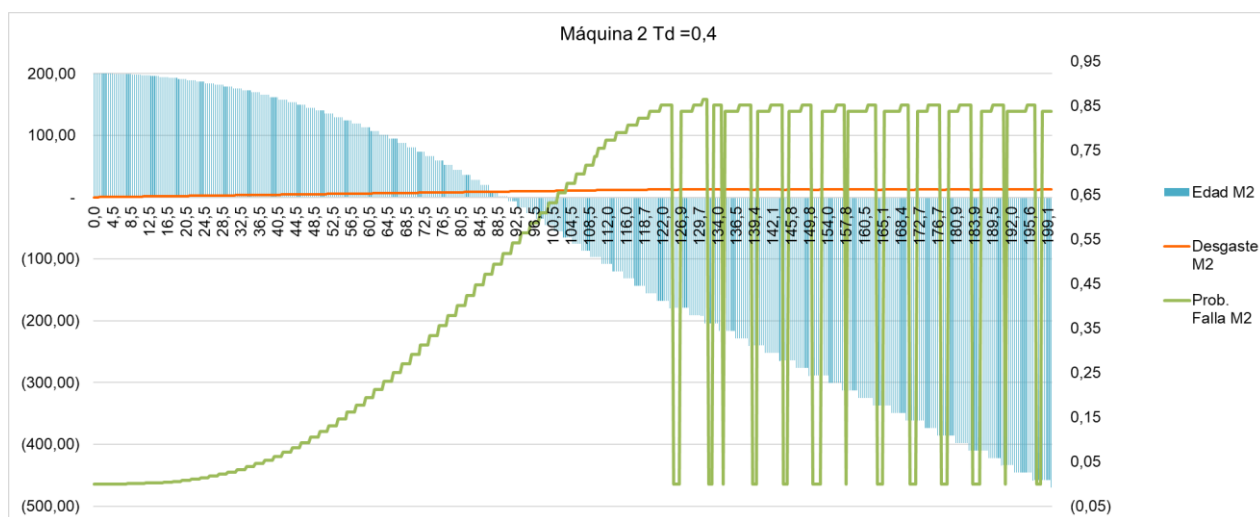


Gráfico 4 Probabilidad de falla de la máquina 2 de acuerdo a su edad (con tasa de desgaste igual a 0,4)

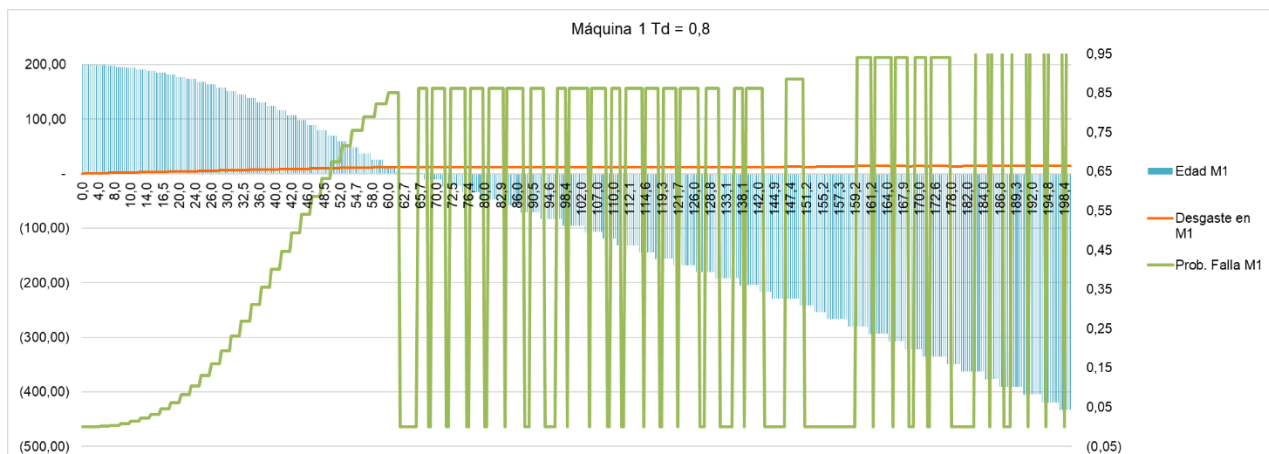


Gráfico 5 Probabilidad de falla de la máquina 1 de acuerdo a su edad (con tasa de desgaste igual a 0,8)



Gráfico 6 Probabilidad de falla de la máquina 2 de acuerdo a su edad (con tasa de desgaste igual a 0,8)

Ahora bien, el hecho del incremento en los mantenimientos, conlleva a que los costos visibles sean mayores, debido a la cantidad de reparaciones que deben ser realizadas, y en cuanto los costos ocultos operativos, estos incrementan debido al tiempo improductivo que la máquina permanece detenida debido a las reparaciones. (Gráfica 7).

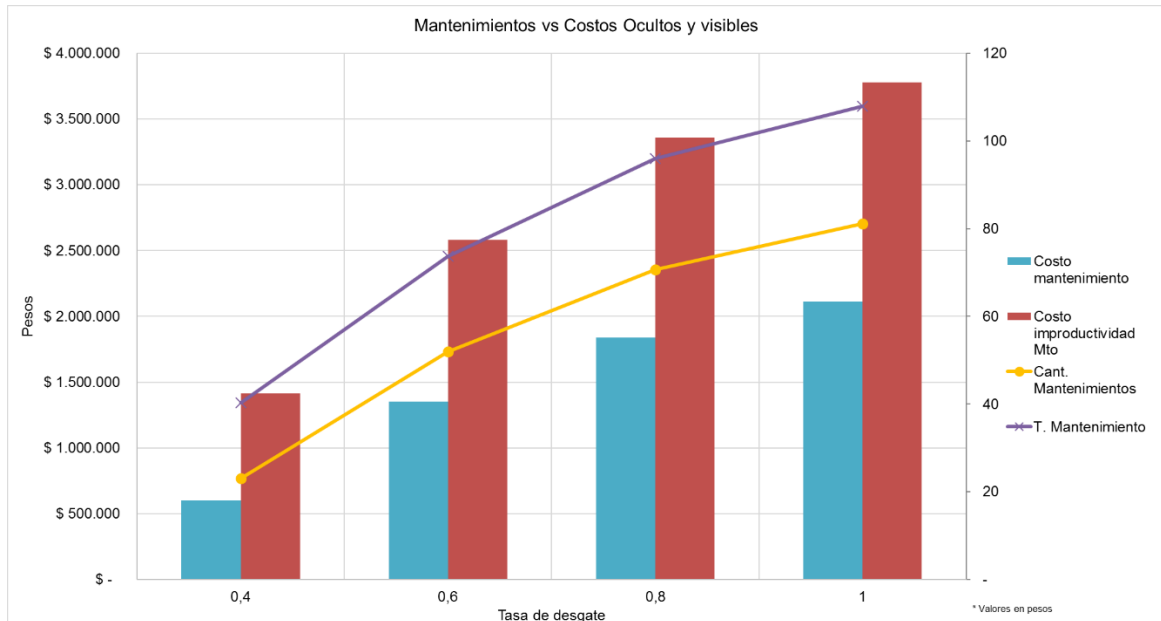


Gráfico 7 Costos ocultos y visibles relacionados con la cantidad de mantenimientos

Además de la inactividad, se debe considerar el efecto que tiene una falla tipo I en la máquina 1 sobre la máquina 2, debido a que el sistema está compuesto por dos máquinas en serie, y procesar una pieza en la máquina 2 que tiene defectos debido a fallas presentadas en la máquina 1, implica un desgaste mayor en la segunda máquina, y a medida que la obsolescencia en la máquina 1 aumente, sus probabilidades de presentar una falla tipo I son mayores, por ende el desgaste de la máquina 2 incrementa a un ritmo mayor. (Gráfica 8)

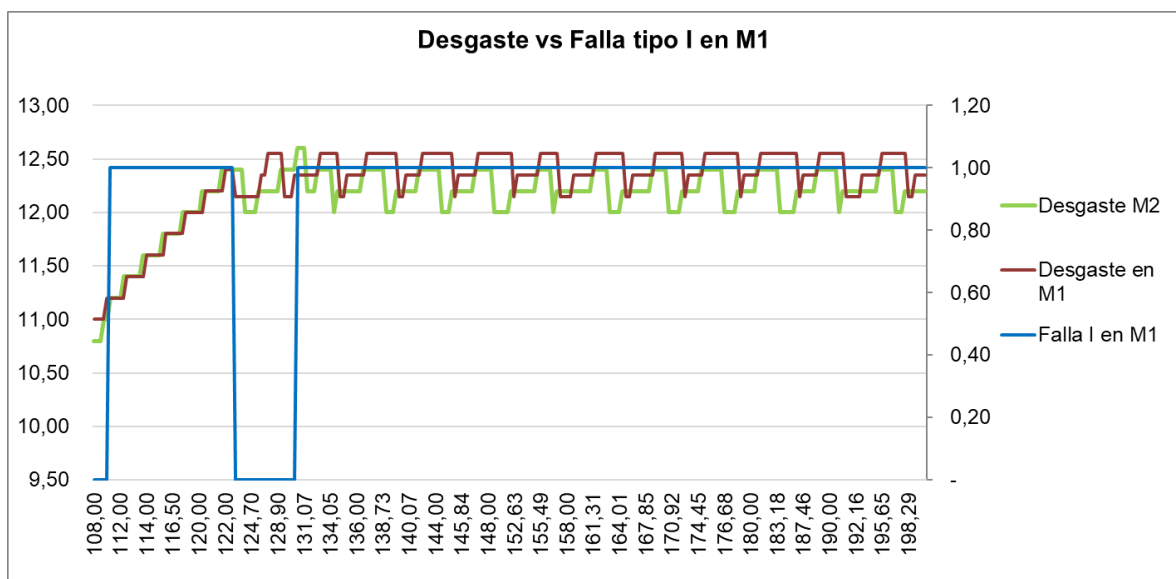


Gráfico 8 Desgaste vs falla tipo 1 de la máquina 1

Adicionalmente, al tener mayor desgaste en la máquina 2 la probabilidad de ocurrencia de una falla tipo II en esta máquina se incrementa, generando que se presenten mayores paradas de producción como consecuencia de los mantenimientos, puesto que, al ser un sistema en serie, si la segunda máquina no se encuentra disponible para recibir producto, entonces, la primera máquina se detiene hasta que la máquina 2 vuelva estar lista para recibir producto. (Gráfica 9 y 10). Esto conlleva entonces a que el total piezas procesadas se reduzca en cada escenario, lo que significa menos productos para la venta, es decir, menos ingresos.

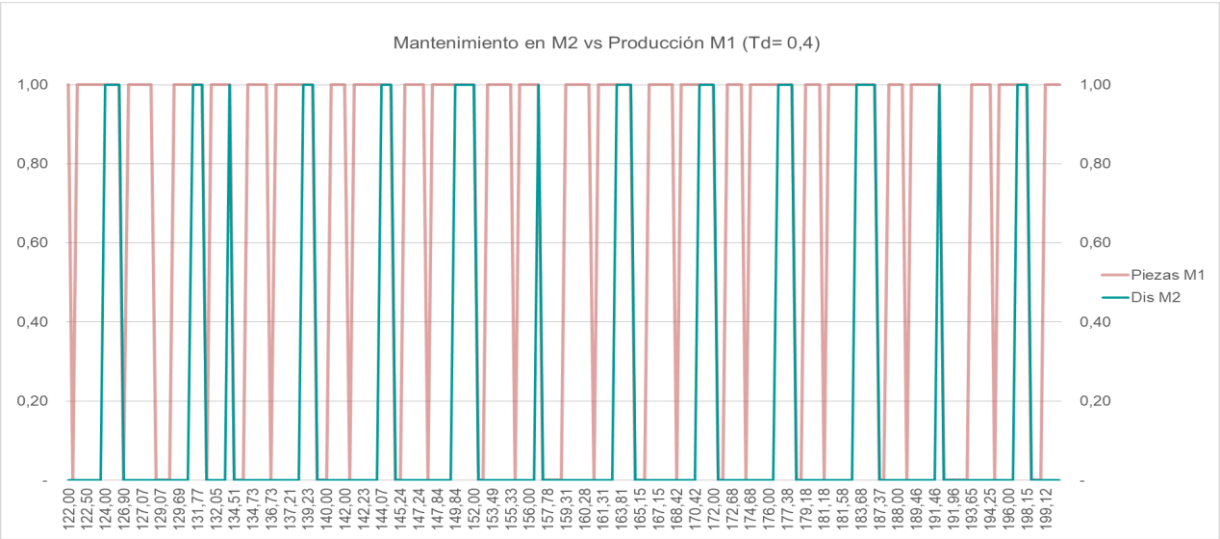


Gráfico 9 Relación entre el mantenimiento de la máquina 2 y la producción de la máquina 1 con una tasa de desgaste de 0,4

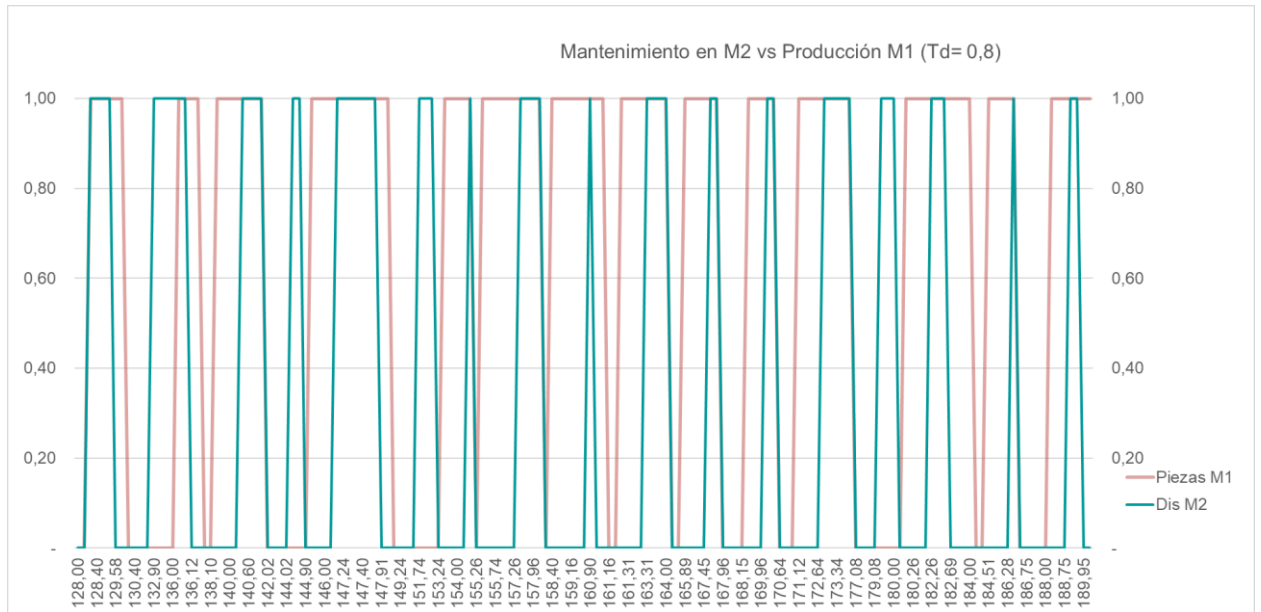


Gráfico 10 Relación entre el mantenimiento de la máquina 2 y la producción de la máquina 1 con una tasa de desgaste de 0,8

Sin embargo, la reducción de producto apto para venta, no solo se ve afectada por la reducción en producción, sino que el incremento en la falla tipo I en ambas máquinas ocasiona que se deban clasificar productos en reproceso, rechazo o buenos, con llevando un represamiento de producto en este proceso y una disminución del producto terminado debido a los rechazos y reprocesos que se deben realizar, esto genera una gran diferencia entre la cantidad de piezas producidas versus el producto apto para venta (Gráfica 10), con llevando entonces, a que los ingresos por ventas en ciertos niveles de desgaste no puedan cubrir los costos de producción (Gráfica 11)

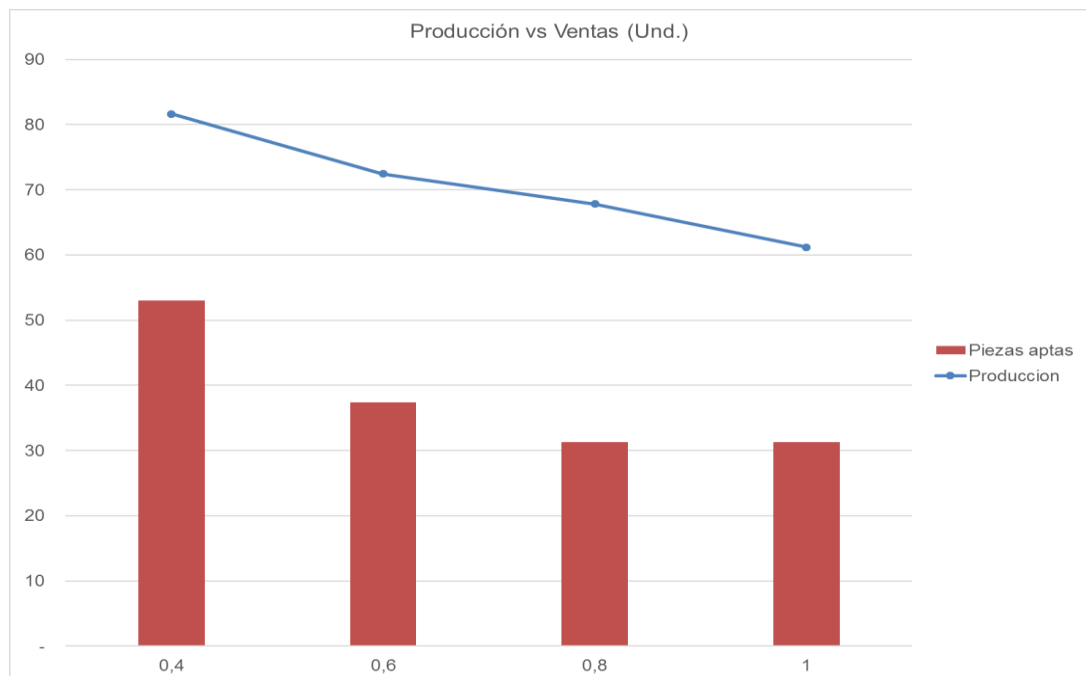


Gráfico 11 Producción vs ventas (en unidades)

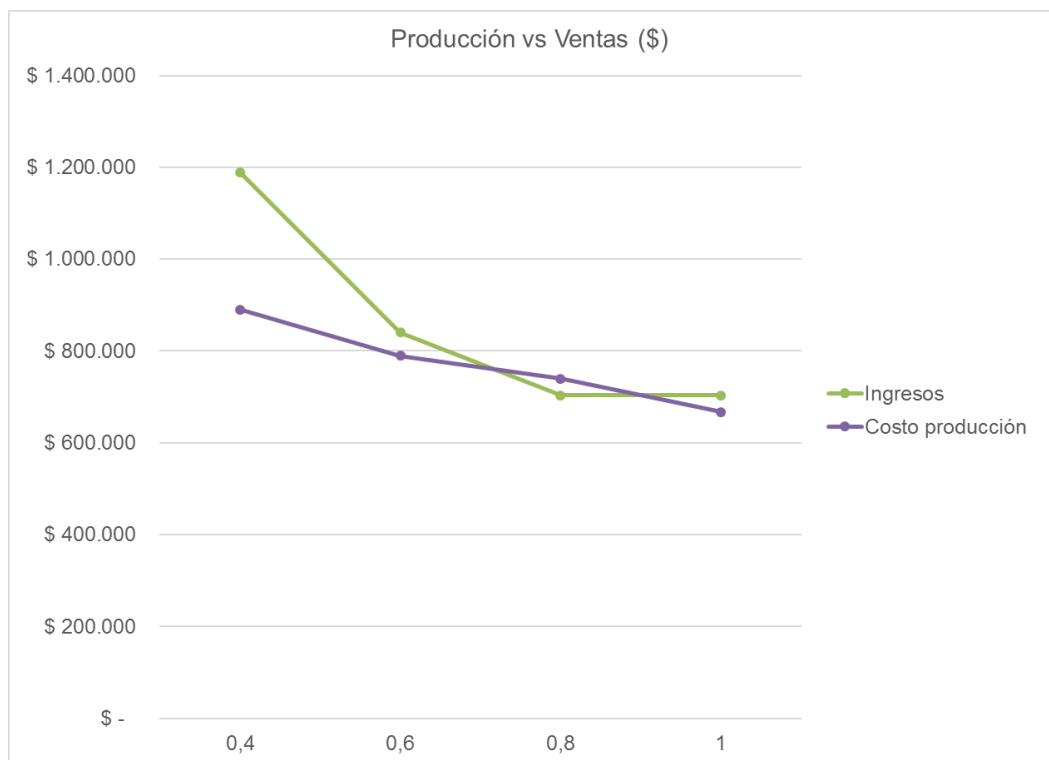


Gráfico 12 Producción vs ventas (en valores monetarios)

Finalmente, dentro de los costos ocultos operativos, también se debe tener en cuenta el tiempo y la cantidad de reprocesos (Grafico 12) , que, aunque las máquinas estén funcionando, su productividad disminuye debido a que no generan producto nuevo, ni consumen materia prima, ocasionando que los niveles de inventario puedan incrementarse, no obstante, este es un costo que no se considera en este trabajo, debido a que no es un costo oculto operativo los cuales son el enfoque principal de este estudio. Y junto con los costos de reproceso se debe, tener presente, el costo oculto por los productos que son rechazados y por el tiempo dedicado a la clasificación de estos productos. (Gráficas 13 y 14)

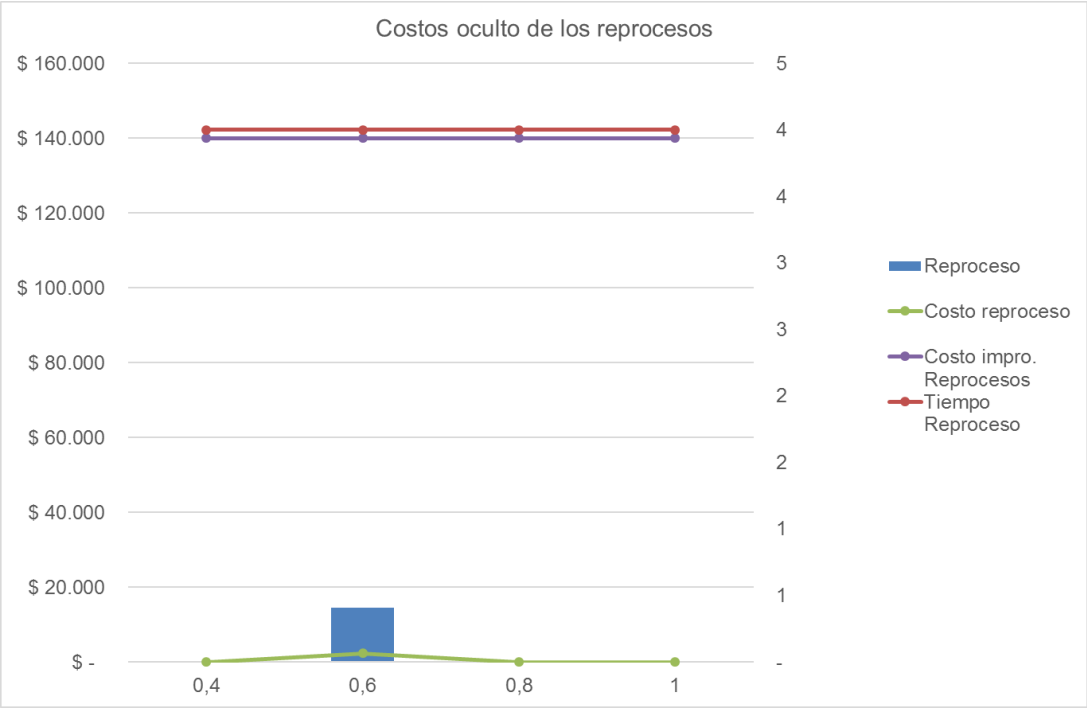


Gráfico 13 Costo oculto asociado a los reprocesos de piezas

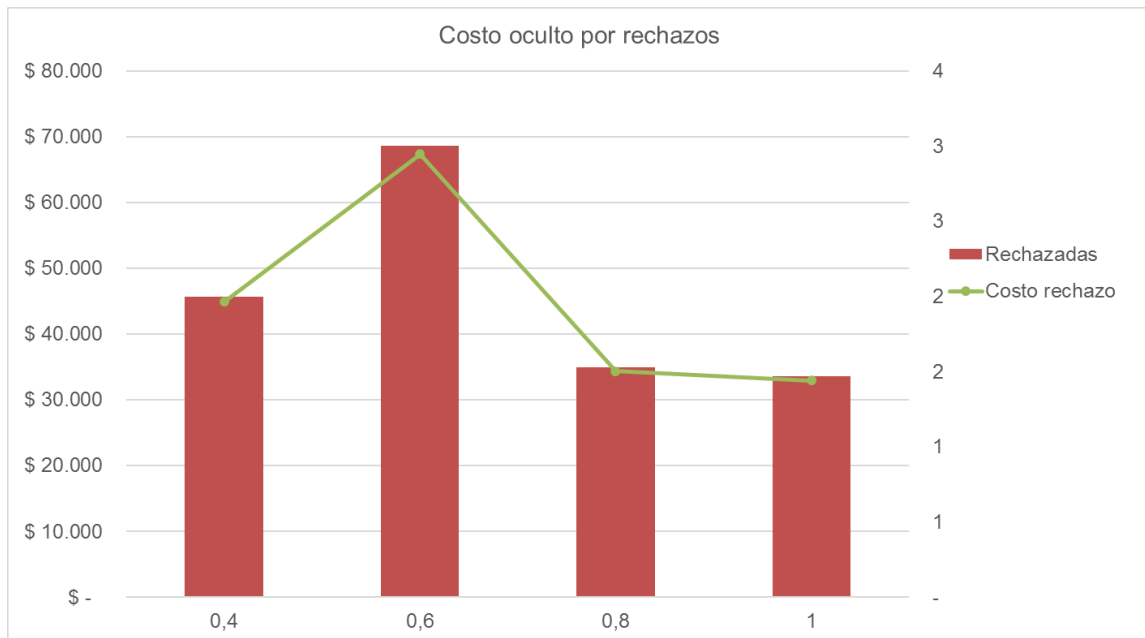


Gráfico 14 Costo oculto asociado a la cantidad de piezas rechazadas por calidad no adecuada

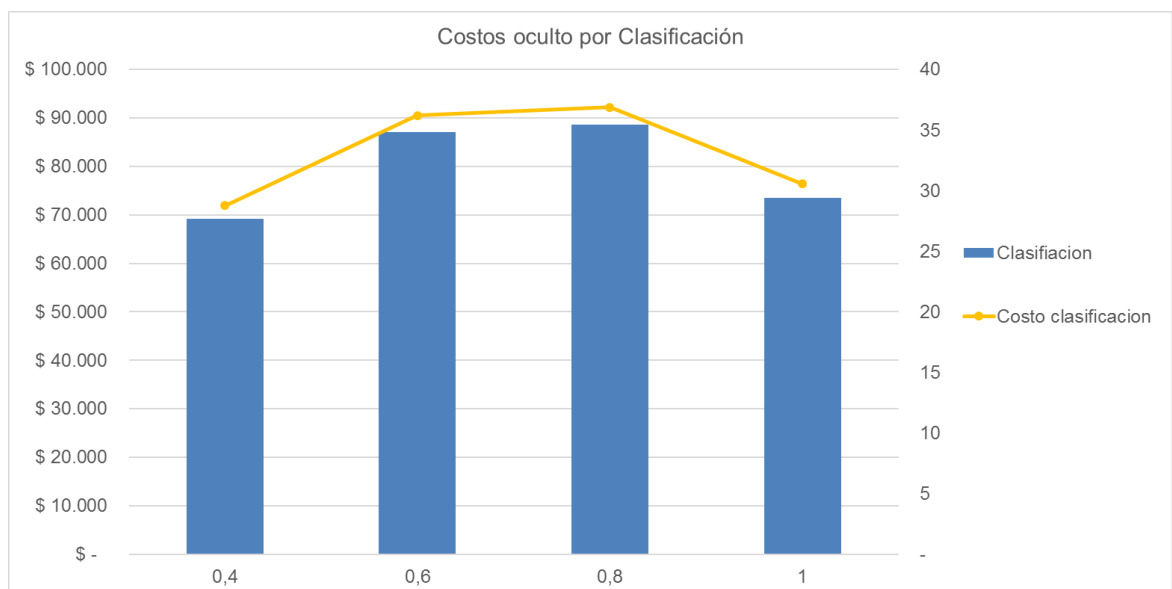


Gráfico 15 Costo oculto asociado a la clasificación de piezas por falla tipo 1

CONCLUSIONES

- a) Los disfuncionamientos de un sistema de manufactura y las acciones que se deben poner en marcha para contrarrestar los efectos de estos disfuncionamientos generan inductores de costos tanto visibles como ocultos, usualmente estos últimos no identificados en las actividades de manufactura diarias. Ejemplo de estos inductores de costos ocultos son el costo del tiempo de parada de la maquinaria, las inspecciones para clasificar las unidades adecuadas de las defectuosas, el tiempo dedicado a reprocesos y que se pudiera dedicar a producción de piezas directamente para la venta, y el desecho mismo de aquellas unidades que no se pueden siquiera reprocesar. Poder conocer dichos inductores implica un análisis del proceso de producción y de las interrelaciones entre las partes del sistema como tal, lo cual facilita el planteamiento de acciones de mejoramiento en los puntos más clave del mismo y un apalancamiento en cuanto a las ventajas de la aplicación de mejoras.
- b) La herramienta de simulación más adecuada de acuerdo a la revisión de la literatura y las necesidades del sistema caso de estudio es la simulación discreta por medio de Redes de Petri, ya que involucra la aparición de fallas con base en una función de probabilidad y la realización de mantenimientos, de igual manera la dinámica del tiempo y su influencia en las variables principales como la edad y el desgaste de las máquinas. La red permite visualizar los cambios en el sistema debido a eventos basados en distribuciones de probabilidad en instantes de tiempo determinados. El uso de esta herramienta permite conocer e interiorizar el comportamiento del modelo, al plasmar los eventos y sus consecuencias directas en un grafo que muestra las relaciones entre eventos y “dinamiza” el sistema por medio de los tokens en movimiento.
- c) La viabilidad de la realización de la simulación radica en la posibilidad de la herramienta de mostrar adecuadamente los elementos relacionados con obsolescencia de equipos y su influencia en los costos de una organización por medio de un sistema sencillo. Como se pudo observar en el capítulo anterior, el factor desgaste se comporta de manera lineal creciente a medida que transcurre el tiempo, y los elementos de probabilidad funcionaron adecuadamente, mostrando también la interacción entre dichas probabilidades con el resultado final de la simulación (tanto en unidades producidas, reprocesadas, desechadas, etc; como en valores monetarios). Es viable también la herramienta en cuanto a la facilidad que brinda al lector para comprender los eventos y sus consecuencias directas, facilitando y acotando las opciones de mejora a aplicar para un mejor desempeño o resultado en el sistema completo.
- d) El cálculo de los costos ocultos operativos de un sistema de manufactura que se encuentra bajo obsolescencia por medio de una herramienta de simulación como las redes de Petri, permite analizar y evaluar de manera sencilla los impactos de mantener dentro de un proceso de producción

maquinaria obsoleta, demostrando que el desgaste del equipo influye directamente en la pérdida de la utilidad, debido al aumento de los costos, en especial, los costos ocultos, debido a factores como la parada de máquinas y el rechazo de productos que tienen un impacto tanto en la continuidad y eficiencia de la producción como en los estados financieros de una empresa. Adicionalmente, comparar diferentes escenarios de desgaste permite identificar los inductores más susceptibles, en este caso los mantenimientos, a este problema, brindando un punto de partida para la toma de decisiones que permitan disminuir los costos y mejorar la eficiencia del sistema". Este análisis de las implicaciones de los costos ocultos por obsolescencia da pie al inicio de nuevos estudios continuados en cuanto a aspectos de políticas y tipos de mantenimiento, para lograr el método más adecuado en cuanto a costos y efectividad de los mismos, utilización de búferes intermedios que permitan mantener la continuidad de la producción y mejorar la eficiencia de los procesos.

BIBLIOGRAFÍA

- Agudelo Lozano , C., & Arias Valencia, J. (2010). Metodología para el análisis de reemplazo y asignación de recursos informáticos en una institución pública bjo estrictión presupuestaria. *xvi international conference on industrial engineering and operations management*. Brasil.
- Aguilar Otero , J., Torres Arcique, R., & Magaña Jiménez, D. (2010). Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC) para la planeación del mantenimiento empleando criterios de riesgo y confiabilidad. *Tecnología, Ciencia, Educación*, 10, 15-26.
- Ahmadi, R., & Fouladirad, M. (2017). Maintenance planning for a deteriorating production process. *Reliability Engineering & System Safety*, 159, 108-118.
- Al- Salamah, M. (2018). Economic production quantity with the presence of imperfect quality and random machine breakdown and repair based on teh artificial bee colony heuristic. *Applied Mathematical Modelling*, 63, 63-83.
- Álvarez Pomar, L., & Centeno, M. (2015). *Introducción a la simulación discreta* (Primera ed.). Bogotá: UD Editorial.
- Amorim-Melo, P., Shehab, E., Kirkwood, L., & Baguley, P. (2014). Cost drivers of integrated maintenance in high-value systems. *Procedia CIRP*, 152- 156.
- Azofeifa, C. E. (2004). Aplicación de la simulación Monte Carlo en el cálculo del riesgo usando Excel. . *Tecnología en marcha*, 97-109.
- Beheshti, H., Nourelfath, M., & Gendreau, M. (2018). Integrating production, maintenance and quality: A multi-period multi-product profit-maximization model. *Reliability Engineering & System Safety*, 170, 191-202.
- Berger Vidal , E., Olazo, C., & Oré Lujan, j. (2003). Problemas de reemplazo: Enfoques de investigación y economía. *Pesquimat*, 49 - 60.
- Berrocal Huerta, R. (2013). *Impacto de los costos ocultos en el área de manufactura de la empresa Assa Abloy México S.A de C.V.* México: Instituto Politécnico nacional.
- Bhurisith, I., & Touran, A. (2002). Case Study of Obsolescence and Equipment Productivity. *Journal of construction engineering and management*, 357 - 361.
- Borgonovo, E., Marseguerra, M., & Zio, E. (1999). A Monte Carlo methodological approach to plant availability modeling with maintenance, aging and obsolescence. *Reliability Engineering and System Safety*, 61–73.

- Boulash, B., Gharbi, A., & Pellerin, R. (2018). Joint production, quality and maintenance control of a two- machine line subject to operation- depend and quality- dependent failures. *International Journal of production economics*, 195, 201-226.
- Bouslah, B., Gharbi, A., & Pellerin, R. (2016). Integrated production, sampling quality control and maintenance of deteriorating production system with AOQL constraint. *Omega*, 110-126.
- Cantillo Maza, V. (1998). Reemplazo económico de los equipos. *Ingeniería & Desarrollo*, 58-63.
- Cheng, G., Zhou, B. H., & Li, L. (2018). Integrated production, quality control and condition- based maintenance for imperfect production systems. *Reliability Engineering and System Safety*, 251 -264.
- Clavareau, J., & Labeau, P.-E. (2009). Maintenance and replacement policies under technological obsolescence. *Reliability Engineering and System Safety*, 370-381.
- Cox, D. (1952). Estimation by Double Sampling. *Biometrika*, 39, 217-227. Obtenido de <http://www.jstor.org/stable/2334018>
- Dellagi, S., Chelbi, A., & Trabelsi, W. (2017). Joint integrated production-maintenance policy with production plan smoothing through production rate control. *Journal of Manufacturing Systems*, 42, 262-270.
- Diallo, S., Gore, R., Padilla, J., & Lynch, C. (2015). An overview of modeling and simulation using content analysis. *Scientometrics*, 977-1002.
- Ekin, T. (2018). Integrated maintenance and production planning with endogenous uncertain yield. *Reliability Engineering & System Safety*, 179, 52 - 61.
- Eraso Guerrero, O. (2008). *Procesos de manufactura*. Bogotá: Universidad nacional abierta y a distancia .
- Espinosa, F., Salinas, G., & Leiva, P. (2011). Jerarquización del Reemplazo de Equipos productivos de acuerdo a su nivel de cumplimiento de los objetivos de la empresa. *Información tecnológica*, 97 - 106.
- Fakher, H. B., Nourelfath, M., & Gendreau, M. (2018). Integrating production, maintenance and quality: A multi-period, multi-product profit- maximization model. *Realiability Engineering and system safety*, 191-201.
- Fitouhi, M.-C., Nourelfath, M., & Gershwini, S. (2017). Performance evaluation of a two-machine line with a finite buffer and condition- based maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*, 166, 61-72.
- Flores Preciado, J., & Pérez Cruz, O. (2006). Los costos de no calidad en las pequeñas y medianas empresas. *Contabilidad y Auditoría*, 86 -111.
- Franco Silva, O. (2017). *Análisis de costos ocultos mediante método socioeconómico de una empresa Pyme en el estado de Aguascalientes*. Aguascalientes: Unversidad autónoma de Aguascalientes.

- Gacía Garrido , S. (2010). *Organización y gestión integral de mantenimiento*. Madrid: Edición Días de Santos S.A.
- García Sánchez, A., & Ortega Mier, M. (2006). *Introducción a la simulación de sistemas discretos*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- García, E., & Azarang, M. (1996). Simulación. *Simulación y análisis de modelos estocásticos*. México: Mc. Graw Hill.
- González Cano, M., Mendoza Austira, F., & Vargas Vega, T. (2011). *Disfuncionamientos en Pymes que evidencian la falta de planeación. Caso: Pequeña empresa de sector metalmecánico*. México: Universidad autónoma del estado de Hidalgo.
- Gouiaa-Mtibaa, A., Dellagi, S., Achour , Z., & Erray, W. (2016). Integrated Maintenance-Quality strategies with reworking activities. *IFAC PapersOnLine*, (págs. 061-066). France.
- Gouiaa-Mtibaa, A., Dellagi, S., Achour, Z., & Erray, W. (2016). Development of Integrated Maintenance-Quality Policy according to imperfect quality item produced. *IFAC- PapersOnLine*, 49, 1400-1405.
- Gouiaa-Mtibaa, A., Dellagi, S., Achour, Z., & Erray, W. (2018). Integrated Maintenance-Quality policy with rework process under improved imperfect preventive maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*, 173, 1-11.
- Guasch, A., Piera, M. A., Casanovas, J., & Figueras, J. (2005). *Modelado y simulación, Aplicación a procesos logísticos de fabricación y servicios* (Primera ed.). D.F, México: Alfaomega grupo editor, S.A de C.V.
- Hanse, D., & Mowen, M. (2007). *Administración de costos: Contabilidad y control* (Quinta ed.). México: Cengage Learning.
- Hasting, N. (2015). Equipment Replacement Decisions. *Physical Asset Management*, 463 -480.
- Horngren, C., Datar, S., & Rajan , M. (2012). *Contabilidad de Costos un Enfoque Gerencial* (Decimocuarta ed.). México: Pearson Education.
- Jiménez Lemus, W. (2010). *Contabilidad de costos*. Bogotá: Fundación para la educación superior San Mateo.
- Kang , K., & Subramaniam, V. (2018). Integrated control policy of production and preventive maintenance for a deteriorating manufacturing system. *Computers & Industrial Engineering*, 118, 266-277.
- Kendall, K., Mangin, C., & Ortiz, E. (1998). Discrete event simulation and cost analysis for manufacturing optimisation of an automotive LCM component. *Composites Part A*, 711-720.
- Klinger Angarita, R. A. (2005). Factores que determinan el tamaño de una muestra. Un análisis de su sensibilidad a través del estimador de la media poblacional en el Muestreo Aleatorio Simple (MAS). *Heurística*, 38- 45.
- Obtenido de

<http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/6171/1/Heuristica12-A05.PDF>

- Lam, J. J., & Banjevic, D. (2015). A myopic policy for optimal inspection scheduling for condition based maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*, 144, 1 - 11.
- Lee, S., & Ni, J. (2013). Joint decision making for maintenance and production scheduling of production systems. *Int J Adv Manuf Technol*, 1135–1146.
- Mejía Ospina, L., Arroyave Contreras, O., & González Bernal, R. (2016). Análisis de las variables críticas de un sistema productivo a través de la Dinámica de Sistemas. *Scientia et Technica*, 135-143.
- Ministerio de Planificación de Chile. (2005). *Metodología de preparación y evaluación de proyectos de reemplazo*. Chile: Ministerio de planificación.
- Ministerio de Planificación y Cooperación. (2015). *Metodología Proyectos de Reemplazo de Equipos*. Perú: Instituto de mejora continua.
- Mohammadi, B., Taleizadeh, A., Noorossana, R., & Noorossana, H. (2015). Optimizing integrated manufacturing and products inspection policy for deteriorating manufacturing system with imperfect inspection. *Journal of Manufacturing Systems*, 37, 299-315.
- N' Guess, N. K. (2013). *Analyse des coûts caches au centre hospitalier et universitaire (chu) de cocody (Côte d'ivoire)*. Francia: Centre africain d'Estudes supérieures en Gestion.
- Negahban, A., & Smith, J. (2014). Simulation for manufacturing system design and operation: Literature review and analysis. *Journal of manufacturing systems*, 33, 241-261.
- Ouaret, S., Kenné, J.-P., & Gharbi, A. (2018). Production and replacement polices for a deteriorating manufacturing system under random demand and quality. *European Journal of Operational Research*, 623-636.
- Pasandideh, S. H., Niaki, S. A., Nobil, A. H., & Càrdenas Barròn, L. E. (2015). A multiproduct single machine economic production quantity model for an imperfect production system under warehouse construction cost. *Int. J. Production Economics*, 203.
- Peña González, Y. (2014). *El análisis y control de costos ocultos como herramienta para gestión estratégica de las organizaciones*. Bogotá: Universidad Nacional.
- Peralta Olvera, V., Vargas Vega, T., & Villegas González, E. (2014). *Análisis de costos ocultos en una Pyme del sector metalmecánico en el estado de Hidalgo*. México: Universidad autónoma del estado de Hidalgo.
- Rebolledo Noriega, J. E., Duque Gallego, C. A., Velasco, B. A., & Ángel López, L. (2013). Perfil del sector manufacturero Colombiano. *Magazin Empresarial*, 9, 49-61.

- Sandborn, P. (2013). Design for obsolescence risk management. *2nd International Through-life Engineering Services Conference*, (págs. 15-22).
- Savall, H. (2006). *Aspectos generales del modelo de gestión socioeconómica de organizaciones*. Francia: ISEOR.
- Sierra Álvarez, G. A. (2004). *Programa de mantenimiento preventivo para la empresa metalmecánica industria AVM S.A.* Santander: Universidad Industrial de Santander.
- Sinisterra Valencia, G. (2006). *Contabilidad de Costos*. Bogotá : Ecoediciones.
- Taleizadeha, A. A., Jalali-Nainib, S. G., Weec, H. M., & Kuo, T. c. (2013). An imperfect multi-product production system with rework. *Scientia Iranica*, 20, 811-823.
- Tarifa, E. (2005). *Teoría de Modelos y Simulación. Indtroducción a la simulación*. Universidad Nacional del Jujuy, Buenos Aires. Obtenido de http://www.econ.unicen.edu.ar/attachments/1051_TecnicasII%20Simulacion.pdf
- Tsai, H.-N., Sheu, S.-H., & Zhang, Z. G. (2017). A trivariate optimal replacement policy for a deteriorating system based on cumulative damage and inspections. *Reliability Engineering and System Safety*, 74-88.
- Vargas, J., & Giraldo, J. (2014). Modelo de predicción de costos de servicios de salud soportado en simulación discreta. *Información tecnológica*.
- Viveros Folleco, A., González, G., & Rodríguez, R. (2004). Aproximación al reemplazo de equipo industrial. *Scenia et Technica Año X*.
- Yang, Z., Djurdjanovic, D., & Ni, J. (2007). Maintenance scheduling in manufacturing systems based on predicted machine degradation. *Springer Science+Business Media*.
- Yanga, L., Zhaoa, Y., Pengb, R., & Ma, X. (2018). Opportunistic maintenance of production systems subject to random wait time and multiple control limits. *Journal of Manufacturing Systems*, 47, 12-34.
- Zardet, V., & Krief, N. (2006). LA TEORÍA DE COSTOS- DESEMPEÑOS OCULTOS EN EL MODELO SOCIOECONÓMICO DE LAS ORGANIZACIONES. *Conferencia Magistral*.
- Zardet, V., Savall, H., & Bonnet, M. (2008). *Meorar los desempeños ocultos de las empresas a través de una gestión socioeconómica*. Francia: ISEOR.

ANEXOS

Anexo A Formulación del modelo de simulación en Visual Basic

```
'LLEGADA DE MATERIA PRIMA 1
If Y = T1 Then

P1 = P1 + 5
T1 = T1 + 2

End If
```

Ilustración 9 Condiciones de llegada de materia prima

```
'Calculo de la probabilidad de falla en cada máquina
If P6 = 0 Then ' Restricciones de mantenimiento
If P8 = 0 Then
PFM1 = (1 - Exp(-0.001 * P4 ^ 3))
Else
PFM1 = 0
End If
Else
PFM1 = 0
End If

If P11 = 0 Then
If P14 = 0 Then
PFM2 = (1 - Exp(-0.001 * P9 ^ 3))
Else
PFM2 = 0
End If
Else
PFM2 = 0
End If
```

Ilustración 10 Calculo de probabilidad de fallas

```

'Evaualacion de falla tipo II en M1 y mantenimiento

If P3 = 1 Then
If (PFM1 > 0.85 And PFM1 <= 1) Then ' FALLA TIPO II EN M1
T4 = Y
Else
T4 = 10000
End If
End If

If Y = T4 Then
P5 = 1
T5 = T4
T2 = 10000
T4 = 10000
End If

If Y = T5 Then
P6 = 1
P3 = 0
P5 = 0
T6 = T5 + ((-Log(1 - Rnd)) / 0.75)
TM1F2 = T6 - Y
P4 = P4 - (0.8 * g1)
E1 = E1 + (0.8 * g1)
T5 = 10000
End If

If Y = T6 Then
P6 = 0
P3 = 1
T6 = 10000
T2 = Y
End If

```

Ilustración 11 Evaluación de Falla tipo II en M1

```

'Evaluacion de falla tipo I en m1 y su mantenimiento

If P7 = 0 Then
If (PFM1 >= 0.75 And PFM1 <= 0.85) Then ' FALLA TIPO I EN M1
T7 = Y
D1 = 10 * (0.5 * PFM1)
P9 = P9 + 0.2
E2 = E2 - 0.2 ' desgaste de la maquina 2 por recibir defectuosos de m1
Else
T7 = 10000
End If
End If

If Y = T7 Then
P7 = 1
T7 = 10000
End If

If Y = T8 Then

P3 = 0
P7 = 0
P8 = 1
P4 = P4 - (0.5 * g1)
E1 = E1 + (0.5 * g1)
T9 = T8 + ((-Log(1 - Rnd)) / 0.25)
TMlF1 = T9 - Y
T8 = 10000
End If

If Y = T9 Then
P8 = 0
P3 = 1
T9 = 10000
End If

```

Ilustración 12 Evaluación de falla tipo I en M1

```

'PROCESO DE PRODUCCION DE M1

If (P1 >= 1 And P3 = 1 And P5 = 0) Then ' EVALUAR SI M1 PUEDE TRABAJAR
T2 = Y
Else
  T2 = 10000
End If

If Y = T2 Then

If P18AUX = 10 Then
P18AUX = 0
End If

P3 = 0
P2 = 1

If P21 = 0 Then 'REPROCESO DE PIEZAS
  P1 = P1 - 1
Else
  P21 = P21 - 1
  TR = (1 / g1) * 2
End If

P4 = P4 + (td * g1)
T3 = T2 + (1 / g1)
T3aux = T3

End If

```

Ilustración 13 Proceso de producción de M1

```

'Evaluacion de falla tipo II en M2

If P12 = 1 Then
If (PFM2 <= 1 And PFM2 > 0.85) Then ' FALLA TIPO II EN M2
T10 = Y
T3 = 10000 'quitar disponibilidad a la maquina
Else: T10 = 10000
End If
End If

If Y = T10 Then
P10 = 1
T11 = T10
T10 = 10000
End If

If Y = T11 Then 'Mantenimiento
P11 = 1
P12 = 0
P10 = 0
T12 = T11 + ((-Log(1 - Rnd)) / 0.75)
TM2F2 = T12 - Y
P9 = P9 - (0.8 * g2)
E2 = E2 + (0.8 * g2)
T11 = 10000
End If

If Y = T12 Then
P11 = 0
P12 = 1
T12 = 10000

If P3 = 0 Then 'volver a iniciar proceso
If T3aux < Y Then
T3 = Y
Else: T3 = T3aux
End If
End If
End If

```

Ilustración 14 Evaluación de falla tipo II en M2

```

'Evaluacion de falla tipo I en M2
|
If P13 = 0 Then
If (PFM2 <= 0.85 And PFM2 >= 0.75) Then ' FALLA TIPO I EN M2
T13 = Y
D2 = 10 * (0.5 * PFM2)
Else
T13 = 10000
End If
End If

If Y = T13 Then
P13 = 1
T13 = 10000
End If

If Y = T14 Then

P12 = 0
P13 = 0
P14 = 1
P9 = P9 - (0.5 * g2)
E2 = E2 + (0.5 * g2)
T15 = T14 + ((-Log(1 - Rnd)) / 0.25)
TM2F1 = T15 - Y
T14 = 10000
End If

If Y = T15 Then
P12 = 1
P14 = 0
T15 = 10000
End If

```

Ilustración 15 Evaluación de falla tipo I en M2

```

' Proceso de produccion de M2

If (P10 = 0 And Y = T3 And P12 = 1) Then ' EVALUAR SI M2 PUEDE TRABAJAR
P2 = 0
P3 = 1
P12 = 0
P15 = 1
P9 = P9 + (td * g2)
T2 = Y
T16 = Y + (1 / g2)
T3 = 10000
E1 = E1 - P4

End If

If (Y = T16 And P16 = 1) Then
piezas = piezas + 1
P15 = 0
P12 = 1
P16 = 0
P17 = 1
T17 = T16 + 0.5
T16 = 10000
E2 = E2 - P9
End If

```

Ilustración 16 Proceso de producción en M2

```

' inspeccion de piezas y clasificacion

If Y = T17 Then
P18 = 1
P17 = 0
P18AUX = P18AUX + 1
D = WorksheetFunction.Max(D1, D2)
If (P7 = 1 Or P13 = 1) Then ' CLASIFICAR PRODUCTOS EN CASO DE FALLA TIPO 1
T18 = T17 + 0.2
If RE < (D * 0.2) Then
P20 = P20 + 1
RE = RE + 1
Else
If RP < D Then
P21 = P21 + 1
RP = RP + 1
Else
buenas = buenas + 1
End If
End If
clasificacion = clasificacion + 1
Else
T18 = Y
P19 = P19 + 1
End If
If P18AUX = 10 Then
If P7 = 1 Then
T8 = Y
RP = 0
RE = 0
Else
If P13 = 1 Then
T14 = Y
End If
End If
End If
T17 = 10000
End If

```

Ilustración 17 Inspección y clasificación de piezas

Tabla 17 Distribuciones de probabilidad en VBA

Distribución	Formula en VBA
Distribución exponencial mantenimiento para falla tipo II	<code>((-Log(1 - Rnd)) / 0.75)</code>
Distribución exponencial mantenimiento para falla tipo I	<code>((-Log(1 - Rnd)) / 0.25)</code>
Distribución de Weibull para la probabilidad de falla en M1	<code>(1 - Exp(-0.001 * P4 ^ 3))</code>
Distribución de Weibull para la probabilidad de falla en M2	<code>(1 - Exp(-0.001 * P9 ^ 3))</code>

Anexo B Datos obtenidos de la simulación

Tabla 18 Datos sobre las piezas procesadas en cada escenario

td	Datos	Total
0,4	Piezas	82
	Inspección	81
	Clasificación	28
	Rechazadas	2
	Reprocesos	-
	Piezas Buenas	53
0,6	Piezas	72
	Inspección	72
	Clasificación	35
	Rechazadas	3
	Reprocesos	0
	Piezas Buenas	37
0,8	Piezas	68
	Inspección	67
	Clasificación	35
	Rechazadas	2
	Reprocesos	-
	Piezas Buenas	31
1	Piezas	61
	Inspección	61
	Clasificación	29
	Rechazadas	1
	Reprocesos	-
	Piezas Buenas	31

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 19 Desgaste y Edad final de las máquinas en cada escenario

Td	Datos				
	Desgaste M1	Desgaste M2	Desgaste Total	Edad M1	Edad M2
0,4	12,42030507	12,19999313	24,62029821	-430,5841866	-429,7872477
0,6	12,62658319	12,43127012	25,05785331	-456,2068491	-443,4880552
0,8	14,73749429	12,61718369	27,35467798	-486,5467787	-450,3219662
1	17,72501302	12,70314166	30,42815468	-500,6034775	-412,0363445

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 20 Tiempo y cantidad de mantenimientos en cada escenario.

Tipo de falla	td	T.mto	Cant.
Falla tipo I M1	0,4	4,256	1
	0,6	8,340	3
	0,8	3,262	1
	1	4,191	1
Falla tipo II M1	0,4	14,814	10
	0,6	28,979	24
	0,8	48,924	32
	1	39,918	34
Falla tipo I en M2	0,4	-	-
	0,6	4,375	0
	0,8	4,805	2
	1	8,970	1,9375
Falla tipo II en M2	0,4	21,286	11,5625
	0,6	32,063	25,125
	0,8	39,000	35,8125
	1	54,868	44,0938

Fuente: Elaboración Propia