

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

**DIAGNÓSTICO Y PROPUESTA DE MEJORA EN EL PROCESO DE
FABRICACIÓN DE VENTANAS CON MARCO DE PVC EN LA
EMPRESA VENTANAS Y ESTILOS EMPLEANDO
HERRAMIENTAS DE INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES**

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Industrial** que presenta el bachiller:

Diego Raúl Quispe Cuenca

ASESOR: Eduardo Carbajal López

Lima, Noviembre de 2015

Resumen

El proyecto tuvo como objetivo identificar la oportunidad de mejora con mayor potencial en la empresa mediante tres etapas: La etapa de diagnósticos, la etapa de desarrollo de la mejora y la etapa de evaluación de resultados técnicos y económicos.

En la etapa de diagnóstico, se documentaron los procesos de la empresa con tres niveles de detalle, eligiendo el proceso más importante de cada nivel mediante el uso de matrices de priorización. Del anterior análisis se obtuvo que, el subproceso de corte presentaba el mayor potencial de mejora por contar un gran volumen de desperdicio de material. Posteriormente, se identificaron y cuantificaron los problemas del proceso mediante el uso de matrices y la herramienta de Pareto. Se propusieron contramedidas las cuales fueron priorizadas con una matriz FACTIS y se determinó que implementar un nuevo modelo de corte de material era necesario para reducir el alto nivel de desperdicio del área. Para ello, se planteó el uso de un algoritmo de optimización heurístico, el cual permitió la reutilización de desperdicios y la reducción del desperdicio obtenido.

En la etapa del desarrollo de la mejora se elaboraron 2 modelos de corte de materia prima. El primer modelo, simuló el proceso de corte actual con sus limitaciones en alcance y calidad del algoritmo de optimización. El segundo modelo, presentó una versión mejorada del algoritmo con menos restricciones y una mayor eficiencia de corte.

En la etapa de evaluación de técnica y económica se obtuvo una simulación de los ahorros que se hubieran obtenido para en el 2014 y un pronóstico de los ahorros potenciales para el 2015. Al comparar los resultados de la situación actual versus el modelo propuesto se logró obtener una reducción del 54% del desperdicio en el proceso de corte lo cual representa para la empresa un ahorro cercano a los S./ 130 000 soles para el periodo del 2015. Además se logró incrementar el porcentaje de utilización de los retazos obtenidos de un 4% a un 25% lo que representa una disminución de los costos de mantener inventario y compra de material valorizada en S./ 26 000. Para obtener estos ahorros se calculó un monto de inversión de S./46 000 compuesto por la implementación y mantenimiento del sistema de optimización. Además se elaboró un cronograma de implementación con una duración estimada de 6 meses para el lanzamiento del sistema a producción.

Tema de Tesis

PARA OPTAR : Título de Ingeniero Industrial

ALUMNO(A) : DIEGO RAUL QUISPE CUENCA

CODIGO : 20095012

PROPUESTO POR : Mag. Eduardo Carbajal López

ASESOR(A) : Mag. Eduardo Carbajal López

TEMA : Diagnóstico y propuesta de mejora en el proceso de fabricación de ventanas con marco de PVC en la empresa Ventanas y Estilos empleando herramientas de investigación de operaciones.

N° TEMA :

FECHA : San Miguel, 01 de Junio de 2015

JUSTIFICACIÓN:

En los últimos 5 años el PBI del Perú ha presentado un incremento promedio del 6.26%. Para el 2013 se registró un crecimiento del 5% sustentado por el aumento de ventas del sector comercio y por el aumento de la industria de la construcción la cual contribuyo al 0.6% de este valor¹. Este último sector ha acumulado un crecimiento promedio sostenido de 10.1% en los últimos 4 años, siendo su crecimiento en el 2013 de 8.4%.

¹ Peru21, BCR: *Servicios, comercio y construcción, los rubros que más aportan al PBI.*

Por otro lado, dentro del sector construcción se presenta un desplazamiento de la demanda de viviendas con un valor menor a USD 80 mil hacia las de un valor comprendido entre los USD 80 mil a 150 mil debido a un aumento del ingreso per cápita y a un incremento en el valor máximo de préstamo otorgado por el fondo Mi Vivienda².

Frente a este contexto, la empresa Ventanas y Estilos inicio sus operaciones en el 2010 con la fabricación de ventanas de marcos de PVC presentando un crecimiento promedio anual del 40% y un crecimiento esperado para el 2015 del 20%. Actualmente, el 80% de las ventas de la empresa se encuentra constituida por su línea de productos de alta gama TecnoCom orientada a hoteles, casas de playa y viviendas con un valor superior a los 130 mil dólares³. Esta línea cuenta con 7 modelos diferentes clasificados según su mecanismo de apertura.

La empresa presenta un proceso de producción por procesos el cual se inicia con la confirmación de la orden de compra por parte del área de ventas con las medidas de las ventanas. Posteriormente el área de planeamiento procede a generar la orden de producción en conjunto con patrón de corte optimizado de materiales y solicitar la compra de los vidrios al proveedor. Las ventanas de PVC pasan por procesos de corte, fresado, refuerzo, termo soldado, limpieza y ensamblaje antes de ser enviadas al almacén de productos terminados. Finalmente, se coordina con el cliente la fecha de instalación de las ventanas en obra con un tiempo promedio de 2 horas por ventana.

Entre los principales problemas detectados se sabe el proceso de corte de perfiles genera desperdicios que no son reutilizados estimándose una pérdida de material anual de 160 mil soles. También se conoce que el tiempo de ciclo total para la fabricación de una ventana desde la confirmación de la cotización hasta la instalación es de 1 día útil en promedio sin embargo se observan desperdicios a lo largo de los procesos que extienden este tiempo a 7 días útiles.

En base a estos hechos, se propone la utilización de herramientas de diagnóstico de procesos e investigación de operaciones para reducir los desperdicios del proceso de fabricación.

² BVVA Research – Situación inmobiliaria análisis económico 2013 pag.4

³ G. Baldovino –Gerente de producción, entrevista personal, 22 de agosto de 2014.

OBJETIVO GENERAL:

Optimizar el proceso de fabricación de la empresa Ventanas y Estilos con el fin de reducir el desperdicio obtenido.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Desarrollar un marco teórico que permita introducir el uso de herramientas de investigación de operaciones como herramientas para reducir desperdicios.
- Realizar una descripción de los procesos principales de la empresa identificando el mapa de flujo de valor actual, los principales problemas y su causa raíz.
- Proponer mejoras que ataquen las causas identificadas en el punto anterior y evaluar su impacto en los indicadores usando herramientas de investigación de operaciones.
- Cuantificar el impacto de la mejora en los indicadores económicos y operativos.

PUNTOS A TRATAR:**a) Marco teórico.**

Se desarrollaran los conceptos base de investigación de operaciones y algoritmos de optimización de procesos. Además se revisaran casos de estudio similares que permitan comprender las ventajas y desventajas de aplicar estas herramientas en el proceso de mejora identificado en el punto b.

b) Descripción y diagnóstico del proceso

Se realizará una descripción de los principales procesos productivos y de gestión de la empresa identificando el mapa de flujo de valor para la fabricación de ventanas de PVC. Además, se identificarán los principales problemas de la

empresa midiendo su impacto en los indicadores proponiéndose mejoras al proceso con el mayor potencial de aporte a la empresa.

c) Propuesta de mejora

Se describirá el proceso necesario para la implementación de la mejora seleccionada según las causas raíz identificadas en el diagnóstico anterior. Se utilizarán las herramientas de investigación de operaciones para elaborar un modelo del estado actual y un modelo del estado luego de implementada la mejora.

d) Evaluación técnica y económica de la propuesta de mejora

Se presenta el impacto esperado en los indicadores financieros y operativos de la empresa para las medidas sugeridas en la propuesta de mejora. Se consideran diferentes escenarios según la demanda esperada para el periodo 2015.

e) Conclusiones y recomendaciones

Bibliografía

ASESOR

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por el constante apoyo en la vida y en mi desarrollo profesional.



ÍNDICE GENERAL

Resumen	ii
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	x
ÍNDICE DE TABLAS	xii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO.....	2
1.1. El diagnóstico de procesos.....	2
1.1.1. El mapa de procesos	2
1.1.2. La herramienta QFD	3
1.1.3. SIPOC.....	5
1.1.4. Matriz de priorización	5
1.1.5. Técnica de lluvia de ideas.....	6
1.1.6. El gráfico de Pareto	7
1.1.7. El diagrama causa efecto	8
1.1.8. Técnica de los 5 porqués.....	8
1.1.9. Matriz probabilidad impacto.....	9
1.1.10. Proceso analítico jerárquico.....	9
1.2. Herramientas de optimización de procesos	10
1.2.1. Formulación de un modelo matemático	10
1.2.2. El problema de la mochila	11
1.2.3. Algoritmos de resolución de problemas de programación entera	11
1.2.4. Lenguaje C# y librería utilizada para la mejora	13
1.3. Estudio de casos	14
1.3.1. Caso de estudio – Una aproximación lineal al problema de corte unidimensional.....	14
1.3.2. Caso de estudio – Método heurístico para el problema de corte de una dimensión con materia prima de múltiples longitudes y stock limitado	17
CAPÍTULO II. DESCRIPCIÓN Y DIAGNÓSTICO	21
2.1. Descripción general de la empresa	21
2.1.1. Sector económico.....	21
2.1.5. Instalaciones y equipos	26
2.2. Diagnóstico.....	28
2.2.1. Mapa de procesos	28
2.2.2. Priorización de procesos	30
2.2.3. Indicadores del proceso	37
2.2.4. Identificación del problema.....	38

2.2.5. Priorización de problemas	38
2.2.6. Identificación de causas	40
2.2.7. Contramedidas	45
CAPÍTULO III. DESARROLLO DEL MODELO	47
3.1. El modelo base.....	47
3.1.1. Datos de entrada.....	47
3.1.2. Datos de salida.....	48
3.1.3. El proceso base de optimización.....	48
3.1.4. Algoritmo de obtención de un patrón de corte óptimo para una longitud de materia prima L	49
3.1.5. Algoritmo de obtención de un patrón de corte óptimo para una longitud de materia prima L en lenguaje C#	51
3.1.6. Supuestos de ambos modelos	52
3.2. El modelo de corte actual.....	53
3.2.1. Cálculo actual de los requerimientos de material.....	54
3.2.2. Obtención de un patrón de corte óptimo	55
3.2.1. El proceso de corte actual en lenguaje C#.....	57
3.3. El modelo de corte propuesto.....	60
3.3.1. El algoritmo de corte propuesto.....	61
3.3.2. El algoritmo de corte propuesto en lenguaje C#	64
3.4. El modelo de simulación de resultados.....	70
CAPÍTULO IV. EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA.....	72
4.1. Evaluación técnica	72
4.1.1. Consumo de materia prima	72
4.1.2. Desperdicio bruto de materia prima	74
4.1.3. Desperdicio neto de materia prima.....	74
4.1.4. Consumo de retazos	75
4.2. ANÁLISIS ECONÓMICO FINANCIERO.....	76
4.2.1. Presupuesto de costos.....	76
4.2.2. Presupuesto de ahorros relevantes.....	77
4.2.3. Flujo de caja y periodo de recuperación de la inversión	78
4.2.4. Cronograma de implementación	81
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	82
Conclusiones	82
Recomendaciones	83
BIBLIOGRAFÍA	85

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Mapa básico de procesos.....	2
Gráfico 2 - Estructura de mapa de procesos.....	3
Gráfico 3 - La casa de la calidad.....	3
Gráfico 4 - Sectores de la casa de la calidad.....	4
Gráfico 5 - Gráfico SIPOC.....	5
Gráfico 6 - Análisis de Pareto.....	7
Gráfico 7 - Diagrama causa efecto.....	8
Gráfico 8 - Diagrama de la técnica de los 5 por qué.....	9
Gráfico 9 - Matriz de evaluación FACTIS.....	9
Gráfico 10 - Organigrama.....	23
Gráfico 11 - Elementos de una ventana.....	24
Gráfico 12 - Ventana corrediza.....	25
Gráfico 13 - Ventana Guillotina.....	25
Gráfico 14 - Ventana Oscilo – batiente.....	25
Gráfico 15 - Ventana Proyectante.....	25
Gráfico 16 - Ventana banderola.....	26
Gráfico 17 - Ventana batiente.....	26
Gráfico 18 - Plano de la fábrica.....	27
Gráfico 19 - Mapa de macro procesos de la empresa Ventanas y Estilos.....	28
Gráfico 20 - Diagrama de proceso SIPOC.....	31
Gráfico 21 - Detalle del proceso de fabricación.....	32
Gráfico 22- Detalle del proceso de corte.....	34
Gráfico 23 - Patrón de corte gráfico.....	35
Gráfico 24 - Detalle del proceso de ensamblaje.....	36
Gráfico 25 - Valorización de problemas impacto anual.....	39
Gráfico 26 - Diagrama de Ishikawa – Alto nivel de obtención de retazos (m) y desperdicio de materia prima (kg).....	40
Gráfico 27 - Análisis 5 por qué – Falta de agrupación de los pedidos de corte.....	41
Gráfico 28 - Análisis 5 por qué – Falta de utilización de retazos de corte.....	42
Gráfico 29 - Ishikawa Alto número de reclamos por ensamblaje incorrecto.....	43
Gráfico 30 - 5 Por qué - Análisis de las razones por las cuales no se inspecciona correctamente el producto al final del proceso de ensamblaje.....	44
Gráfico 31 - Matriz FACTIS Contramedidas.....	46

Gráfico 32 - Esquema del modelo base de optimización de corte	49
Gráfico 33 - Proceso de creación de hoja de fabricación.....	53
Gráfico 34 - Proceso de corte actual	56
Gráfico 35 - Flujograma modelo propuesto consolidación de la demanda	60
Gráfico 36 - Flujograma de optimización de corte propuesto.....	63
Gráfico 37 - Consumo mensual de MP virgen por modelo.....	73
Gráfico 38 - Fabricación mensual de ventanas en metros lineales.....	73
Gráfico 39 - Desperdicio bruto de materia prima por modelo de corte.....	74
Gráfico 40 - Desperdicio neto de materia prima por modelo de corte.....	75
Gráfico 41 - Utilización de retazos por modelo de corte.....	75



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1- Matriz de objetivos estratégicos vs macroprocesos.....	30
Tabla 2 - Matriz de priorización del proceso.....	32
Tabla 3 - Matriz de evaluación de procesos de fabricación	33
Tabla 4 - Relación de materiales requeridos en corte según modelo de ventana .	34
Tabla 5 - Indicadores del proceso de fabricación.....	37
Tabla 6 - Indicadores del proceso de corte y ensamblaje	37
Tabla 7 - Lluvia de ideas para la identificación de problemas.....	38
Tabla 8 - Matriz para la elaboración de Pareto	39
Tabla 9 - Priorización de causas – Problema 1 desperdicio y obtención de retazos en el proceso de corte	41
Tabla 10 - Resumen problemas y causas raíz identificadas	42
Tabla 11 - Resumen problemas y causas raíz identificadas	45
Tabla 12 - Lluvia de ideas de contramedidas.....	45
Tabla 13 - Tipos de datos de entrada.....	47
Tabla 14 - Datos obtenidos del sistema	48
Tabla 15 - Requerimientos de materiales.....	54
Tabla 16 - Ejemplo de la situación actual.....	55
Tabla 17 - Ejemplo de la situación propuesta	55
Tabla 18 - Clasificación propuesta de retazos de materia prima	61
Tabla 19 - Descripción de ítems implementación de mejora.....	76
Tabla 20 - Ahorro proyectado 2015 por escenarios esperados	77
Tabla 21 - Calculo de costo de oportunidad.....	78
Tabla 22 - Cálculo de WACC	79
Tabla 23 - Flujo de caja proyectado escenario neutro	80
Tabla 24 - Flujo de caja proyectado escenario positivo	80
Tabla 25 - Flujo de caja proyectado escenario negativo	80

INTRODUCCIÓN

En los últimos años el PBI del Perú ha presentado un crecimiento sostenido promedio del 6.26% de este porcentaje el 0.6% corresponde al incremento de la industria de construcción⁴. Dentro de este sector, se ha presentado un desplazamiento de la demanda de viviendas con un valor menor a USD 80 mil hacía las de un valor comprendido entre los USD 80 mil a 150 mil debido a un aumento del ingreso per cápita y a un incremento en el valor máximo de préstamo otorgado por el fondo Mi Vivienda. A raíz de esto, la demanda de ventanas con marcos de PVC de la empresa Ventanas y Estilos ha ido incrementando sostenidamente un 20% anual. Por este motivo la empresa presenta necesidad de optimizar sus procesos de producción, disminuyendo sus costos de fabricación e incrementando su capacidad para satisfacer la demanda.

En el presente trabajo se detalla en cinco capítulos, el análisis realizado para identificar la oportunidad de mejora con mayor potencial de aporte en la reducción de los costos de la empresa. En el primer capítulo, se explican conceptos teóricos que sirven como base para la mejora propuesta. En el segundo capítulo, se aplican las herramientas de diagnóstico descritas en el capítulo uno para documentar el estado actual de los procesos de la empresa y determinar el área específica con mayor posibilidad de mejora. Posteriormente, se registran los principales problemas del área identificada y sus posibles contramedidas eligiendo la mejora con mayor impacto en los indicadores de la empresa. En el tercer capítulo, se detalla la contramedida elegida explicando el funcionamiento del algoritmo de corte heurístico recursivo como solución para el problema de corte de perfiles de PVC.

El cuarto capítulo, analiza el impacto de la mejora en los indicadores del área y los indicadores de la organización. Además, presenta un estimado de los costos y tiempos requeridos para la implementación de la mejora. Finalmente, el quinto capítulo presenta las recomendaciones y conclusiones para implementar la mejora en la empresa, además de las oportunidades que se presentan para incrementar su impacto y expandir su alcance.

⁴ Peru21, BCR: *Servicios, comercio y construcción, los rubros que más aportan al PBI.*

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan las herramientas utilizadas en el análisis y elaboración de la propuesta de mejora para la empresa de fabricación de ventanas de PVC.

1.1. El diagnóstico de procesos

A continuación se presentan las herramientas utilizadas para el diagnóstico de los procesos de la empresa.

1.1.1. El mapa de procesos

Un mapa de proceso en su forma más básica describe como las entradas son transformadas en salida a través de una serie de un conjunto de actividades⁵.

Para realizar el mapeo de un proceso es necesario entender primero como funciona en el sistema, cuál es su propósito y cuáles son las entradas y salidas que presenta. Estas definiciones permiten que posteriormente se puedan establecer indicadores que midan el rendimiento de cada proceso.

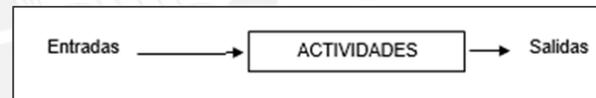


Gráfico 1 - Mapa básico de procesos

Fuente: Six Sigma Handbook (2003)
Elaboración propia

Los mapas de procesos son elaborados teniendo en cuenta que su lectura se realice de izquierda a derecha a diferencia del mapeo por flujogramas diseñado para una lectura de arriba abajo principalmente reservado para la elaboración de procedimientos operativos. Para la elaboración del mapa de procesos se deben usar verbos en forma de acción para describir los nombres de los procesos, además de, definir las actividades críticas para la organización distinguiéndolas de las actividades de soporte según como se observa en el Gráfico 2.

⁵ 1981, *Systems Thinking, Systems Practice*, Wiley

Por otro lado, se establece como base el formato ANSI para la elaboración de gráficos de proceso en el presente trabajo.

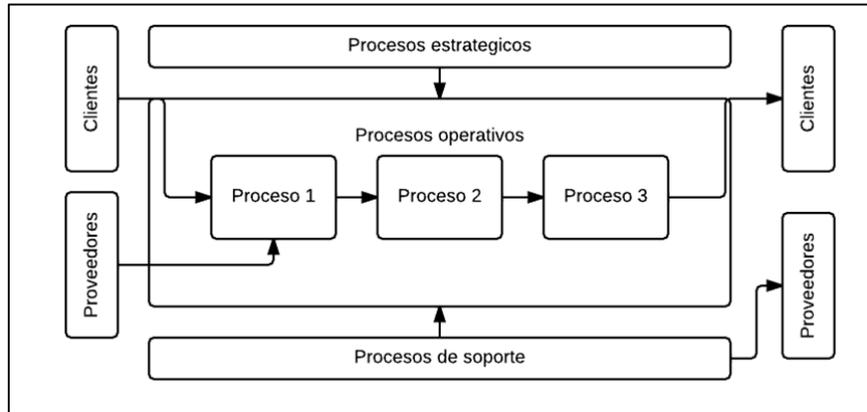


Gráfico 2 – Estructura de mapa de procesos

Fuente: Six Sigma Handbook (2003)

Elaboración propia

1.1.2. La herramienta QFD

Para determinar en qué macro proceso se centra la mejora se utiliza la herramienta de la casa de la calidad que pertenece al conjunto de QFD (Quality Function Deployment) enfocada en los requerimientos del cliente mediante la identificación de estrategias de la empresa⁶. En el Gráfico 3 se observa el diagrama de la casa de la calidad utilizado para una evaluación de las necesidades del cliente versus las prioridades de la empresa. La utilización de esta herramienta inicia con la elaboración de una matriz con 5 sectores que permite a través de pesos, priorizar los procesos o

Gráfico 3 - La casa de la calidad

Fuente: <http://www.npd-solutions.com>

⁶ Six sigma Handbook pág. 121

áreas de la empresa que presenten una mayor oportunidad para la implementación de proyectos de mejora según se observa en el Gráfico 4.

	3	
1	4	2
	5	

Gráfico 4 - Sectores de la casa de la calidad

Fuente: <http://www.npd-solutions.com>
Elaboración propia

Para el presente trabajo en el primer sector se ubican los objetivos estratégicos de la empresa determinados en base a las necesidades de los clientes y partes interesadas. En el segundo sector se realiza el cálculo del factor de ponderación (peso absoluto) de cada uno de los objetivos estratégicos con base en los siguientes parámetros calificados del 1 al 5, siendo 5 el máximo grado de conformidad:

- El grado de importancia atribuido por las partes interesadas o stakeholders tanto para la situación actual como la situación futura.
- El índice de mejora de objetivo estratégico calculado como el resultado de dividir el puntaje del nivel de cumplimiento del proceso esperado por el cliente entre el puntaje actual asignado por parte de los stakeholders en el cumplimiento del objetivo.

En el tercer sector se listan los procesos principales que serán analizados en conjunto con cada uno de los objetivos estratégicos. En el cuarto sector se establece el grado de relación que presenta el proceso respecto al objetivo con una valoración que varía entre 1 para una relación débil, 3 para una relación media y 5 para una alta relación, además de existir un puntaje de 0 para aquellos pares que no presenten relación. El quinto sector de la matriz es empleado para obtener los resultados mediante la sumatoria de pesos absolutos multiplicados por el grado de relación establecido por cada objetivo estratégico analizado.

Posteriormente, los resultados son ordenados para priorizar el área con mayor potencial de mejora. Además de estos 5 sectores, existe un sector superior en forma de triángulo que permite relacionar los procesos o áreas entre si indicando el grado en el que dificulta o facilita el desempeño de la otra área. Sin embargo, para el presente análisis no se tiene en cuenta esta zona por no tener un impacto significativo en los resultados.

1.1.3. SIPOC

Suppliers, input process, outputs, customers (SIPOC) es una herramienta que define el alcance de un proceso y permite identificar a un alto nivel las deficiencias potenciales entre un proceso y sus clientes / proveedores. Además permite comunicar visualmente el proceso a otros miembros de la organización siendo punto de partida para herramientas de identificación de problemas. En el Gráfico 5 se observa la estructura del diagrama SIPOC.

DIAGRAMA SIPOC: NOMBRE DEL PROCESO

Proveedores	Entradas	Procesos	Salidas	Clientes
Lista de proveedores que proveen entradas al proceso (incluir recursos, materiales e información)	Lista de entradas al proceso	De 5 a 7 pasos claves en el proceso informa de flujograma	Listar las salidas del proceso	Listar los clientes de las salidas

Gráfico 5 – Gráfico SIPOC

Fuente: Six Sigma Handbook (2003)
Elaboración propia

El primer paso consiste en identificar el alcance del proceso y cuáles son las acciones que inician y terminan el proceso. Posteriormente, se debe indicar las salidas del proceso usando sustantivos e indicar a quien afecta o beneficia el proceso (cliente). El tercer paso es identificar los proveedores (individuos o grupos) que brindan entradas al proceso. Finalmente, se debe indicar de 5 a 7 pasos que componen el proceso usando verbos como títulos de cada paso.⁷

1.1.4. Matriz de priorización

Para determinar con precisión el proceso que será analizado en el presente trabajo se utilizó el tercer método del tipo matriz de priorización la cual permite ordenar la importancia de los procesos comprendidos dentro del macro proceso elegido. Esta

⁷ Six sigma Handbook pág. 390

herramienta está diseñada para distinguir las opciones o criterios más importantes. En el libro *The Six Sigma Handbook* el autor presenta tres tipos de matrices que derivan de este concepto⁸.

El método analítico completo o AHP se basa en el análisis de la data mediante la relación de pares de conceptos. Se recomienda su uso para decisiones complejas debido a su nivel de dificultad. El método combinado es similar al método usado en la sección anterior (QFD) y sirve para establecer la relación entre criterios de causa efecto. El método de criterios por consenso es una simplificación del método anterior y permite seleccionar una opción de acuerdo con varios criterios.

Para construir esta matriz se coloca en las filas las opciones que se están considerando y en las columnas los criterios con un peso asignado según criterio del experto del proceso. Luego se completa la matriz asignándole un puntaje a cada opción sin repetir los valores de la columna.

1.1.5. Técnica de lluvia de ideas

La lluvia de ideas es una técnica usada para extraer ideas y presentarlas a un equipo. Existen dos tipos de lluvia de ideas según Frederick D. Buggie, autor del libro "How to Hold Effective Brainstorming Sessions". La lluvia de ideas estructurada establece un orden en el cual cada participante contribuye con una idea, a diferencia de la versión no estructurada, la cual permite una mayor flexibilidad en el intercambio al darle a los participantes la opción de lanzar sus ideas en cualquier momento, sin embargo exige un mayor control por parte del facilitador para que todos tenga la misma oportunidad de contribuir⁹.

Entre las ventajas principales de esta técnica están el permitir recolectar un gran número de causas o propuestas para solucionar un problema en un corto tiempo y definir mejor un tema propuesto.

Existen tres fases en esta técnica. La primera, define el objetivo que los participantes deben comprender para hallar las causas o soluciones del mismo. Posteriormente, se deben exponer las ideas nombrando un facilitador que permita que todos los integrantes tengan oportunidad de participar. Finalmente, se realiza una selección y clasificación de las ideas según su similitud.

⁸ Six sigma Handbook pag. 269

⁹ "How to Hold Effective Brainstorming Sessions", Handbook of Business Strategy, Vol. 4
Iss 1 pp. 120 - 123

1.1.6. El gráfico de Pareto

Para clasificar los problemas encontrados en el siguiente capítulo se utilizó el análisis de Pareto en cual consiste en separar las oportunidades de mejora que tienen mayor potencial. Para ello en el libro Six Sigma Handbook el autor recomienda seguir los siguientes pasos¹⁰.

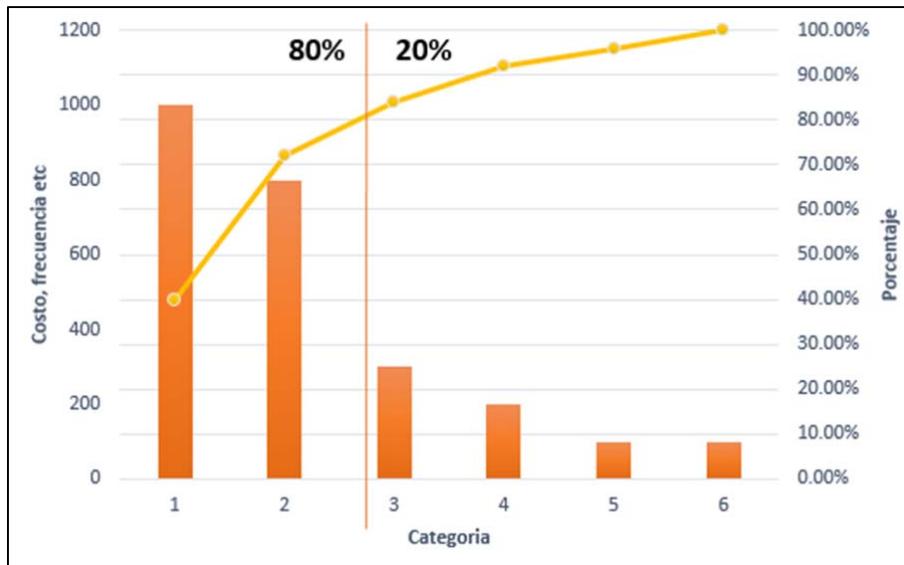


Gráfico 6 – Análisis de Pareto

Fuente. Six Sigma Handbook pág. 261
Elaboración propia

Determinar la clasificación por las cuales se agruparan las categorías del gráfico de Pareto, registrar su frecuencia y asignarle un porcentaje a cada categoría. Ordenar las categorías de mayor a menor. Armar un gráfico con dos ejes verticales, el eje izquierdo debe mostrar la frecuencia o el valor monetario de la categoría y el derecho, el porcentaje acumulado. Posteriormente, dibujar como barras cada una de las categorías y superponer un gráfico de líneas que acumule el porcentaje de cada categoría. Finalmente, se eligen las categorías que se encuentren entre el 0% y 70-80% del porcentaje acumulado ya que éstas representan la mayor cantidad de problemas.

¹⁰ Six Sigma Handbook pág. 259

1.1.7. El diagrama causa efecto

El diagrama causa efecto es utilizado para organizar gráficamente el conocimiento que un grupo sobre un problema relativo en seis categorías (mano de obra, materiales, maquinaria, medio ambiente, método, mediciones) y posteriormente hallar su causa raíz¹¹. Para lograr esto se debe definir el problema a resolver, realizar una lluvia de ideas con todas las posibles causas del problema y organizarlas según las categorías mencionadas anteriormente.

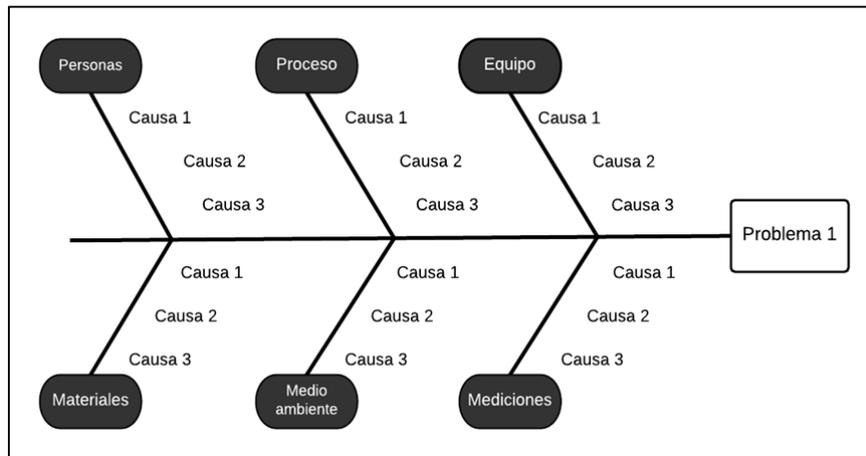


Gráfico 7 – Diagrama causa efecto
Fuente. Six Sigma Handbook pág. 265
Elaboración propia

1.1.8. Técnica de los 5 porqués

Según la Asociación Española para la Calidad esta técnica consiste en la realización sistemática de preguntas (¿por qué?) buscando el origen de una causa repitiendo el proceso 5 veces para poder encontrar la causa raíz de un problema¹². Se debe cuidar que el enfoque sea para encontrar el por qué un problema en particular en lugar de buscar un responsable (preguntando ¿quién? en lugar de ¿por qué). Para la aplicación de esta técnica se suele utilizar un diagrama de árbol que permite observar las ramificaciones de las causas encontradas sucesivamente.

¹¹ Six Sigma Handbook pág. 261

¹² Asociación Española para la Calidad <http://www.aec.es/web/guest/centro-conocimiento/5-porque>

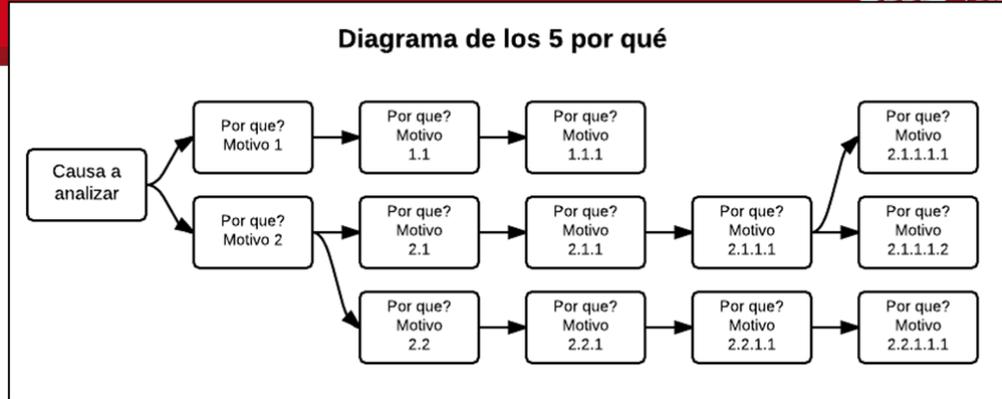


Gráfico 8 – Diagrama de la técnica de los 5 por qué

Fuente: Six sigma Handbook pág. 278

Elaboración propia

1.1.9. Matriz probabilidad impacto

Esta matriz se enfoca en evaluar la probabilidad de un suceso multiplicado por el impacto que pueda causar en la empresa para obtener un resultado en forma de puntaje con el cual elegir las causas raíz para enfocar el esfuerzo de mejora. Para el presente trabajo se utiliza una escala de probabilidad e impacto del 1 al 3 donde 1 equivale a la probabilidad o impacto mínimo y 3 a la probabilidad o impacto máximo.

1.1.10. Proceso analítico jerárquico

La matriz FACTIS es un tipo de matriz de priorización que es utilizada en el presente trabajo para la determinación de la contramedida con mayor probabilidad de impacto en la empresa. Los criterios a evaluar por cada contramedida son los que se observan en el Gráfico 9 – Matriz de evaluación FACTIS.

SISTEMA DE PRIORIZACIÓN DE PROBLEMAS - MATRIZ FACTIS										
CRITERIOS DE SELECCIÓN		FACTOR POND	MATRIZ DE VALORACIÓN							
F	Facilidad para solucionarlo 1: Muy difícil 2: Difícil 3: Fácil	5	CRITERIOS				Puntaje Final			
A	Afecta a otras áreas su implementación 1: Nada 2: Algo 3: Mucho	2	PROBLEMA	F	A	C		T	I	S
C	Mejora la calidad 1: Poco 2: Medio 3: Mucho	3	A	15	6	6	3	10	6	46
T	Tiempo que implica solucionarlo 1: Largo plazo 2: Mediano plazo 3: Corto plazo	3	B	10	6	3	6	15	2	42
I	Requiere inversión 1: Alta 2: Media 3: Poca	5	C	10	4	3	9	5	2	33
S	Mejora la seguridad 1: Poco 2: Medio 3 Mucho	2	D	5	2	6	3	5	2	23
			E	10	4	9	6	5	2	36

MATRIZ DE PRIORIZACIÓN DE PROBLEMAS			
N	PUNTAJE	PRIORIDAD	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA
A			
B			
C			
D			
E			

Gráfico 9 – Matriz de evaluación FACTIS

Elaboración propia

1.2. Herramientas de optimización de procesos

Se presentan la base teórica de las herramientas de optimización utilizadas para implementar la solución al problema identificado en el capítulo 2.

1.2.1. Formulación de un modelo matemático

Los modelos matemáticos son representaciones idealizadas de un problema real expresados en forma de variables y expresiones matemáticas.

El modelo matemático presenta cuatro componentes principales¹³. El primero es un conjunto de variables de decisión que representa las respuestas del problema y comúnmente están vinculadas a una toma de decisión como, por ejemplo, la cantidad a adquirir de x , comprar o no comprar y , etc. Existen varios tipos de variables de decisión clasificadas según el intervalo de valores que pueden tomar. Para el presente trabajo se utilizaran variables enteras y variables binarias debido a su similitud con la realidad. El segundo componente del modelo es la función objetivo, la cual define el objetivo a alcanzar pudiendo ser este el maximizar o minimizar el resultado de una ecuación compuesta por las variables de decisión. Un tercer componente consiste en el conjunto de restricciones expresadas mediante ecuaciones e inecuaciones, al cual se encuentra sometidas las variables del primer componente.

El último componente es el conjunto de datos estáticos llamados parámetros cuya función es asignar coeficientes a las variables empleadas en las restricciones y en la función objetivo. Generalmente estos valores son determinados por las reglas del negocio.

Debido a que el valor real de un parámetro es una estimación de la realidad es necesario conocer como una variación en estos valores afecta la solución derivada del problema. A este proceso se le conoce como análisis de sensibilidad.

¹³ Hillier, Introducción a la investigación de operaciones pág. 10

1.2.2. El problema de la mochila

El presente trabajo tiene como base teórica para la solución el problema de la mochila o en inglés 'Knapsack' es un problema de optimización combinatoria que tiene como objetivo encontrar la mejor solución entre un conjunto de soluciones posibles.

Definido de manera formal¹⁴ el problema de la mochila se define como:

Se tienen n tipos de ítems donde $n = 1 \dots n$. De cada tipo de ítem se tiene un stock de K_i para $K_i = 1 \dots \infty$ y cada ítem presenta un beneficio definido por el conjunto de variables v_i y un peso w_i . Por otro lado se tiene una mochila que soporta un peso máximo W .

El problema consiste en maximizar el valor de los ítems que contiene la mochila teniendo en cuenta la restricción del peso máximo de la misma según la fórmula (1).

Debido a que no se pueden introducir fracciones de ítems en la mochila y el stock disponible de cada ítem es mayor a 1 el problema se define como un problema de la mochila no acotado el cual debe ser resuelto por programación entera.

$$(1) \quad \text{Maximizar} \quad \sum_{i=1}^k v_i * x_i$$

Donde x_i se define como la variable de decisión entera positiva que indica la cantidad de ítems de tipo i que serán incluidos en la mochila teniendo en cuenta la restricción (2) del peso máximo de la mochila.

$$(2) \quad \sum_{i=1}^k w_i * x_i \leq W$$

1.2.3. Algoritmos de resolución de problemas de programación entera¹⁵

Los tres factores determinantes de la dificultad computacional de un problema de programación entera son el número de variables enteras, el tipo de variables (binarias o generales) y si existe alguna estructura especial en el problema. Para resolver el anterior problema existen diversos métodos de programación entera

¹⁴ Eric Gossett, "Discrete Mathematics with Proof". Segunda edición. John Wiley 2009.

¹⁵ Hillier, Introducción a la investigación de operaciones pág. 453

entre los cuales se puede mencionar los algoritmos heurísticos y meta heurísticos. De estos últimos existen tres tipos de algoritmos sobresalientes. El algoritmo de búsqueda tabú, la simulación de templado y los algoritmos genéticos.

El algoritmo heurístico más popular, el cual se empleará en el presente trabajo es el algoritmo de ramificación y acotamiento. Este consiste en dividir el problema principal en problemas más pequeños. Para esta división o ramificación se emplea un subconjunto de soluciones factibles a evaluar y se realiza un acotamiento que permite determinar la mejor solución del subconjunto y descartar las demás. Antes de iniciar las iteraciones del algoritmo se debe cumplir con un paso inicial que toma el problema de programación entera y resuelve su versión relajada (ignora las restricciones de variables enteras) mediante cualquier método conocido con el fin de obtener una base para el proceso de iteración.

A continuación se describen los tres pasos básicos de cada iteración para el funcionamiento de este algoritmo¹⁶.

Ramificación: Se especifican dos intervalos de valores de una de las variables enteras para crear dos sub problemas que unidos contienen todas las soluciones posibles del problema principal. Al nodo que une estas soluciones se le conoce como nodo principal. La variable usada para establecer los intervalos toma el nombre de variable de ramificación y la regla para elegirla es seleccionar la primera que presente un valor no entero en la solución óptima encontrada en el problema de relajación del paso inicial.

Acotamiento: Para cada sub problema obtenido se establece una cota que determine el nivel base de la mejor solución factible. Para obtener este valor de manera rápida se puede utilizar la relajación de programación lineal la cual consiste en resolver el sub problema ignorando la restricción de variables enteras mediante métodos conocidos como el algoritmo simplex.

Sondeo: Existen tres pruebas que se evalúan durante el sondeo a partir de la solución óptima del problema de relajación obtenido en el acotamiento. La primera evalúa si el problema de relajación no encontró una solución factible entonces no existen soluciones factibles para toda esa rama lo cual permite eliminar toda la sección de posibilidades evaluada. Una segunda prueba consiste en verificar si la solución de relajación del sub problema es mejor que la solución óptima local (también obtenida en un paso anterior por relajación), de cumplirse esto se ha encontrado una nueva solución óptima para el sub problema de contar con

¹⁶ Hillier, Introducción a la investigación de operaciones pág. 465

variables no enteras se procede a un redondeo de los valores de las variables teniendo en cuenta las restricciones del sub problema. Una tercera prueba es evaluar si la solución obtenida en el método simplex es entera ya que de serlo sería también la solución óptima del sub problema de PE.

El algoritmo generalmente termina sus ciclos de iteración cuando la respuesta global del problema se encuentra bastante cerca de la respuesta obtenida por la versión del problema de relajación (óptimo global). El valor de cercanía necesario para considerar finalizado el procedimiento es definido por el usuario o el sistema usado.

1.2.4. Lenguaje C# y librería utilizada para la mejora

Para desarrollar el sistema base para la mejora se utilizó el lenguaje de programación C# orientado a objetos. Este lenguaje permite al desarrollador crear diversas aplicaciones que se ejecutan en .NET Framework. Este último es un componente de Windows que incluye un sistema de ejecución virtual denominado Common Language Runtime (CLR) y un conjunto unificado de bibliotecas de clases. CLR es la implementación comercial de Microsoft de CLI (Common Language Infrastructure), un estándar internacional que constituye la base para crear entornos de ejecución y desarrollo en los que los lenguajes y las bibliotecas trabajan juntos sin ningún problema¹⁷.

El código fuente escrito en C# se compila en un lenguaje intermedio (IL) conforme con la especificación CLI. El código de lenguaje intermedio y recursos como imágenes y texto se almacenan en disco duro en un archivo ejecutable denominado ensamblado, cuya extensión es .exe o .dll generalmente. Un ensamblado contiene un manifiesto que proporciona información sobre los tipos, la versión, la referencia cultural y los requisitos de seguridad del ensamblado.

Para el proceso de optimización se usó la librería Microsoft Solver Foundation 3.1¹⁸ y el algoritmo de resolución de programación entera de Guroby. Microsoft Solver Foundation es un set de herramientas de desarrollo usadas para simular, optimizar y modelar problemas matemáticos que se basa en sistemas de ejecución CLR. Esta librería fue desarrollada con la intención de ser usada por analistas, matemáticos,

¹⁷ MSDN Library –CLR y CLI <https://msdn.microsoft.com/es-pe/library/z1zx9t92.aspx>

¹⁸ MSDN Library – Solver Foundation <https://msdn.microsoft.com/es-pe/library/ms687307.aspx>

gerentes de riesgo y desarrolladores de aplicaciones para ayudar a los negocios a tomar mejores decisiones. Algunas de las áreas donde se usa este tipo de tecnología son: los data center, optimización de la cadena de suministro en tiempo real, análisis de portafolio, investigación de operaciones, planeamiento de negocios, optimización de decisiones, entre otros.

El algoritmo Guroby es un algoritmo comercial incluido dentro de la plataforma Microsoft Solver Foundation que permite resolver problemas de programación lineal (LP), programación cuadrática (PQ) y programación mixta (MILP)¹⁹.

1.3. Estudio de casos

1.3.1. Caso de estudio – Una aproximación lineal al problema de corte unidimensional

La presente investigación realizada por P.C. Gilmore y R.E. Gomory en 1961 presenta una solución al problema de corte lineal el cual consiste en cumplir una orden de fabricación con el mínimo costo para una cantidad específica de material demandado, con longitudes variables que serán cortadas a partir de una materia prima base de longitud determinada.

Inicialmente, el requerimiento puede ser expresado como un problema de programación entera en donde todas las combinaciones posibles de las piezas a cortar en el material deben ser probadas para hallar el óptimo consumo de material. Sin embargo, como menciona el autor este planteamiento es computacionalmente más complejo conforme aumenta el número de piezas de diferente longitud a obtener. Por este motivo sugiere un método diferente para reducir el número de iteraciones necesarias para hallar el costo mínimo.

El método planteado consiste en resolver el problema principal mediante iteraciones, resolviendo en cada iteración un problema auxiliar que permita reducir el número de opciones posibles. El problema auxiliar es de programación entera del tipo 'knapsack' o problema de la mochila y es posible resolverlo con uno de los algoritmos mencionados anteriormente.

¹⁹ Guroby - Características y beneficios - <http://www.gurobi.com/products/features-benefits>

Planteamiento del problema de corte

Se asume que existe un stock ilimitado de materia prima de longitudes estándar L_1, L_2, \dots, L_K . Una orden de fabricación consiste en N_j piezas de longitud l_i que deben ser cortadas donde $i = 1, 2, \dots, m$. Mientras se cumpla la relación $L_j \geq l_i$, la orden podrá ser cumplida. Por otro lado se asigna un costo a cada longitud de materia prima y el costo total de cumplir la orden es igual a la sumatoria de los costes de materia prima cortada para cumplir la orden. El problema consiste en cumplir la orden con la menor cantidad de materia prima.

El autor también define la actividad de corte como el proceso de dividir una determinada materia prima en secciones de una longitud específica. Por ejemplo, cortar una barra de acero de longitud 20m en tres partes obteniendo 2 piezas de 5 metros y una pieza de 8 metros es una actividad. Si se le asigna una variable a cada actividad posible que obtiene piezas cortadas de una longitud ordenada l_1, l_2, \dots, l_m a partir de un stock de materia prima de longitudes L_1, L_2, \dots, L_K , entonces el problema de corte puede ser planteado como un problema de programación lineal, donde el valor tomado por las variables x_1, \dots, x_n indica el número de veces que una actividad de corte debe realizarse. Las variables x_1, \dots, x_n deben satisfacer m inecuaciones:

$$a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n \geq N_i \quad (i = 1, \dots, m)$$

Donde N_i es el número de piezas de longitud l_i a ser cortadas y a_{ij} indica el número de piezas de longitud l_i cortadas en la actividad j . El costo de la función a minimizar está representado por:

$$(1) \quad C_1x_1 + C_2x_2 + \dots + C_nx_n$$

En donde C_j es el costo de la materia prima cortada por la actividad i . Se introducen las variables ficticias x_{n+1}, \dots, x_{n+m} para describir el problema de corte como un problema de encontrar enteros x_1, \dots, x_{n+m} que cumplan con las restricciones 2 y 3 en donde la ecuación 1 es el mínimo.

$$(2) \quad a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n - x_{n+i} = N_i \quad (i = 1, \dots, m)$$

$$(3) \quad x_j \geq 0 \quad (j = 1, \dots, m + n)$$

Según el autor existen dos factores que hacen esta formulación muy compleja de resolver. La primera el tamaño de n el cual puede llegar a ser enorme para un número variable de longitudes de materia prima K y un número de longitudes demandadas m se encuentran dentro de límites razonables. El segundo factor es la restricción a enteros la cual obliga a buscar un método de resolución complejo. Si se remueve esta última restricción las soluciones del problema son en general no enteras.

El autor plantea que al remover la restricción de variables enteras el problema puede ser resuelto aproximando la parte no entera de la solución mediante métodos como redondeo de variables manejando el problema residual por métodos de resolución para enteros. Se asume que si las cantidades demandadas de corte son altas y la longitud de la materia prima es alta en comparación a la longitud de las piezas requeridas, el cambio de valor causado por el redondeo en la solución óptima puede considerarse marginal. Por estos motivos el autor considera para la presente investigación variables no restringidas a ser enteras y se centra en la solucionar la primera restricción para reducir el número de posibilidades dado un K y m de tamaño mediano.

Se plantea el siguiente método de resolución simplex para determinar la solución a la fórmula (2) restringida a (3) en la cual (1) es el mínimo. El procedimiento simplex prueba cada variable del problema hasta encontrar una que reemplace una variable básica actual (variable con un valor diferente de cero). Asumiendo que las variables en una solución básica factible son x_1, x_2, \dots, x_m . Siendo P_i el vector $a_{1i}, a_{2i}, \dots, a_{mi}$ y c_i el coeficiente de costo en (1) asociado con la variable x_i y siendo x_i una variable de holgura si $c_i = 0$.

Definimos P como una actividad nueva que corta stocks de longitud L con un costo c . Siendo A una matriz con P_1, P_2, \dots, P_m como columna. Si P_1, P_2, \dots, P_m forman una base entonces P puede ser definido de la forma $A*U=P$ donde U es la columna del vector unitario. Se define como mejora cuando se obtiene una mejora en la solución dada tal que $C.U > c$ donde C es el vector fila con coeficientes c_1, c_2, \dots, c_m . Y se satisfacen las siguientes restricciones siendo l la longitud de cada pieza cortada.

$$L \geq l_1 * a_1 + \dots + l_m * a_m$$

$$b_1 * a_1 + \dots + b_m * a_m \geq c$$

1.3.2. Caso de estudio – Método heurístico para el problema de corte de una dimensión con materia prima de múltiples longitudes y stock limitado²⁰

Esta investigación desarrollada por Cristina Poldi y Marcos Nereu del Instituto de Ciencias Matemáticas y de Computación presenta una alternativa para la resolución del problema de corte unidimensional teniendo en cuenta un stock de materia prima limitado con longitud variable.

A. Definición del problema

Se asume que se tiene K tipos de materia prima donde L_k representa la longitud de la materia prima y donde k presenta valores enteros $1, \dots, K$. Cada tipo de materia prima tiene una cantidad en stock definida por la variable e_k . La demanda está clasificada según la longitud de cada corte requerido. Existen m cortes requeridos de longitud l_i donde $i = 1, \dots, m$ con una cantidad requerida por corte de d_i . Todos los cortes requeridos cumplen con la regla $l_i \leq L_k$ para por lo menos un valor de k .

El problema consiste en producir la cantidad requerida de ítems cortando la materia prima disponible de tal forma que se minimice el desperdicio total de material usado.

La distribución de corte en cada barra de materia prima que indica que ítems se van a obtener de esta se llama patrón de corte. Se establece la variable N_k para representar el número de patrones de corte para cada longitud de materia prima k . Además se establece la variable entera $X_{i,j,k}$ la cual determina el número de ítems de tipo i en el patrón de corte j que serán obtenidos del stock de longitud tipo k para $i = 1, \dots, m$ y $j = 1, \dots, N_k$. También se define el concepto de desperdicio C_{jk} para el patrón de corte j del objeto tipo k según la expresión matemática $C_{jk} = \sum_{i=1}^m l_i X_{i,j,k}$ para $j = 1, \dots, N_k$ y $k = 1, \dots, K$. Por último se define la variable Y_{jk} como el número de objetos tipo k cortados a partir del patrón de corte tipo j .

²⁰ Heuristics for the one-dimensional cutting stock problem with limited multiple stock lengths - Kelly Cristina Poldi, Marcos Nereu Arenales

La función a minimizar por lo tanto se define de la siguiente forma

$$\text{minimizar } \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{N_k} C_{jk} * Y_{jk}$$

Sujeto a las restricciones

$$(1) \quad \sum_{j=1}^{N_1} Y_{j1} * X_{ij1} + \dots + \sum_{j=1}^{N_K} Y_{jk} * X_{ijk} = d_i \quad i = 1, \dots, m$$

$$(2) \quad \sum_{j=1}^{N_1} Y_{j1} \leq e_k \quad k = 1, \dots, K$$

$$(3) \quad l_1 * X_{1jk} + \dots + l_m * X_{mjk} \leq L_k$$

$$0 \leq X_{ijk} \leq d_i, \text{ y } X_{ijk} \text{ entero } i = 1, \dots, m$$

$$Y_{jk} \geq 0 \text{ entero } j = 1, \dots, N_k, \quad k = 1, \dots, K$$

B. Soluciones propuestas

El autor presenta dos metodologías para enfrentar el problema.

i. Heurística constructiva

Se utiliza el método de repetición exhaustiva el cual consiste en obtener un buen patrón de corte y usarlo tantas veces como sea posible. Para resolver el problema de encontrar un buen patrón el autor recomienda dos métodos posibles. El método de FDD y el método Greedy y plantea la siguiente metodología de aplicación de esta técnica:

Paso 1: Construir un buen patrón de corte para cada longitud k , $k = 1, \dots, K$

Paso 2: Seleccionar entre los patrones de corte generados en el paso 1 el que presente el mínimo desperdicio.

Paso 3: Usar el patrón de corte presentado en el paso 2 tanto como sea posible teniendo en cuenta las restricciones de la demanda de ítems y el stock disponible de materia prima para cada longitud.

Paso 4: Actualizar la demanda de ítems restándole los ítems producidos y el stock de materia prima.

Paso 5: Si la demanda de ítems ha sido satisfecha o no hay existe stock disponible de ninguna longitud, terminar el método. De lo contrario, volver al paso 1.

El método FDD

Consiste en cortar inicialmente el ítem más largo tantas veces como sea posible o hasta que la demanda de este sea cumplida. Cuando se cumple esta condición se procede a usar el segundo ítem más largo hasta llegar al ítem más corto. Cuando no se puede cortar otro ítem el patrón está completo.

El método Greedy

Este método consiste en resolver el problema de la mochila maximizando en este caso la longitud de elementos cortados por cada pieza de longitud k . La forma matemática del problema es la siguiente:

$$\text{Maximizar } l_1 * x_{1k} + l_2 * x_{2k} + \dots + l_m * x_{mk}$$

Restringido a

$$l_1 * x_{1k} + l_2 * x_{2k} + \dots + l_m * x_{mk} \leq L_k$$

$$0 \leq x_{ik} \leq r_i, x_{ik} \text{ entero}, \quad i = 1, \dots, m.$$

Donde l_i es la longitud del ítem tipo i , $i = 1, \dots, m$. y r_i es la demanda residual del ítem tipo i , la cual es actualizada en el paso 4. Inicialmente la demanda es $r_i = d_i$.

ii. Heurística residual

El procedimiento heurístico residual obtiene la solución óptima mediante la relajación del problema de optimización de variables enteras asumiendo que al menos un vector de la solución no es entero. En otras palabras, Si se considera el problema inicialmente planteado como un problema de programación lineal es posible resolverlo usando algoritmos como simplex, sin embargo existe una alta

posibilidad que la respuesta obtenida sea no entera por lo cual es necesario refinar este último resultado para aproximarlos a un entero.

Definición 1. Solución entera aproximada

Siendo x la solución continua tal que $Ax = d, Ex \leq e, x \geq 0$. Siendo A la matriz asociada a los patrones de corte y E la matriz de 0 y 1 de las restricciones de la disponibilidad de stock. Se tiene y como un vector de enteros cercano a x tal que $Ay \leq d, Ey \leq e, y \geq 0$. El vector y se puede obtener mediante diversas técnicas de aproximación a la solución entera. Por ejemplo, se puede usar la técnica del redondeo hacia abajo.

Definición 2. El problema residual

Siendo y una solución integral aproximada al vector x . Se tiene que $r = d - Ay$ representa el valor residual de la demanda y $s = e - Ey$ el valor residual de la disponibilidad de stock.

El autor plantea una metodología de resolución del problema residual que consta de los siguientes cinco pasos:

Paso 1: Hacer $k = 0, r^k = d$ y $s^k = e$ los datos iniciales del problema residual.

Paso 2: Resolver el problema mediante el método de generación de columnas de Gilmore siendo la solución continua x^k . Si x^k es entera entonces el procedimiento ha terminado.

Paso 3: Determinar una solución entera aproximada a x^k denotada como y^k . Si el vector y^k es nulo ir al paso final.

Paso 4: Actualizar los datos determinando la demanda residual $r^{k+1} = r^k - Ay^k$ y la disponibilidad de stock $s^{k+1} = s^k - Ey^k$.

Paso final: Resolver el problema residual usando métodos como FDD o el método de Greedy.

CAPÍTULO II. DESCRIPCIÓN Y DIAGNÓSTICO

En el presente capítulo se describirá el funcionamiento de la empresa Ventanas y Estilos y el diagnóstico realizado para identificar la propuesta de mejora que genere mayor impacto en la organización.

2.1. Descripción general de la empresa

La empresa Ventanas y Estilos inició sus operaciones en el 2010 con la fabricación de ventanas de marcos de PVC presentando un crecimiento promedio anual del 61% y un crecimiento esperado para el 2014 del 35%. Actualmente, el 80% de las ventas de la empresa se encuentra constituida por su línea de productos de alta gama TecnoCom orientada a hoteles, casas de playa y viviendas con un valor superior a los 100 mil dólares²¹. Esta línea cuenta con 7 modelos diferentes clasificados según su mecanismo de apertura.

2.1.1. Sector económico

La empresa se encuentra ubicada en el rubro de accesorios para la construcción clasificado con el código CIU 2520 dentro del rubro de productos de caucho y plástico. Este sector ha presentado un crecimiento en su demanda de 2%²² impulsado por el crecimiento del sector construcción el cual ha acumulado un crecimiento promedio sostenido de 10.1% en los últimos 4 años, siendo su crecimiento en el 2013 de 8.4%. Además este sector presenta un desplazamiento de la demanda de viviendas con un valor menor a USD 80 mil hacia las de un valor comprendido entre los USD 80 mil a buscar simulaciones físicas 150 mil debido a un aumento del ingreso per cápita y a un incremento en el valor máximo de préstamo otorgado por el fondo Mi Vivienda²³.

²¹ G. Baldovino –Gerente de producción, entrevista personal, 22 de agosto de 2014.

²² INEI – Índice general materiales de construcción 2013

²³ BVVA Research – Situación inmobiliaria análisis económico 2013 pag.4

2.1.2. Misión, visión, y objetivos

A continuación se presentan la visión, misión y objetivos de la empresa.

a) Visión:

La empresa Ventanas y Estilos tiene como visión ser la empresa con mayor presencia del mercado nacional de fabricación y comercialización de ventanas y puertas con alto valor agregado.

b) Misión:

La misión de la empresa de Ventanas y Estilos es ser la empresa líder en comercialización de puertas y ventanas con alto valor agregado, satisfaciendo las necesidades de sus clientes, brindándoles un producto de calidad y con un excelente servicio.

c) Objetivos estratégicos:

La empresa ha definido los siguientes objetivos estratégicos para el año 2014:

- Incrementar sus ventas en un 20% en la línea TecnoCom
- Diversificar sus fuentes de ingresos añadiendo productos complementarios a la oferta ofrecida.
- Reducir sus costos mejorando sus procesos productivos.

2.1.3. Organización

La empresa cuenta con una distribución por áreas la cual se observa en el Gráfico 10.

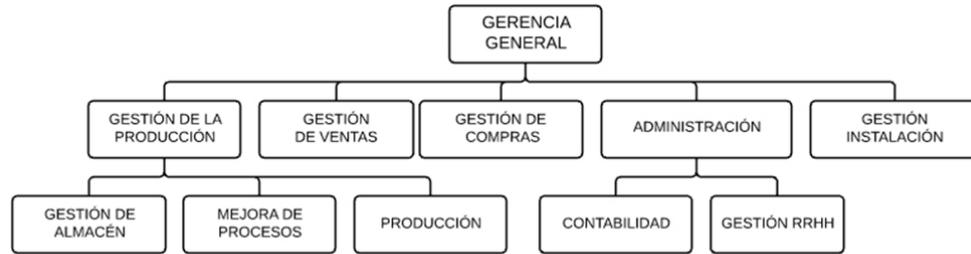


Gráfico 10 – Organigrama

Fuente: Empresa Ventanas y Estilos / Elaboración propia

El área de gestión de la producción: Encargada del control de la gestión de almacén y fabricación de puertas y ventanas. Además, tiene a su cargo el equipo de mejora continua.

El área de gestión de ventas: Es la responsable de realizar el contacto con el cliente y el levantamiento de los requerimientos de este. Además se encarga de la gestión de cobranza y la entrega del producto final.

El área de gestión de compras: Responsable de las compras locales e internacionales incluyendo la importación de perfiles y herrajes de países como Argentina y Colombia.

El área de gestión de instalaciones: Responsable de la instalación del producto terminado en la vivienda del cliente asegurando la calidad del producto final.

2.1.4. Descripción de los productos fabricados

La empresa posee 2 líneas de productos de PVC. La primera línea, TecnoCom se encuentra dirigida a viviendas, hoteles y casas de playa que deseen obtener un mayor aislamiento acústico y térmico comparado con otros materiales usados en la fabricación de ventanas (madera, aluminio). La segunda línea, Royal está orientada a campamentos mineros que desean un producto fácil de instalar y con un menor costo.

Todas las ventanas de la empresa están constituidas por 5 partes básicas según se observa en el Gráfico 11. El marco constituye la estructura básica de la ventana y presenta un refuerzo interior por medio de una barra de acero. La hoja contiene el vidrio y el sistema de apertura y puede ser móvil o fija dependiendo del requerimiento del cliente. El sello acústico está conformado por material plástico o felpa y permite un aislamiento térmico y acústico frente al exterior. El vidrio varía de acuerdo al espesor solicitado y el color elegido por el cliente. En caso de presentar una hoja móvil se cuenta con 7 tipos de sistemas de apertura que pueden ser aplicados según los requerimientos. Además se realizan combinaciones de distintos sistemas de apertura y el número de hojas por ventana varía según las especificaciones del cliente.

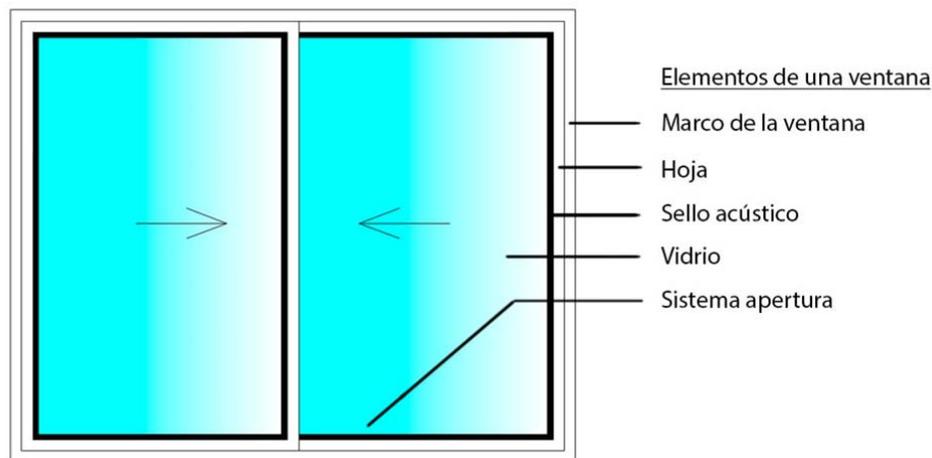


Gráfico 11 - Elementos de una ventana

Fuente: Empresa Ventanas y Estilos / Elaboración propia

A continuación se presentan los diferentes sistemas de apertura que ofrece la empresa en la línea de productos Tecnomon.

a) Ventanas fijas

No presentan sistema de apertura alguno. Están constituidas de un marco de PVC reforzado con acero en cada perfil para evitar su deformación por el peso del vidrio.

b) Ventanas / mamparas corredizas

Sistema de apertura con hojas que deslizan sobre su propio riel y que permiten la combinación de hojas móviles y fijas según se observa en el Gráfico 12.



Gráfico 12 - Ventana corrediza
Fuente: Ventanas y Estilos

c) Ventana Guillotina

Apertura cuya hoja móvil corre de abajo hacia arriba y su accionar está controlado gracias a dos compensadores como el que se observa en el Gráfico 13.



Gráfico 13 - Ventana Guillotina
Fuente: Ventanas y Estilos

d) Ventana Oscilo-batiente (doble contacto)

Mecanismo de apertura que permite la combinación de un sistema proyectante con uno batiente mediante el uso de herrajes de última generación como el que se observa en el Gráfico 14.



Gráfico 14 - Ventana Oscilo – batiente
Fuente: Ventanas y estilos

e) Ventana Proyectante (doble contacto)

Sistema que consiste en una hoja cuyo mecanismo de apertura al exterior es graduable al tipo de ventilación requerida como el que se observa en el Gráfico 15.



Gráfico 15 - Ventana Proyectante
Fuente: Ventanas y Estilos

f) Ventana Banderola (doble Contacto)

Sistema que consiste en una hoja cuyo mecanismo de apertura al exterior es graduable al tipo de ventilación requerida como el que se observa en el Gráfico 16.



Gráfico 16 - Ventana banderola

Fuente: Ventanas y Estilos

g) Ventana Batiente

Sistema de apertura batiente cuya hoja se abre desde un punto de pivote lateral según el Gráfico 17.



Gráfico 17 - Ventana batiente

Fuente: Ventanas y Estilos

2.1.5. Instalaciones y equipos

La empresa cuenta con una nave de 600 m² de los cuales 400m² está dedicado a producción según la Gráfica 18. Aparte existe un almacén de 200m² ubicado frente a la planta utilizado para conservar los perfiles de PVC de menor rotación y otros componentes necesarios para la fabricación de puertas y ventanas.

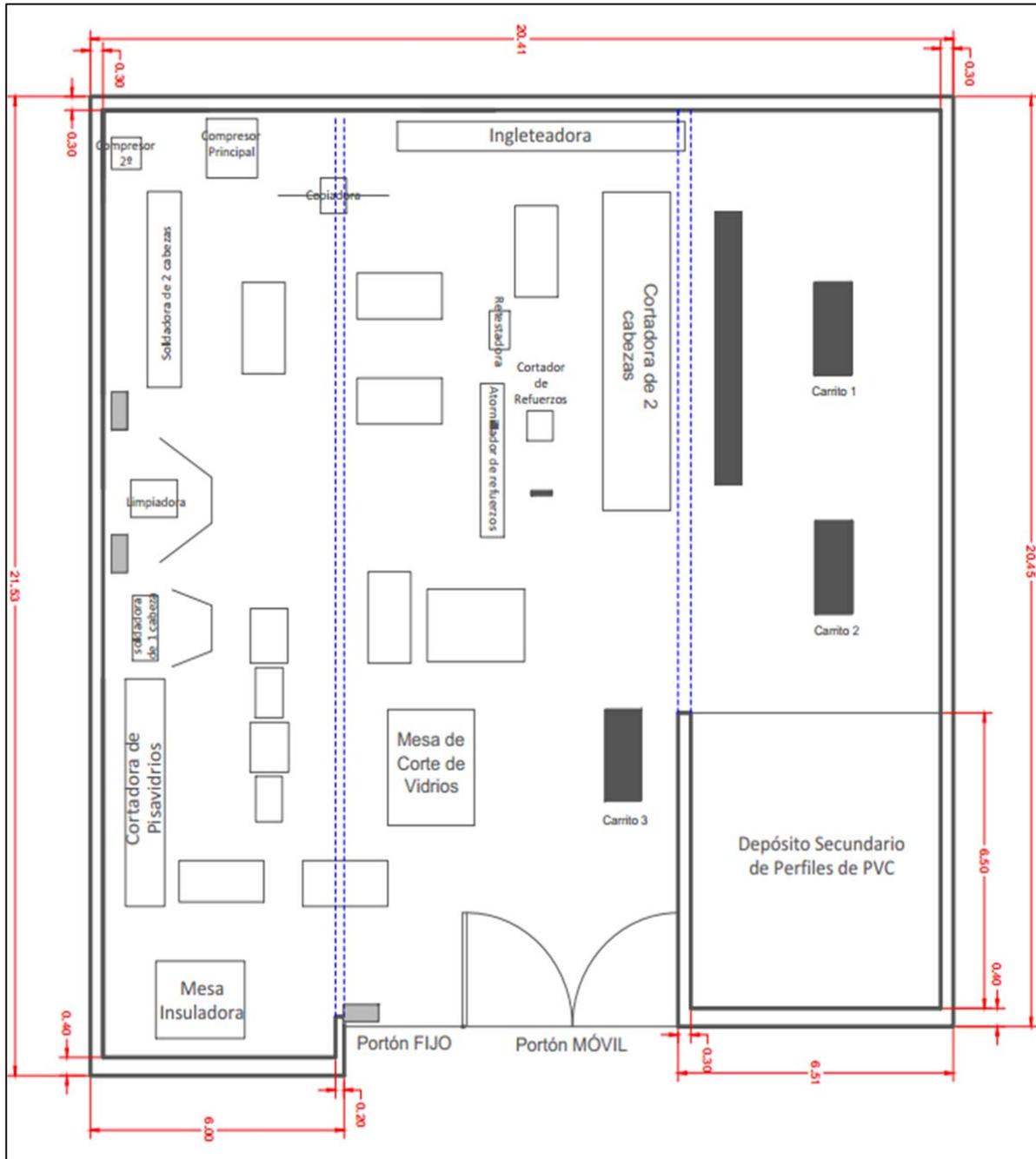


Gráfico 18 – Plano de la fábrica
Fuente: Ventanas y Estilos

2.2. Diagnóstico

Para poder definir claramente el proceso a mejorar en la organización es necesario definir los procesos de la empresa de manera sistemática para lo cual se emplean las siguientes etapas.

2.2.1. Mapa de procesos

El mapa de macro procesos de la empresa Ventanas y Estilos se encuentra descrito en el Gráfico 19.

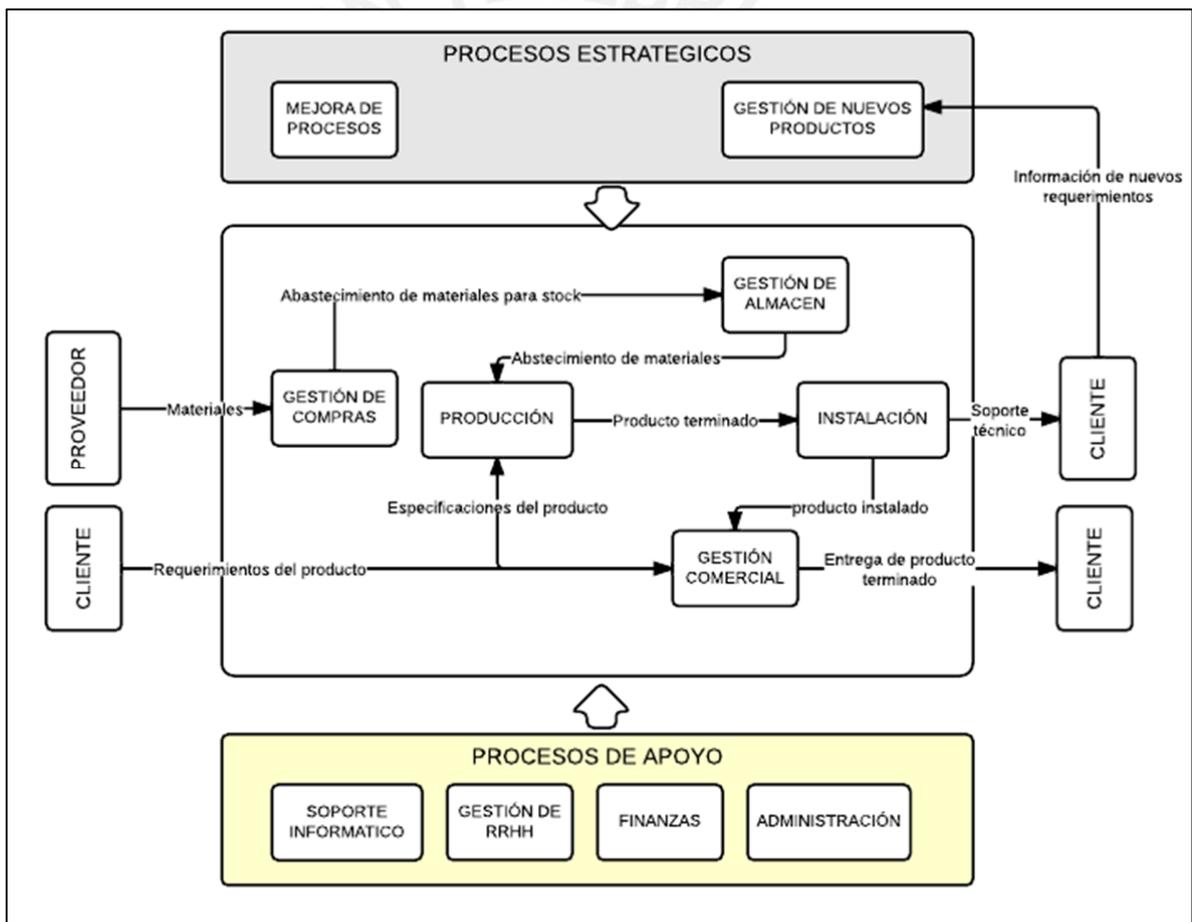


Gráfico 19 – Mapa de macro procesos de la empresa Ventanas y Estilos

Fuente: Elaboración propia

a) Gestión comercial

Se define como el proceso que recibe los requerimientos del cliente y los procesa para transformarlos en una propuesta de venta la cual a su vez se traduce en una orden de fabricación con las especificaciones de los productos requeridos. Además se encarga de realizar la entrega final al cliente del producto terminado y la cobranza.

Requerimientos principales relevados para la fabricación de una ventana:

- Cantidad de ventanas a fabricar por cliente
- Medidas del marco con una desviación máxima de 3mm. (Largo, ancho y profundidad).
- Modelo de ventana y modelo de cada hoja que la compone(material, sistema de apertura, tipo de vidrio, color de vidrio).

b) Gestión de compras

Es el proceso encargado de realizar la compra de materia prima e insumos de la empresa y tiene como proceso interno la gestión de compras internacionales encargada de importar la materia prima de Colombia, Argentina y Europa.

c) Instalación

Proceso de ensamblaje final del producto terminado en la vivienda o edificio del cliente y la verificación del producto ante posibles fallas de calidad.

d) Gestión de almacén

Proceso por el cual se abastece los requerimientos de producción de materia prima e insumos. Además tiene la función de coordinar con el área de compras para solicitar la compra de vidrios insulados, templados o con otra especificación que brinde el planificador de la producción.

e) Gestión de producción

Proceso responsable de recibir los requerimientos del cliente a través del área de gestión de ventas y convertirlo en productos terminados para ser entregados al área de instalación.

2.2.2. Priorización de procesos

a) Nivel 0 - Elección del macro proceso

Para determinar el proceso clave se utilizó la herramienta de la casa de la calidad de la metodología QFD como se muestra en la Tabla 1. Se obtuvo como resultado el macro proceso de gestión de la producción como el principal para realizar mejoras, además se observa que los procesos de gestión de compras y el proceso de instalaciones también presentan una importancia alta para los objetivos estratégicos de la organización.

Tabla 1- Matriz de objetivos estratégicos vs macroprocesos

MATRIZ OBJETIVOS ESTRATEGICOS VS MACROPROCESOS		PROCESOS PRINCIPALES												GRADO IMPORTANCIA GENERAL	INDICE DE MEJORA	PESOS ABSOLUTOS	
		GESTION DE COMPRAS		GESTIÓN DE LA PRODUCCIÓN			GESTIÓN COMERCIAL			INSTALACIÓN		GESTIÓN DE ALMACEN					
		COMPRAS INTERNACIONALES	COMPRAS DE MATERIA PRIMA NACIONAL	FABRICACIÓN	PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN	CONTROL DE CALIDAD	COBRANZAS	PUBLICIDAD	VENTA DIRECTA	INSTALACIÓN DEL PRODUCTO	SOPORTE POST VENTA	ABASTECIMIENTO DE LA PRODUCCIÓN	CONTROL DE STOCK				
OBJETIVOS ESTRATEGICOS	FINANCIEROS	Aumento de productividad	3	3	3	3	1	0	0	0	3	1	1	1	3	1	3.0
		Incremento de la rentabilidad	5	1	3	0	1	1	3	5	1	3	0	3	5	1.5	7.5
	OPERACIONAL	Reducir reclamos por calidad del producto	1	1	5	0	5	1	1	3	3	3	0	1	3	2	6.0
		Satisfacer el incremento de la demanda	5	1	5	3	1	0	1	1	5	3	3	3	5	2.5	12.5
		Reducir el tiempo de entrega del producto final	3	1	3	3	1	0	0	1	5	0	1	1	2	1.5	3.0
	APRENDIZAJE	Contar con personal polivalente	0	0	5	1	3	0	0	0	3	1	0	0	2	1.33	2.7
Automatizar procesos operativos		1	0	3	1	0	0	0	1	3	1	1	1	2	2	4.0	
		GRADO DE IMPACTO	128	38	158	62	64	14	41	75	132	88	48	76			
		GRADO DE IMPACTO POR PROCESO	166		285			130			220		124				
		VALOR DE IMPORTANCIA	3		1			4			2		4				

Elaboración propia

Una vez seleccionado el macro proceso de gestión de la producción se procedió a realizar un análisis más detallado mediante la elaboración del diagrama de proceso por el método SIPOC según se muestra en el Gráfico 20.

GESTIÓN DE LA PRODUCCIÓN

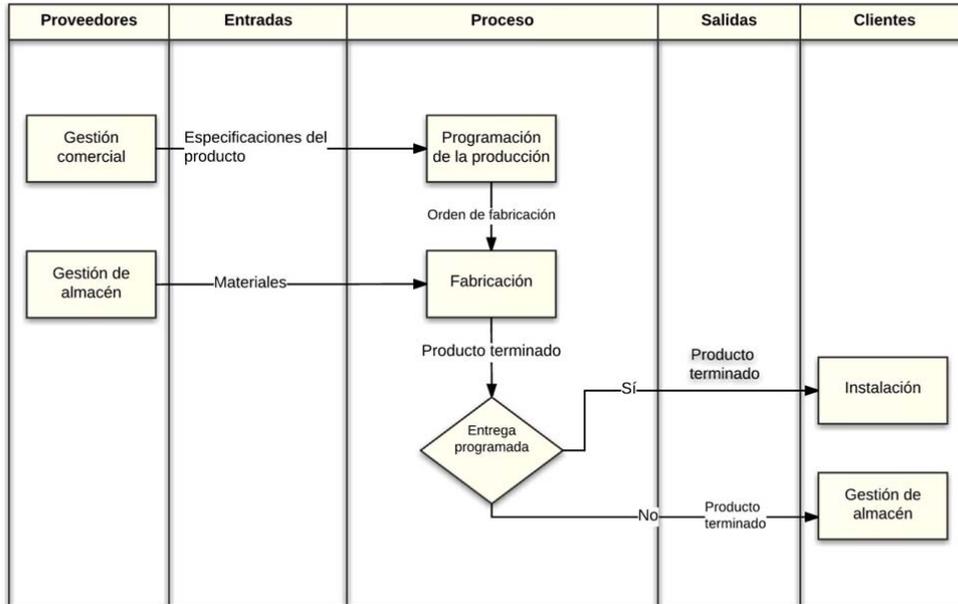


Gráfico 20 – Diagrama de proceso SIPOC
Elaboración propia

Del anterior gráfico se observa que el proceso de gestión de la producción presenta 2 procesos los cuales se encuentran estrechamente relacionados con los macro-procesos de gestión de almacén y gestión comercial.

b) Nivel 1 - Elección del proceso

Para refinar el proceso objetivo de mejora dentro del macroproceso de gestión de la producción se utilizó el método de la matriz de priorización como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2 - Matriz de priorización del proceso

Nombre del proceso	Criterios de priorización										Total	Prioridad
	Impacto indicadores del negocio		Costo		Dificultad técnica		Alineado con objetivos		Tiempo de implementación			
	30%	sub total	30%	sub total	10%	sub total	15%	sub total	15%	sub total		
Programación de la producción	2	0.6	4	1.2	2	0.2	2	0.3	4	0.6	2.9	3
Fabricación	4	1.2	2	0.6	4	0.4	4	0.6	2	0.3	3.1	1

Elaboración propia

De esta herramienta se obtuvo que el proceso objetivo de mejora con mayores perspectivas de aporte a la organización es el de **fabricación**, teniendo como segunda prioridad al proceso de control de calidad.

c) Nivel 2 - Elección del subproceso principal dentro de fabricación

Para detallar la elección del proceso se analizó los componentes del proceso de fabricación según se observa en el Gráfico 21.

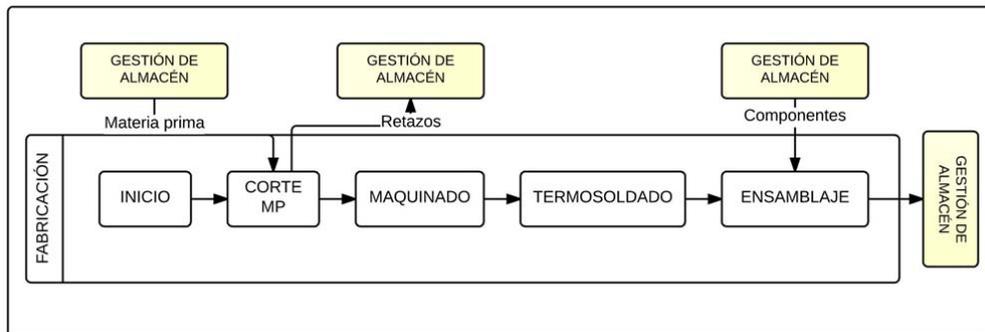


Gráfico 21 - Detalle del proceso de fabricación

Elaboración propia

Posteriormente, se realizó el análisis según la matriz para determinar el proceso de mejora con mayor posibilidad de impacto en la organización usando como criterios los sugeridos por el gerente de producción como se observa en la Tabla 3, determinándose como procesos con mayor probabilidad de impacto en la organización el proceso de corte de materia prima y el proceso de ensamblaje.

Tabla 3 - Matriz de evaluación de procesos de fabricación

EVALUACIÓN DE PROCESOS DE FABRICACIÓN	COSTO MEJORA	IMPACTO EN LA ORGANIZACIÓN	TIEMPO DE IMPLEMENTACIÓN	TOTALES
Corte de materia prima	3	1	5	15
Maquinado	3	3	5	45
Termosoldado	1	1	1	1
Ensamblaje	3	5	3	45

Elaboración propia

A. Nivel 3 – Actividades del proceso de fabricación línea Técnico

A continuación se presenta el flujograma de operaciones para el proceso de corte materia prima y para el proceso de maquinado.

El subproceso de corte de materia prima

El subproceso de corte se caracteriza por tener como entradas la hoja de fabricación enviada por el área de programación de la producción la cual describe el patrón de corte a seguir por cada ventana según se observa en la gráfica 23. Los tipos de materiales a cortar varían de acuerdo al modelo de la ventana y se encuentran clasificados según la tabla 4. Por otro lado el subproceso de corte presenta 5 etapas que se repiten hasta obtener todas las piezas del pedido programado según se observa en el Gráfico 22.

Tabla 4 – Relación de materiales requeridos en corte según modelo de ventana

COD MATERIALES BÁSICOS PARA UNA VENTANA POR MODELO							
MODELO	FIJA	CORREDIZA	BATIENTE	OSCILOBATIENTE	PROYECTANTE	GUILLOTINA	BANDEROLA
ELEMENTO VENTANA							
MARCO							
PERFIL DEL MARCO	PM101	PM201	PM301	PM401	PM501	PM601	PM701
REFUERZO DEL MARCO	PR101	PR201	PR301	PR401	PR501	PR601	PR701
HOJA							
PERFIL DE HOJA	PH101	PH201	PH301	PH401	PH501	PH601	PH701
PISAVIDRIO	PP101	PP201	PP301	PP401	PP501	PP601	PP701

Elaboración propia

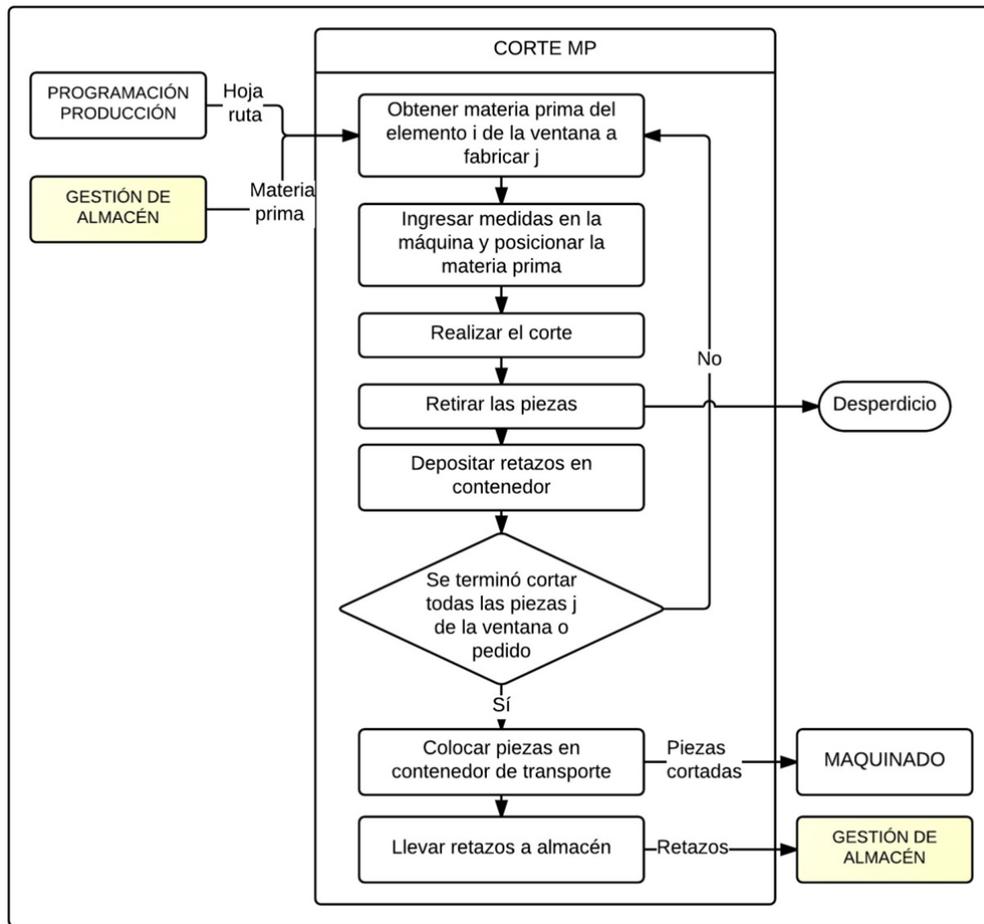


Gráfico 22- Detalle del proceso de corte
Elaboración propia

HOJA DE CORTE			
Fecha de impresión Página: 1	Datos Cliente: Cliente: CONSTRUCCIONES Y PROYECTOS URBANOS, S.A.	Presupuesto: 000004 00001	
PERFILES			
N° Barras		Resto (mm.)	Optim. (%)
M011127 / MARCO DE VENTANA			
Largo Barra: 6.000 mm.		Número de Barras: 4,00	
		Acabado: Ral Ral estandar 8025	
2	1000 1200 1200 1200 1200	112	98,13%
1	1000 1000 1000 1200 1200	512	91,47%
1	1000 1000 1000 1000 1000	912	84,80%
Desperdicio total 1,65 m.		Promedio Optim 93,13 %	
M011129 / HOJA DE VENTANA			
Largo Barra: 6.000 mm.		Número de Barras: 4,00	
		Acabado: Ral Ral estandar 8025	
1	954 954 954 954 954 954	181	96,98%
1	869 869 954 954 954 954	351	94,15%
1	869 869 869 869 869 869	691	88,48%

Gráfico 23 - Patrón de corte gráfico
Fuente: Ventanas y estilos

Como elementos de salida del proceso de corte se tienen desperdicios, retazos y componentes cortados listos para el proceso de maquinado. El desperdicio, obtenido inmediatamente después del proceso de corte se considera como desperdicio bruto y comprende todo el material que fue cortado y que no va a ser usado en la producción inmediata de una ventana. Luego de este proceso, el área de almacén procede a clasificar los desperdicios netos según la longitud obtenida. Para que el desperdicio bruto obtenido del corte un perfil se considere un desperdicio neto es necesario que su longitud no supere los 500 mm. En caso de tener una mayor longitud es considerado un retazo y el almacén procede a registrar su longitud y tipo en un archivo de Excel. Cabe resaltar que el software actual de optimización de corte no permite el uso de estos retazos en el cálculo de materiales requeridos, por lo cual son usados de manera ocasional (4% del total de pedidos) por el planificador de la producción cuando realiza el cálculo manual de requerimiento de materiales.

En cuanto a maquinaria el proceso de corte cuenta con 1 máquina semiautomática de 2 cabezales de corte simultáneo y 2 sierras de corte manual. En el primer caso, el operario programa la máquina con las medidas requeridas y retira la pieza cortada luego de finalizado el proceso. En el segundo caso el operario mide la pieza a cortar con una cinta métrica, realiza el corte y retira las piezas de la zona de corte.

El subproceso de ensamblaje

El subproceso de ensamblaje tiene como entradas los componentes de la ventana termosoldados, los accesorios de cada ventana, los sistemas de apertura y el sello acústico que puede ser de material plástico o felpa. Presenta 9 etapas según se aprecia en el Gráfico 24.

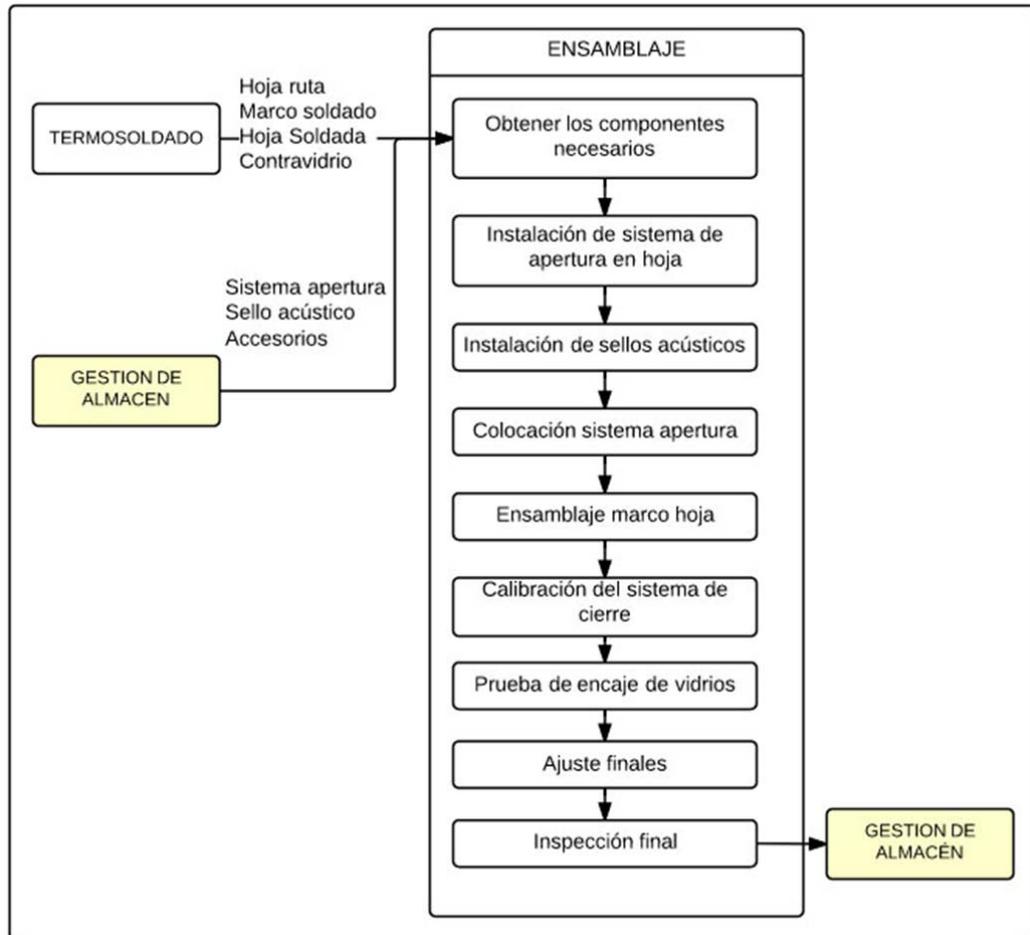


Gráfico 24 - Detalle del proceso de ensamblaje
Elaboración propia

En las seis primeras etapas se realiza el ensamblaje de la ventana según la hoja de fabricación, el manual brindado por el proveedor y la experiencia del trabajador. El proceso de instalación varía de acuerdo a tipo de sistema de apertura presente en la ventana.

Las tres últimas etapas consisten en pruebas que verifican la calidad del producto final. La prueba de encaje de vidrios verifica que el vidrio pueda ser colocado correctamente en el marco sin que exista un espacio mayor a 4 mm entre la

estructura de PVC y el vidrio. Los ajustes finales calibran el sistema de cierre con el vidrio y se aseguran de que el cierre hermético funcione correctamente. En la inspección final se evalúa la calidad del producto las características como acabado visual, funcionamiento de sistema de apertura y cierre, calidad de las juntas de termosoldado, presencia de accesorios completos y limpieza.

2.2.3. Indicadores del proceso

Para el proceso de fabricación de ventanas de la línea TECNOCOM se cuenta con los indicadores de la Tabla 5. Para los subprocesos de corte y ensamblaje los indicadores se encuentran descritos en la Tabla 6 junto con sus valores objetivos y valores promedio reales.

Tabla 5 - Indicadores del proceso de fabricación

INDICADORES DEL PROCESO DE FABRICACIÓN					
Nombre del indicador	Definición	Frecuencia medición	Fuente información	Nivel deseado	Nivel Actual
Ventanas fabricadas	Numero de ventanas fabricadas por cada uno de las 7 categorías	mensual	Programador de producción	100 unidades Técnico	105 mensual
Reclamos mensuales	Reclamos producidos en el mes por defectos de fabricación detectados por el cliente interno o externo	mensual	Cientes internos, externos	0 reclamos	3 mensuales
Horas hombre por ventana	Horas de fabricación utilizadas por ventana medidas para cada ventana según su tipo y línea	semanal	Jefe de producción	6 hh Max	6.8 HH

Elaboración propia

Tabla 6 - Indicadores del proceso de corte y ensamblaje

Nombre del indicador	Definición	Frecuencia medición	Fuente información	Nivel deseado	Nivel Actual
INDICADORES DEL SUBPROCESO DE CORTE					
Desperdicio bruto material	Metros lineales de desperdicio obtenidos	mensual	Producción	No establecido	1100 m
Despercio neto material	Kg de desperdicio mensual de MP	mensual	Producción	No establecido	52 Kg
Consumo mensual de retazos	Metros lineales de retazos ingresados a almacén	mensual	Almacén	No establecido	5% de lo obtenido
INDICADORES DEL SUBPROCESO DE ENSAMBLAJE					
Reclamos mensuales	Número de reclamos recibidos por falta de calibración del sistema de apertura	bimestral	Instalación	1	6
Reclamos mensuales	Número de reclamos por falta de componentes o accesorios	bimestral	Instalación	1	15

Elaboración propia

2.2.4. Identificación del problema

Para identificar los problemas se usó una lluvia de ideas con el responsable de la gestión de la producción, el encargado de almacén y el equipo de mejora continua. Los resultados se resumen en la Tabla 7.

Tabla 7- Lluvia de ideas para la identificación de problemas

LLUVIA DE IDEAS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE PROBLEMAS		
PROBLEMAS IDENTIFICADOS		
PROCESO DE FABRICACIÓN GENERAL	P1	Cambios de programación de producción repentinos
	P2	Reclamos por demora en el proceso general de fabricación
	P3	Falta de materia prima requerida para fabricación
SUBPROCESO DE CORTE	P4	Alto nivel de obtención de retazos y desperdicio de materia prima
	P5	Errores en la longitud cortada de materia prima
SUBPROCESO DE ENSAMBLAJE	P6	Alto número de reclamos por ensamblaje incorrecto
	P7	Reclamos del área de instalaciones por falta de accesorios
	P8	Reclamos por incorrecta instalación de sellos acústicos

Elaboración propia

2.2.5. Priorización de problemas

Para priorizar que problemas impactan más en la organización se utilizó un gráfico de Pareto (Gráfico 25) usando como eje vertical la frecuencia del problema multiplicado por la valorización económica de cada problema obtenido del juicio experto según se observa en la Tabla 8.

Luego del análisis se obtuvo como problemas con mayor impacto el alto nivel de obtención de retazos y desperdicios en el proceso de corte y el problema del alto número de reclamos recibidos por el ensamblaje incorrecto de las ventanas (80% de la valorización anual de los problemas del área esta comprendida en estos dos problemas).

Tabla 8 - Matriz para la elaboración de Pareto

MATRIZ PARA ELABORACIÓN DE PARETO					
ORDEN	PROBLEMAS IDENTIFICADOS	VALOR ECONÓMICO	FRECUENCIA ANUAL	RATIO ANUAL	% ACUMULADO
P4	Alto nivel de obtención de retazos (m) y desperdicio de materia prima (kg).	S./80 metro	2100	S/. 168,000	68%
		20 S./ kg	3500	S/. 70,000	
P6	Quejas por ensamblaje incorrecto	S/. 1,200	36	S/. 43,200	80%
P3	Falta de materia prima requerida para fabricación	S/. 1,200	20	S/. 24,000	87%
P1	Cambios de programación de producción repentinos	S/. 1,500	8	S/. 12,000	90%
P7	Quejas del área de instalaciones por falta de accesorios	S/. 1,500	8	S/. 12,000	93%
P2	Quejas por demora en el proceso general de fabricación	S/. 1,000	10	S/. 10,000	96%
P8	Quejas por incorrecta instalación de sellos acústicos	S/. 600	12	S/. 7,200	98%
P5	Errores en la longitud cortada de materia prima	S/. 120	48	S/. 5,760	100%

Elaboración propia

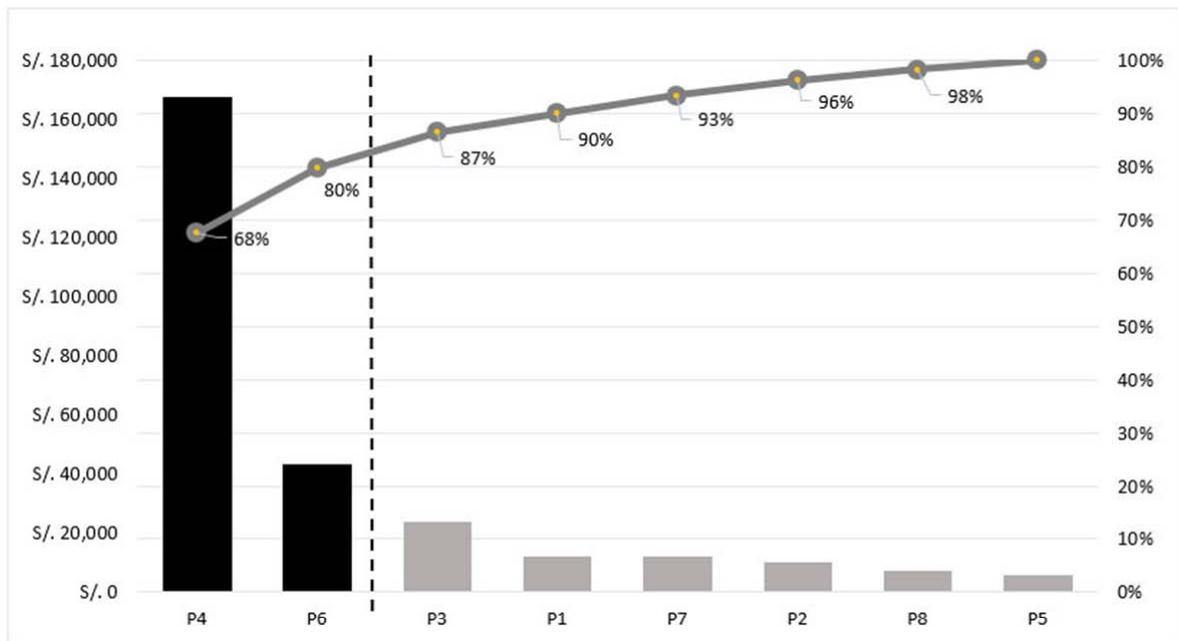


Gráfico 25 - Valorización de problemas impacto anual

Fuente: Elaboración propia

2.2.6. Identificación de causas

Se realizó un análisis de los dos problemas principales mediante el uso del diagrama de Ishikawa, la matriz de priorización de causas y la técnica de los 5 por qué en las principales causas identificadas.

A. Problema 1 – Alto nivel de obtención de retazos (m) y desperdicio de materia prima (kg).

Para la identificación y clasificación de las causas se utilizó la técnica del diagrama de Ishikawa según se observa en el Gráfico 26. Una vez identificadas las causas se realizó el análisis de estas mediante el uso de una matriz de priorización que tuvo como ratio el resultado de la multiplicación de la probabilidad por el impacto en la organización según la Tabla 9.

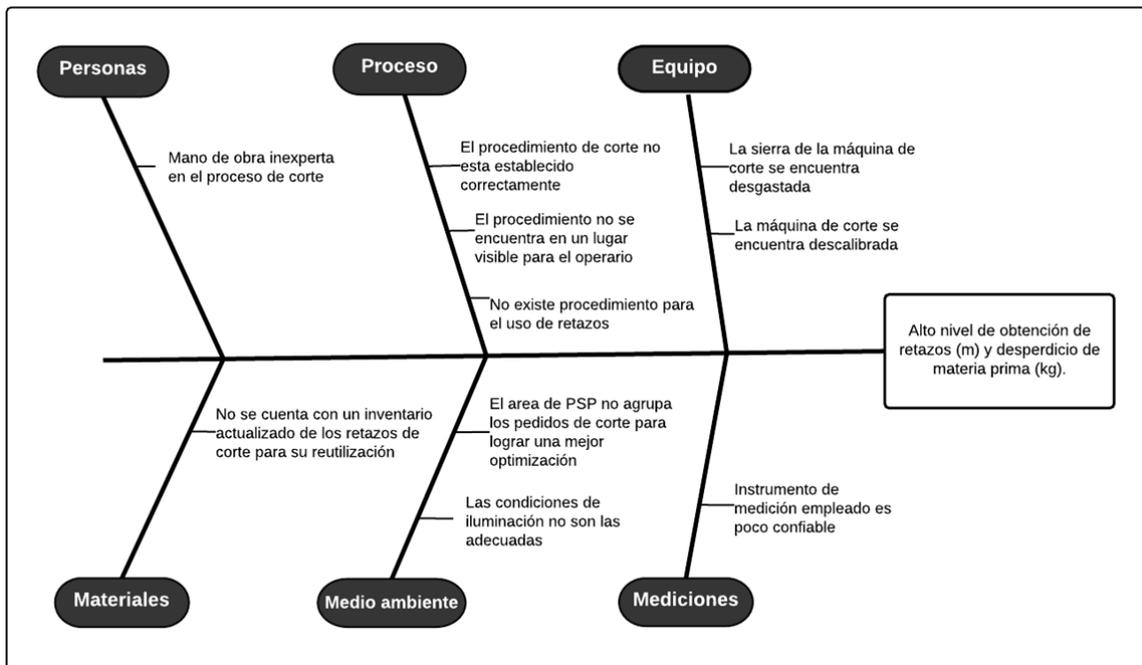


Gráfico 26 - Diagrama de Ishikawa – Alto nivel de obtención de retazos (m) y desperdicio de materia prima (kg).

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9 – Priorización de causas – Problema 1 desperdicio y obtención de retazos en el proceso de corte

ANÁLISIS DE CAUSAS - Alto nivel de obtención de retazos (m) y desperdicio de materia prima (kg) en el proceso de corte					
PROBLEMAS IDENTIFICADOS		PROBABILIDAD	IMPACTO	RESULTADO	ORDEN
C1	No se utilizan los retazos en el proceso de optimización de corte	5	5	25	1
C2	Los pedidos de corte no se agrupan para lograr una mejor optimización	5	5	25	1
C3	Mano de obra inexperta en el proceso de corte	3	5	15	3
C4	El procedimiento de corte no está establecido para cada escenario	5	3	15	3
C9	El procedimiento actual no establece el uso de retazos para requerimientos de piezas pequeños	5	3	15	3
C5	El procedimiento actual no se encuentra en un lugar visible para el operario	3	3	9	6
C7	Instrumento de medición usado es poco confiable	1	5	5	7
C10	La máquina de corte se encuentra descalibrada	1	5	5	7
C6	Las condiciones de iluminación no son las adecuadas	1	3	3	9
C8	La sierra de la máquina de corte se encuentra desgastada	1	3	3	9

Elaboración propia

Leyenda	
Prob o impacto	Valor
Baja	1
Media	3
Alta	5

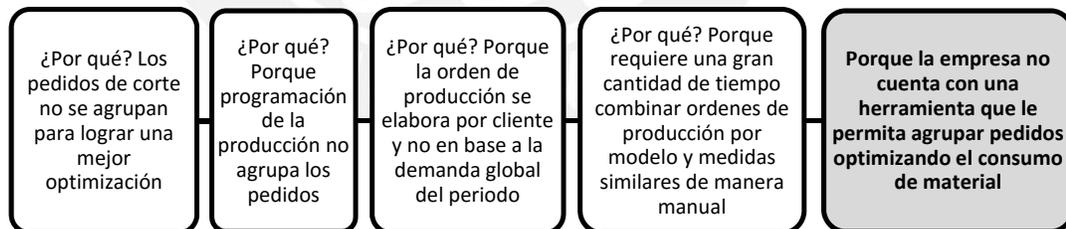


Gráfico 27 – Análisis 5 por qué – Falta de agrupación de los pedidos de corte

Fuente: Elaboración propia

Con la herramienta anterior se identifican 2 causas principales con un ratio de 25 puntos para el problema de desperdicio en el proceso de corte. Estas causas se proceden a analizar mediante la herramienta de los 5 porque según se aprecia en el gráfico 27 y el gráfico 28.

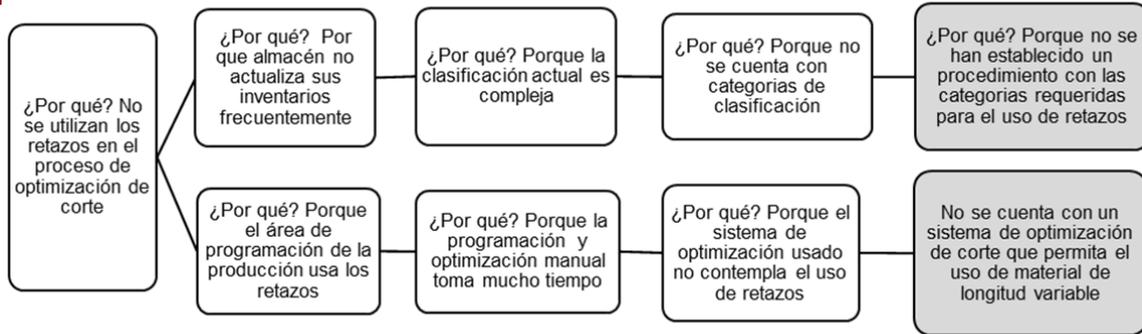


Gráfico 28- Análisis 5 por qué – Falta de utilización de retazos de corte
Fuente: Elaboración propia

B. Problema 2 – Alto número de reclamos por ensamblaje incorrecto

Para el problema de alto número de reclamos por ensamblaje incorrecto se emplearon las mismas herramientas empleadas para el problema 1 obteniéndose 9 causas iniciales según el diagrama de Ishikawa del gráfico 29. Luego se realizó la priorización de causas según la tabla 10 obteniéndose 1 causa con mayor impacto en el proceso de fabricación la cual fue analizada por el método de los 5 por qué en el gráfico 30.

Tabla 10 - Resumen problemas y causas raíz identificadas

ANÁLISIS DE CAUSAS - Alto número de reclamos por ensamblaje incorrecto					
CAUSA	DETALLE	PROBABILIDAD	IMPACTO	RESULTADO	ORDEN
C1	No se inspecciona correctamente el producto al final del ensamblaje.	5	5	25	1
C2	El vidrio no encaja correctamente en la hoja	3	5	15	2
C3	El procedimiento de ensamblaje es difícil de comprender	5	3	15	2
C4	Falta de accesorios al realizar el ensamblaje	2	5	10	4
C5	La hoja de ruta no indica todos los requerimientos necesarios	3	3	9	5
C6	El personal omite verificaciones	3	3	9	5
C7	No se han realizado los perforaciones de instalación en el producto final	5	1	5	7
C8	El personal no sigue las normativas de manipulación del producto	1	5	5	7
C9	El cliente ha modificado el lugar de instalación (vano) sin informar a la empresa	1	5	5	7
C10	Ventanas cortadas y soldadas con errores en las medidas	1	5	5	7
C14	Sello acústico cortado con las medidas erróneas	1	3	3	11
C12	Incorrecta instalación de sellos acústicos por falta de limpieza de rebaba en el proceso de	1	1	1	12
C13	Mano de obra inexperta	1	1	1	12

Elaboración propia

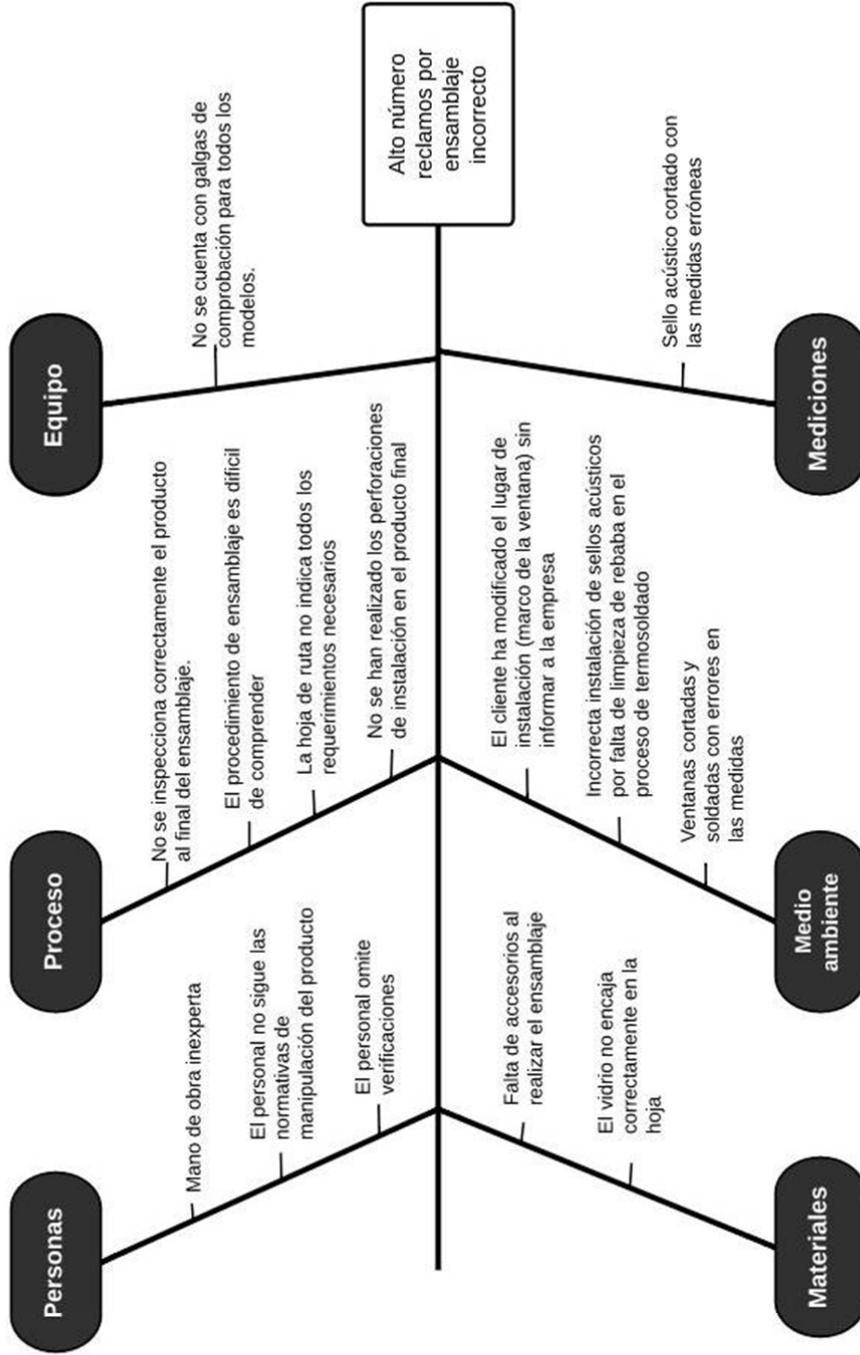


Gráfico 29 – Ishikawa Alto número de reclamos por ensamble incorrecto
 Fuente: Elaboración propia

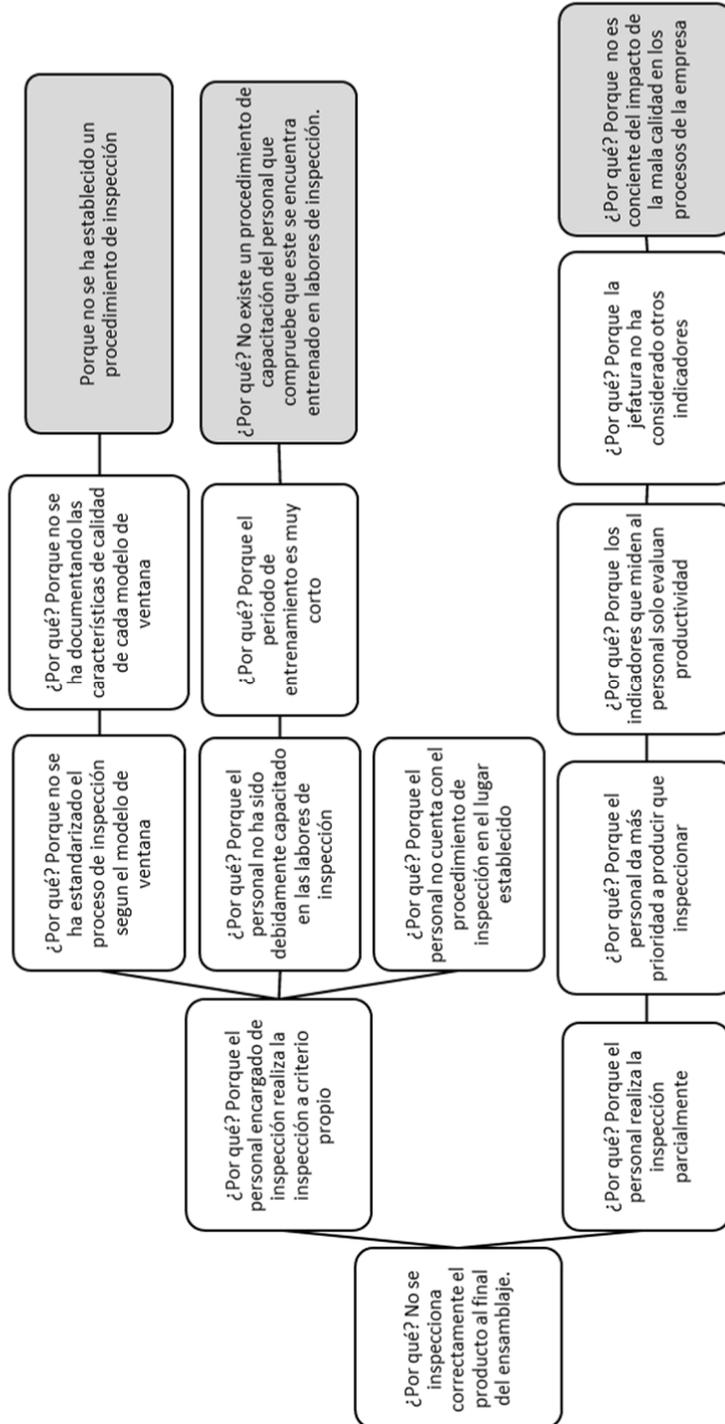


Gráfico 30 - 5 Por qué - Análisis de las razones por las cuales no se inspecciona correctamente el producto al final del proceso de ensamble

Fuente: Elaboración propia

La tabla 11 resume los problemas y las causas raíces identificadas en el anterior análisis.

Tabla 11 - Resumen problemas y causas raíz identificadas

PROBLEMA	CAUSA CON MAYOR (Pxi)	CAUSA RAIZ
P1 - Alto nivel de desperdicio en el proceso de corte de perfiles	C1 - No se utilizan los retazos en el proceso de optimización de corte	P2 - CR1 - No se cuenta con un sistema de optimización de corte que permita el uso de retazos (material de longitud variable). P2 - CR2 - No se ha establecido un procedimiento con las categorías requeridas para el uso de retazos
	C2 - Los pedidos de corte no se agrupan para lograr una mejor optimización	P2 - CR3 - La empresa no cuenta con una herramienta que le permita agrupar pedidos optimizando el consumo de material
P2 - Alto número reclamos por ensamblaje incorrecto	C1 - No se inspecciona correctamente el producto al final del ensamblaje.	P1 - CR1 - No se ha establecido un procedimiento de inspección para el producto.
		P1 - CR2 - No existe un procedimiento de capacitación del personal que compruebe que el personal esta entrenado en labores de inspección.
		P1 - CR3 - El personal no es consciente del impacto de la mala calidad en la cadena de procesos de la empresa

Elaboración propia

2.2.7. Contramedidas

Ante las causas raíces descritas en la tabla 11 se plantean las siguientes soluciones mediante una lluvia de ideas según se observa en la tabla 12.

Tabla 12 - Lluvia de ideas de contramedidas

PROBLEMA	CONTRAMEDIDA
P1 - Alto nivel de desperdicio en el proceso de corte de perfiles	Implementar un modelo de corte que permita utilizar retazos dentro del cálculo de optimización de materiales
	Establecer categorías de clasificación de retazos que permitan su uso posterior
	Implementar un modelo mejorado de corte de materiales que permita consolidar la demanda de materiales de varios pedidos y luego procesarlos por el algoritmo de corte
P2 - Alto número reclamos por ensamblaje incorrecto	Establecer un procedimiento de inspección del producto tomando en cuenta cada etapa del proceso y según los diversos modelos de la línea Tecnom
	Elaborar un procedimiento que permita capacitar y evaluar las habilidades del personal en determinado proceso.
	Realizar un estudio de costos que permita visualizar el impacto de la mala calidad en el proceso de producción.

Elaboración propia

PRIORIZACIÓN DE CONTRAMEDIDAS - MATRIZ FACTIS

CRITERIOS DE SELECCIÓN		FACTOR POND
F	Facilidad para implementarlo 1: Muy difícil 2: Difícil 3: Fácil	5
A	Afecta a otras áreas su implementación 1: Nada 2: Algo 3: Mucho	2
C	Mejora la calidad 1: Poco 2: Medio 3: Mucho	5
T	Tiempo que demanda su implementación 1: Largo plazo 2: Mediano plazo 3: Corto plazo	3
I	Inversión requerida 1: Alta 2: Media 3: Poca	3
S	Mejora la seguridad 1:Poco 2:Medio 3 Mucho	2

CONTRAMEDIDA	CRITERIOS						Puntaje Final
	F	A	C	T	I	S	
A	10	6	15	6	6	2	45
B	15	4	10	9	9	2	49
C	15	6	10	6	6	4	47
D	10	6	10	6	6	4	42
E	15	4	10	3	9	2	43
F	5	2	10	6	6	2	31

N	PUNTAJE	PRIORIDAD	DESCRIPCIÓN DE LA CONTRAMEDIDA
A	45	3	Implementar un modelo de corte que permita utilizar retazos dentro del cálculo de optimización de materiales
B	49	1	Establecer categorías de clasificación de retazos que permitan su uso posterior
C	47	2	Implementar un modelo mejorado de corte de materiales que permita consolidar la demanda de materiales de varios pedidos y luego procesarlos por el algoritmo de corte
D	42	5	Establecer un procedimiento de inspección del producto tomando en cuenta cada etapa del proceso y según los diversos modelos de la línea Tecnocon
E	43	4	Elaborar un procedimiento que permita capacitar y evaluar las habilidades del personal en el proceso de ensamblaje.
F	31	6	Realizar un estudio de costos que permita visualizar el impacto de la mala calidad en el proceso de producción.

Gráfico 31– Matriz FACTIS Contramedidas

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se evalúan las contramedidas encontradas mediante el uso de la matriz FACTIS según se observa en el gráfico 31. Con estos resultados se determina realizar las mejoras A, B y C por encontrarse relacionadas entre si y aportar un mayor impacto en la empresa.

CAPÍTULO III. DESARROLLO DEL MODELO

En el presente capítulo se describe el modelo base de corte con dos algoritmos de corte diferentes. El primer algoritmo simula la situación actual al estar restringido a optimizar un pedido por vez y requerir únicamente de materia prima virgen para satisfacer los pedidos. El segundo algoritmo, presenta la propuesta de mejora que flexibiliza estas restricciones permitiendo la consolidación de los requerimientos de materiales de varios pedidos antes de la optimización y el uso de retazos en el proceso de optimización.

Para modelar ambos escenarios y compararlos se empleó lenguaje de programación C# utilizando la librería de optimización de Microsoft Solver Foundation y el algoritmo de resolución de programación entera de Guroby.

3.1. El modelo base

En esta sección se presentan los datos comunes para ambos modelos y el modelo base de programación que se usará para simular ambos escenarios.

3.1.1. Datos de entrada

Para la elaboración del modelo base se utilizan los datos de producción del año 2014 y los parámetros de fabricación brindados por la empresa según se aprecia en la tabla 13 los cuales se encuentran detallados en el anexo 1 y 2.

Tabla 13 – Tipos de datos de entrada

DATOS DE ENTRADA		
VENTANAS A FABRICAR (Varia según el modelo de ventana)	STOCK DE MATERIA PRIMA (Varia según el tipo de MP)	STOCK DE RETAZOS (Varia según el tipo de MP y la longitud)
Modelo ventana	Cantidad	Cantidad
Componentes requeridos	Longitud base	Longitud
Dimensiones de ventana	Tipo de MP	Tipo de MP

Elaboración propia

3.1.2. Datos de salida

Los datos de salida del sistema se encuentran listados en la tabla 14. Estos datos serán usados en el siguiente capítulo para comparar el rendimiento de la solución propuesta en contraste con la situación actual.

Tabla 14 – Datos obtenidos del sistema

DATOS DE SALIDA		
PATRONES DE CORTE (Varia por cada patrón de corte)	STOCK ACTUALIZADO MP (Varia por cada tipo material)	INGRESO DE RETAZOS (Varia por cada tipo material)
Patron de corte	Tipo material	Tipo material
Tipo de material	Cantidad requerida	Cantidad ingresada
Longitud de MP	Longitud de MP	Longitud de MP*
Lista de longitudes de corte		
SALIDA DE RETAZOS (Varia por cada tipo material)	DESPERDICIO (Varia por cada tipo material)	
Tipo material	Tipo material	
Cantidad retirada	Metros lineales	
Longitud de MP*	Longitud de MP*	

Elaboración propia

3.1.3. El proceso base de optimización

El proceso base de optimización base para ambos modelos consiste en el tres módulos principales según se aprecia en el gráfico 32. El primer módulo se encarga del cálculo de requerimientos de material mediante el proceso de explosión de materiales de cada ventana. El segundo módulo consiste en la obtención de un patrón de corte óptimo para una barra de materia prima. El tercer módulo consiste en el uso de este patrón cortando barras de materia prima hasta que la demanda de alguna de las piezas obtenidas este satisfecha o que se agote el tipo de materia prima usado. Las variaciones del modelo de corte actual versus el propuesto se producen en los procesos internos de los módulos 1 y 2.

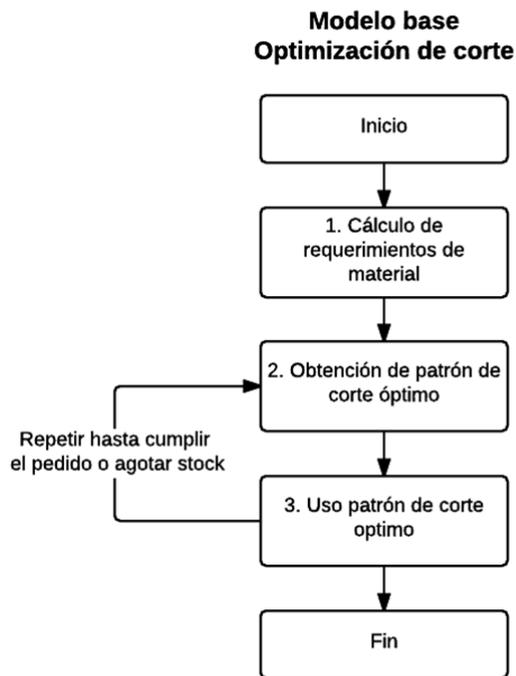


Gráfico 32 – Esquema del modelo base de optimización de corte
Fuente: Elaboración propia

3.1.4. Algoritmo de obtención de un patrón de corte óptimo para una longitud de materia prima L

Tanto para el modelo de corte de la situación actual como para el modelo propuesto se emplea el mismo algoritmo base para obtener un patrón de corte óptimo por cada barra de material usado. La mejora se observa en la forma en que se utiliza este algoritmo dentro del módulo 2 – Obtención de un patrón de corte óptimo y en los cambios de los procesos del módulo 1 – Cálculo de los requerimientos de material.

El algoritmo para obtener un patrón de corte óptimo para una longitud de materia prima L toma como datos de entrada la longitud de una materia prima, el stock de material y la demanda residual de piezas a cortar(cantidad requerida y longitud). Este último término se define como la demanda restante luego de obtener las piezas cortadas en el proceso del módulo 3 Uso de patrón de corte óptimo.

El algoritmo de corte usado esta basado en el algoritmo de Greedy descrito en el capítulo 1.

VARIABLES DE DECISIÓN

Se define como variable de decisión entera positiva X_i la cual representa la cantidad de piezas de longitud demandada i , $i = 1..N$ a obtenerse en el corte de la materia prima actual. Donde N es la cantidad de longitudes diferentes de piezas a cortar contenidas en la demanda residual. Se define también al vector $P = \{X_1, X_2, \dots, X_i\}$ también llamado patrón de corte óptimo como el conjunto de variables X_i usado en una optimización.

PARÁMETROS DEL MODELO

Se establecen como parámetros del modelo:

- L = La longitud de la materia prima base
- xl_i Las longitudes de la demanda residual $i = 1 \dots N$
- cl_i Las cantidades de la demanda residual para cada longitud $i = 1 \dots N$

FUNCIÓN OBJETIVO

La función objetivo consiste en maximizar el uso de la barra de materia prima según la siguiente expresión.

$$\text{Maximizar } \sum_{i=1}^N X_i * xl_i$$

RESTRICCIONES

Existen 2 tipos de restricción. La primera asegura que la suma de las longitudes de las piezas a cortar no exceda la longitud de la barra de material.

$$\sum_{i=1}^N X_i * xl_i \leq L$$

El segundo es un set de restricciones que verifica que la cantidad cortada de una longitud determinada no exceda la demanda residual para esa longitud.

$$\text{Para cada } i, X_i \leq cl_i$$

RANGO DE EXISTENCIA

Las variables de corte deben ser enteras y pertenecen a los reales positivos.

3.1.5. Algoritmo de obtención de un patrón de corte óptimo para una longitud de materia prima L en lenguaje C#

A continuación se presenta el código usado para la implementación del algoritmo de corte en language de programación c#.

La función `ObtenerPatronCortePorLongitud` es el centro del módulo de obtención de un patrón de corte óptimo y es el que finalmente se encarga de determinar el patrón de corte optimo para una longitud de materia prima optimizando su uso. Presenta como datos de entrada un parámetro continuo `LongitudBarras` el cual especifica la longitud de la barra de materia prima a optimizar y la lista de requerimientos de corte con la cantidad y longitud requerida de cada pieza. Las líneas 1-3 crean los objetos base para el funcionamiento del sistema. Las líneas 4 - 5 crean las variables de decisión enteras no negativas `DecisionCorte` las cuales indican cuantas unidades de longitud x se deben cortar. La línea 6 - 11 declara el objetivo como la maximización de la suma de cada variable entera `DecisionCorte` multiplicado por la longitud demandada `LongitudReq`. Las líneas 12-17 añade las restricciones que consisten en asegurar que se debe cortar como máximo la cantidad demandada de piezas x en el patrón de corte actual, previniendo así el sobreabastecimiento de la demanda. Las líneas 18-19 añaden la restricción de que las piezas usadas en el corte no deben sobrepasar la longitud de la materia prima base. La línea 20 -21 llama al algoritmo de resolución de problemas enteros interno y crea el set de variables para almacenar la respuesta. Las líneas 22-27 verifican que la solución obtenida sea óptima y asignan los valores de la decisión de corte al objeto `Cortes` el contiene al vector $P = \{X_1, X_2, \dots, X_i\}$ y el valor del desperdicio se asigna a la variable `Desperdicio`.

```
private Dictionary<RequerimientosMP, int> ObtenerPatronCortePorLongitud(
double LongitudBarras, IEnumerable<RequerimientosMP> ReqMPTipo)

1.  { SolverContext context = SolverContext.GetContext();
2.  context.ClearModel();
3.  Model model = context.CreateModel();
4.  var decisions = ReqMPTipo.Select(it => new
Decision(Domain.IntegerNonnegative, it.ReqNombre));
5.  model.AddDecisions(decisions.ToArray());

6.  var objective = new SumTermBuilder(decisions.Count());
7.  foreach (var Requerimiento in ReqMPTipo)
8.  { var DecisionCorte = model.Decisions.First(
9.    it => it.Name == Requerimiento.ReqNombre);
```

```

10.     objective.Add(DecisionCorte * Requerimiento.LongitudReq); }
11.     model.AddGoal("Utilizacion", GoalKind.Maximize,
                objective.ToTerm());

12.     var PiezasBarra = new SumTermBuilder(decisions.Count());
13.     foreach (var Requerimiento in ReqMPTipo)
14.     { var DecisionCorte = model.Decisions.First(
15.       it => it.Name == Requerimiento.ReqNombre);
16.     PiezasBarra.Add(DecisionCorte * Requerimiento.LongitudReq);
17.     model.AddConstraints("RDemandaC" + Requerimiento.ReqNombre,
                DecisionCorte <= Requerimiento.CantidadReq); }

18.     var RestriccionLongMP = PiezasBarra.ToTerm() <= LongitudBarras;
19.     model.AddConstraint("LongitudMP", RestriccionLongMP);

20.     var solution = context.Solve();
21.     var Cortes = new Dictionary<RequerimientosMP, int>();

22.     if (solution.Quality == SolverQuality.Optimal)
23.     { foreach (var Requerimiento in ReqMPTipo)
24.       { var DecisionCorte = model.Decisions.First(it => it.Name ==
                Requerimiento.ReqNombre);
25.       Cortes.Add(Requerimiento, (int)DecisionCorte.ToDouble());}}

26.     Desperdicio = LongitudBarras - solution.Goals.First().ToDouble();
27.     return Cortes; }

```

3.1.6. Supuestos de ambos modelos

Para reducir la complejidad del proceso de corte real se toman como base las siguientes premisas

- Tanto para el modelo actual como para el modelo propuesto se trabaja con 7 modelos de ventanas rectangulares estándares. No se incluyen los casos especiales de fabricación de ventanas con formas diferentes o con medidas de longitud extraordinaria (mayor a 6 metros de largo).
- Se asume 4 tipos de materia prima para la fabricación de ventanas las cuales pueden presentarse en forma de materia prima virgen o retazos con lo que se reduce la complejidad del modelo sin afectar los resultados de comparación entre el modelo actual y el modelo mejorado.
- Para la agrupación de pedidos del modelo propuesto se trabaja con un periodo fijo de 7 días calendario. En la realidad este periodo oscila entre los 3 a 12 días.

3.2. El modelo de corte actual

El proceso de corte actual se encuentra descrito en el capítulo 2.2 sin embargo no se explica el proceso anterior que realiza el área de programación de la producción para la obtención de la hoja de fabricación con los patrones de corte. En los siguientes puntos se explicará con mayor detalle el proceso de elaboración de esta hoja desde que se ingresa la orden de producción al sistema hasta que se obtiene la hoja de fabricación.

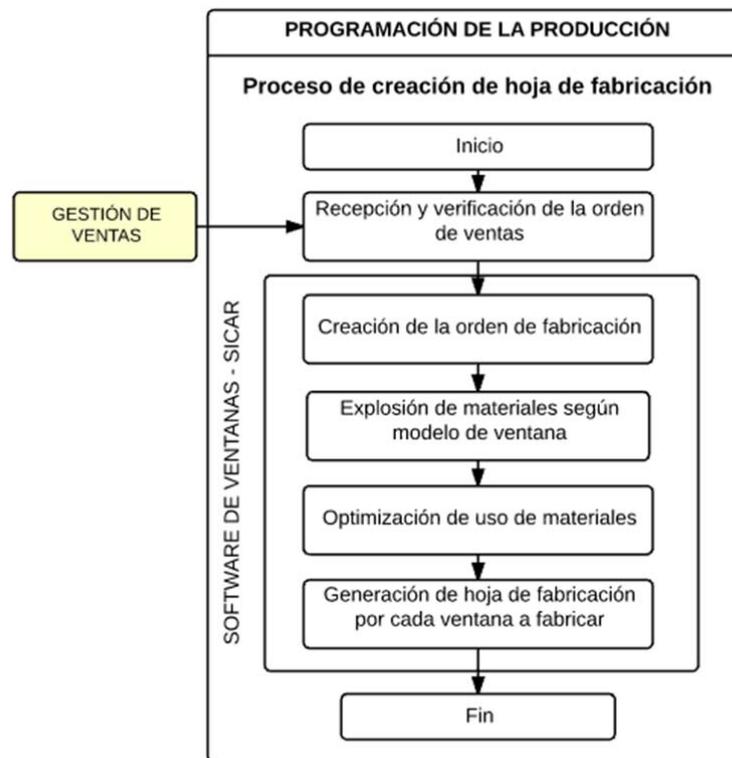


Gráfico 33 – Proceso de creación de hoja de fabricación
Fuente: Elaboración propia

Como se observa en el gráfico 33 el proceso de creación de la hoja de fabricación inicia con la recepción de la orden de ventas enviada con los detalles de cada ventana a fabricar, el nombre del cliente y las observaciones del pedido. Posteriormente, se procede a ingresar estos datos al sistema el cual registra la orden de fabricación y realiza la explosión de materiales por cada ventana según su

modelo, obteniéndose una lista con las longitudes, cantidades y tipos de materia prima requeridos como se observa en la tabla 15.

Tabla 15 – Requerimientos de materiales

REQUERIMIENTOS DE MATERIALES			
ORDEN FAB 001 CLIENTE 101			
DESCRIPCIÓN	TIPO MATERIAL	CANTIDAD REQ	LONGITUD
VENTANA FIJA 1			
MARCO	PM101	2	2.8
MARCO	PM101	2	3.2
HOJA	PH101	2	2.5
HOJA	PH101	2	3
PISAVIDRIOS	PP101	2	2.5
PISAVIDRIOS	PP101	2	3
VENTANA CORREDIZA 1			
MARCO	PM201	2	4.2
MARCO	PM201	2	2.2
HOJA	PH201	2	4
HOJA	PH201	2	2
PISAVIDRIOS	PP201	2	4
PISAVIDRIOS	PP201	2	2

Elaboración propia

3.2.1. Cálculo actual de los requerimientos de material

El sistema actual permite realizar la explosión de materiales y optimización por cada cliente, sin embargo no permite combinar los pedidos de varios clientes para obtener una sola lista de materiales requeridos para enviarlos al proceso de optimización de corte. Esto ocasiona un mayor desperdicio de material como se puede observar en el ejemplo de la tabla 16 en comparación con la tabla 17.

La tabla 16 presenta un requerimiento de optimización de materiales para 2 ventanas fijas de clientes diferentes. Se realizan 2 procesos de optimización uno por cada clientes y se obtiene un desperdicio total de 6 metros y un consumo de materia prima de 5 barras. En comparación, la tabla 17 muestra el resultado del proceso de optimización propuesto el cual agrupa los requerimientos de materiales de ambos clientes y realiza un solo proceso con el cual se obtiene un consumo 5 barras y un desperdicio total nulo.

Tabla 16 – Ejemplo de la situación actual

VENTANA 1		
REQUERIMIENTO	LONGITUD	CANTIDAD
pieza marco	5 metros	2
pieza marco	4 metros	2

VENTANA 2		
REQUERIMIENTO	LONGITUD	CANTIDAD
pieza marco	1 metro	2
pieza marco	2 metros	2

Optimización realizada	
Materia prima	Piezas obtenidas
Barra 1	1 pieza 5 metros
Barra 2	1 pieza 5 metros
Barra 3	1 pieza 4 metros
Barra 4	1 pieza 4 metros
Desperdicio	6 metros

Optimización realizada	
Materia prima	Piezas obtenidas
Barra 1	2 piezas 2 metros
Barra 1	2 piezas 1 metro
Desperdicio	0 metros

Total de materia prima usada:	5 barras
Desperdicio total:	6 metros

*Cada barra mide 6 metros de largo

Elaboración propia

Tabla 17 – Ejemplo de la situación propuesta

VENTANA FIJA 1 - CLIENTE A		
REQUERIMIENTO	LONGITUD	CANTIDAD
pieza marco	5 metros	2
pieza marco	4 metros	2

VENTANA FIJA 2 - CLIENTE B		
REQUERIMIENTO	LONGITUD	CANTIDAD
pieza marco	1 metro	2
pieza marco	2 metros	2

Optimización realizada	
Materia prima	Piezas obtenidas
Barra 1	1 pieza 5 metros, 1 pieza 1 metro
Barra 2	2 pieza 5 metros, 1 pieza 1 metro
Barra 3	1 pieza 4 metros, 1 pieza 2 metros
Barra 4	2 pieza 4 metros, 1 pieza 2 metros
Desperdicio	0 metros

Total de materia prima usada:	4 barras
Desperdicio total:	0 metros

*Cada barra mide 6 metros de largo

Elaboración propia

3.2.2. Obtención de un patrón de corte óptimo

Luego de la explosión de materiales se procede realizar la optimización de materiales mediante el proceso descrito en el gráfico 34.

la cantidad requerida del material j para la ventana i . El subproceso 2 utiliza el algoritmo de corte presentado en el punto 3.1.4 usando como datos de entrada la longitud de la materia prima virgen y las cantidades de material requerido por cada longitud. Este proceso no contempla la reutilización de la materia prima en forma de retazos para optimizaciones posteriores debido a que el algoritmo actual solo acepta una longitud por tipo de materia prima. El subproceso 4 utiliza el patrón de corte obtenido para cortar una barra de materia prima a la vez hasta satisfacer la demanda o agotar el stock.

Resumen de deficiencias clave del modelo actual:

- A. Solo permite la optimización de materiales usando materia prima virgen ya que no permite el uso de retazos por tener diferentes longitudes para un mismo tipo de materia prima.
- B. Solo permite realizar la explosión de materiales para optimización de corte por cada pedido y no por un conjunto de pedidos.

3.2.1. El proceso de corte actual en lenguaje C#

El proceso de corte actual en lenguaje C# presenta los 5 módulos. El primer módulo esta encargado de llamar a los demás modulos de manera consecutiva y permitir el intercambio de datos a través de los módulos. Las líneas 3-6 invocan al módulo de calculo de requerimientos de material. La línea 7 genera un identificador para asignarle al proceso de optimización actual. La línea 8 y 9 llaman a los módulos de proceso de corte actual y guardado de resultados respectivamente.

```

1.     public void ProcesoActualOptimizacionMateriales ()
2.
3.     {   CalculoActualRequerimientosMaterial Requerimientos = new
         CalculoActualRequerimientosMaterial();
4.     Requerimientos.CalcularRequerimientos();
5.     ReqmaterialBruto = Requerimientos.ReqmaterialBruto;
6.     tiposMPpresentes = Requerimientos.tiposMPpresentes;
7.     GrupoOptimizacion = Guid.NewGuid();
8.     ProcesoCorteActual();}

```

El segundo módulo representa el proceso general de corte y sirve para repetir los módulos 3-5 hasta cumplir con la demanda. Las líneas 2-3 obtienen los pedidos o proyectos de fabricación que contienen las ventanas que se desea optimizar. La línea 4 ejecuta las líneas 5-11 por cada proyecto *i* contenido en el grupo de proyectos a optimizar. La línea 5 recupera los requerimientos de material para el proyecto en cuestión. La línea 6 ejecuta por cada tipo de material *j* presente en el proyecto el código de las líneas 7-10. La línea 7-8 filtran los requerimientos de material de forma que solo se obtenga los requerimientos para el tipo de material *j* del proyecto *i*. La línea 9 obtiene el stock actual del material *j*. La línea 10 ejecuta el algoritmo de corte actual teniendo como datos de entrada los requerimientos de corte para el tipo de material *j* y el stock actual de este material.

```

1. private void ProcesoCorteActual()
2.     { ContextoDB db = new ContextoDB();
3.     var Proyectos = db.VentanasProduccion.Where(c =>
c.EstadoProduccion == EstadoProduccion.Programar && (
        c.EstadoOptimizacion == Optimizar.Por_Optimizar
|| c.EstadoOptimizacion == Optimizar.Re_optimizar)).GroupBy(c =>
c.RegistroProyectoId).Select(
        c => new { RegistroId =
c.FirstOrDefault().RegistroProyectoId, });
4.     foreach( var Proyecto in Proyectos)
5.     { var RequerimientoMaterialProyecto = ReqmaterialBruto.Where(c =>
c.ProyectoId == Proyecto.RegistroId);
6.     foreach (var MPId in tiposMPpresentes)
7.     {
8.         ContextoDB dbo = new ContextoDB();
9.         IEnumerable<RequerimientosMP> ReqMPTipo =
RequerimientoMaterialProyecto.Where(c => c.MateriaPrimaId == MPId);
10.        IEnumerable<StockMP> StockMPActual = dbo.StockMPs.Where(c =>
c.CodMP == MPId);
11.        AlgoritmoCorteActual(ReqMPTipo, StockMPActual);
12.    } } }

```

El tercer módulo consiste en el proceso de algoritmo de corte actual. El proceso inicia en la línea 2 realizando de manera iterativa el código de las líneas 3-13 hasta que no exista demanda de piezas a cortar del material *j*. La línea 3 llama al módulo 4 que se encarga de obtener un patrón de corte óptimo. La línea 4 obtiene el objeto que contiene la materia prima para proceder a realizar el corte de esta. La línea 5 establece el valor de la demanda por default como verdadero. La línea 6 ejecuta las líneas 7-8 hasta cumplir con la demanda o agotar el stock de materia

prima. La línea 7 actualiza el stock de materia prima removiendo 1 unidad del stock. La línea 8 ejecuta el módulo 5 – Usar el patrón de corte óptimo.

```

1. private void AlgoritmoCorteActual(IEnumerable<RequerimientosMP>
   ReqMPTipo, IEnumerable<StockMP> StockMPActual)
   {
2. while (ReqMPTipo.Any(c => c.CantidadReq > 0))
   {
3. Dictionary<RequerimientosMP, int> PatronOptimo =
   ObtenerPatronCorteOptimo(StockMPActual, ReqMPTipo);

4. StockMP MaterialCorteActual = StockMPActual.Single(c => c.StockMPId
   == MpCortadoID);
5. Demanda = true;
6. while (MaterialCorteActual.Stock > 0 && Demanda == true)
   {
7. MaterialCorteActual.Stock -= 1;
8. ReqMPTipo = UsarPatronCorteOptimo(PatronOptimo, ReqMPTipo);
   }
   }
  
```

El módulo 4 se encarga de obtener un patrón de corte óptimo. La línea 2 inicia la variable desperdicio en 0. La línea 3-4 obtiene el valor de la longitud de la materia prima virgen a optimizar. La línea 5 ejecuta el código `ObtenerPatronCortePorLongitud` cuyo funcionamiento se encuentra descrito en el punto 3.1.4. Este código permite obtener un conjunto de variables con las cantidades de piezas a cortar de cada tipo de longitud demandada el cual es almacenado en la matriz `VariablesCorteOptimo`

```

1. private Dictionary<RequerimientosMP, int>
   ObtenerPatronCorteOptimo(IEnumerable<StockMP> DetalleMP,
   IEnumerable<RequerimientosMP> ReqMPTipo)
   {
2. Desperdicio = 0;
3. StockMP MPNueva = DetalleMP.First(c => c.Clasif == clasif.NUEVO);
4. double LongitudBarrasMP = MPNueva.Medida;

5. VariablesCorteOptimo =
   ObtenerPatronCortePorLongitud(LongitudBarrasMP, ReqMPTipo);

6. return VariablesCorteOptimo;}
  
```

3.3. El modelo de corte propuesto

El modelo propuesto modifica el flujo de trabajo del modelo actual para incluir dos mejoras enfocadas en solucionar las dos causas raíz encontradas para el problema de un alto nivel de desperdicios y obtención de retazos.

Consolidación de la demanda

La primera mejora consiste en agrupar los requerimientos de material varios pedidos antes de realizar el proceso de optimización de corte con el fin de brindarle más opciones al algoritmo y así reducir el desperdicio obtenido. El conjunto de pedidos a agrupar en un mismo proceso de optimización se caracteriza por haber sido programado para producción en una misma semana de trabajo. El gráfico 35 muestra el proceso propuesto para la consolidación de la demanda.

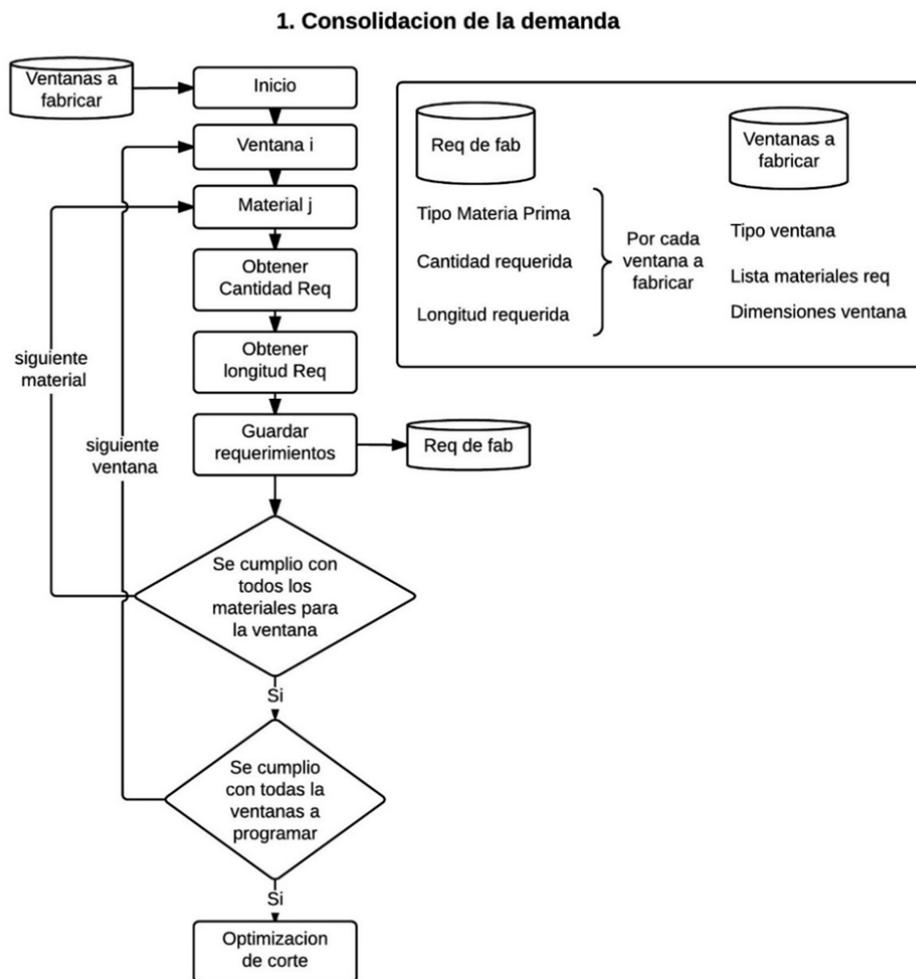


Gráfico 35 – Flujograma modelo propuesto consolidación de la demanda

Fuente: Elaboración propia

Optimización de corte

La segunda mejora consiste en utilizar los retazos de perfiles almacenados y la materia prima virgen mediante el uso de un algoritmo de optimización de corte mejorado. Debido a que los retazos pueden presentar longitudes variadas se ha propuesto una clasificación de estos en 6 categorías según su longitud mínima como se observa en la tabla 18. Con esta clasificación se reduce el tiempo que toma registrar cada perfil en el sistema y mantener el inventario de almacén.

Tabla 18 – Clasificación propuesta de retazos de materia prima

Clasificación de retazos	
Categorías	Longitud mínima
1	500
2	1000
3	1500
4	2000
5	3000
6	4000

Elaboración propia

3.3.1. El algoritmo de corte propuesto

Para la presente mejora se utilizará como base el algoritmo de corte propuesto por Cristina Poldi y Marcos Nereu explicado en el caso de estudio *Método heurístico para el problema de corte de una dimensión con materia prima de múltiples longitudes y stock limitado* bajo el nombre de algoritmo de heurística constructiva con el método de resolución de Greedy. El funcionamiento de este algoritmo se encuentra descrito en el gráfico 36.

El algoritmo resuelve el problema de utilizar retazos en el proceso de fabricación mediante el uso de un proceso iterativo que calcula cada posible patrón de corte óptimo para cada longitud de materia prima y luego utiliza el patrón que presente la menor cantidad de desperdicio de todos los patrones generados. El patrón óptimo obtenido es usado hasta que se cumple con la demanda de alguna de las piezas a cortar o el stock de materia prima de longitud L se agota. Luego de esto se procede a obtener un nuevo patrón óptimo hasta satisfacer toda la demanda de piezas a cortar o agotar el stock de materia prima.

Finalmente el proceso anterior se repite por cada tipo de materia prima requerido de forma que se obtiene la optimización de todos los materiales requeridos para la fabricación del grupo de pedidos.

Los pasos para aplicar el algoritmo según lo descrito por Cristina Poldi y Marcos Nereu son los siguientes:

Paso 1: Construir un buen patrón de corte para cada longitud k , $k = 1, \dots, K$. En este caso se utiliza el algoritmo de Greedy para este propósito. La definición matemática y su aplicación en el lenguaje C # se encuentra detallado en el punto 3.1.4

Paso 2: Seleccionar entre los patrones de corte generados en el paso 1 el que presente el mínimo desperdicio.

Paso 3: Usar el patrón de corte presentado en 2 tanto como sea posible teniendo en cuenta las restricciones de la demanda de items y el stock disponible de materia prima para cada longitud.

Paso 4: Actualizar la demanda de items restandole los items producidos y el stock de materia prima.

Paso 5: Si la demanda de items ha sido satisfecha o no hay existe stock disponible de ninguna longitud, terminar el método. De lo contrario, volver al paso 1.

2. Optimización de corte

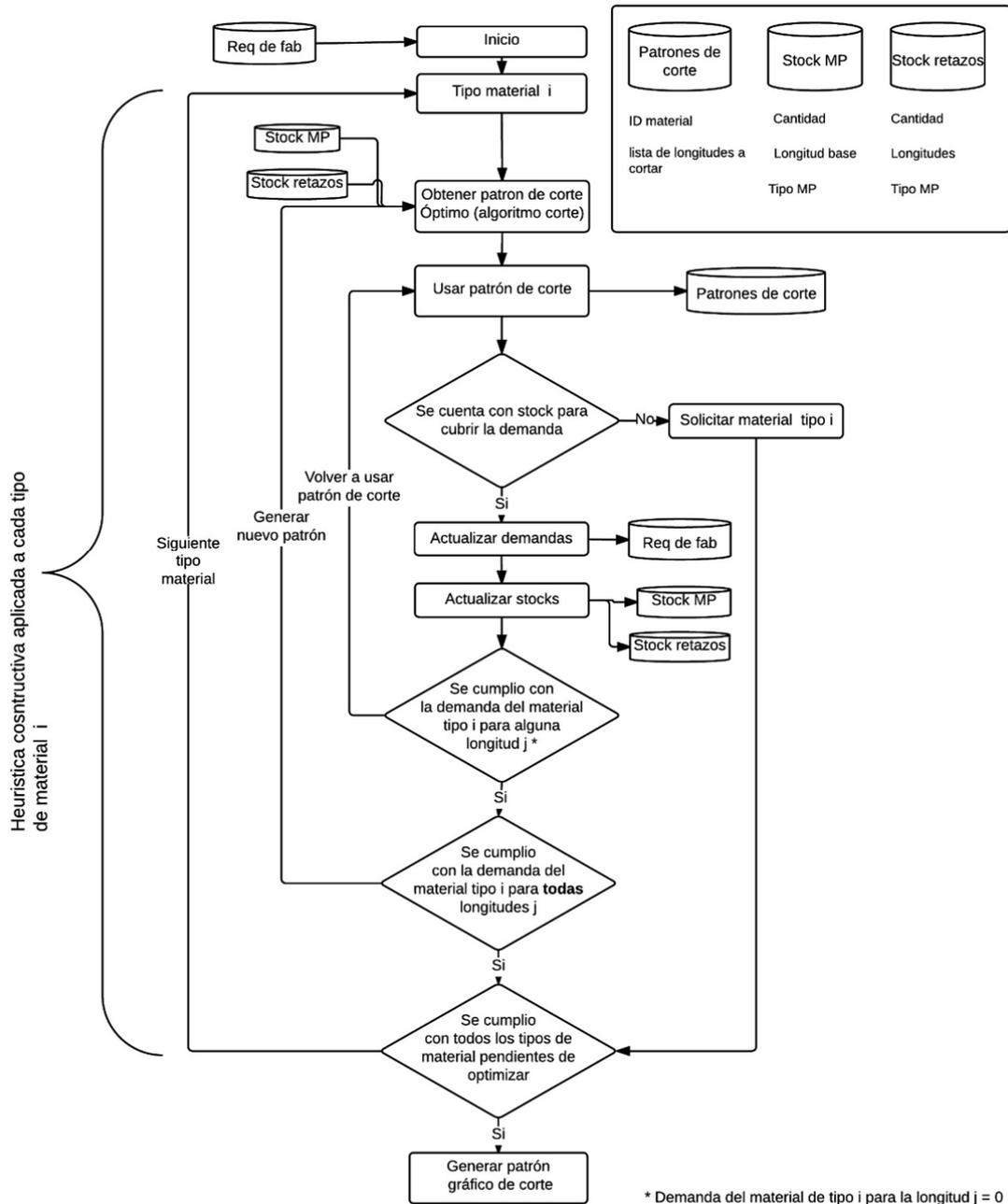


Gráfico 36 – Flujograma de optimización de corte propuesto
Fuente: Elaboración propia

3.3.2. El algoritmo de corte propuesto en lenguaje C#

El algoritmo de corte se encuentra compuesto por un función principal llamada `OptimizacionMateriales()` el cual se encarga de llamar a los otros componentes para el proceso de optimización. La línea 1 y 2 se encargan de crear un objeto que permita llamar al método consolidación de la demanda. La línea 3 y 4 asigna los resultados de este método a los set de variables locales `ReqmaterialBruto` y `tiposMPpresentes` que contienen los requerimientos de material bruto para cada tipo de material y los tipos de material que están presentes en el pedido respectivamente.

```
public void OptimizacionMateriales()

1. { ConsolidarDemanda DemandaPedidos = new ConsolidarDemanda();
2. DemandaPedidos.ConsolidacionDemanda();
3. ReqmaterialBruto = DemandaPedidos.ReqmaterialBruto;
4. tiposMPpresentes = DemandaPedidos.tiposMPpresentes;
5. GrupoOptimizacion = Guid.NewGuid();
6. OptimizarCortes();
7. GuardarResultados();
```

Algoritmo de consolidación de la demanda

El algoritmo de consolidación de la demanda inicia en las líneas 1- 3 obteniendo las ventanas marcadas para optimizar de la base de datos de ventanas marcadas para producción. Las líneas 4-8 ejecutan de manera iterativa el código de explosión de materiales por cada ventana en la base de datos de ventanas a fabricar.

```
1. public void ConsolidacionDemanda()
2. { ContextoDB db = new ContextoDB();
3. var VentanasOptimizar = db.VentanasProduccion.Where(c =>
4. c.EstadoProduccion == EstadoProduccion.Programar && (
5. c.EstadoOptimizacion == Optimizar.Por_Optimizar ||
6. c.EstadoOptimizacion == Optimizar.Re_optimizar));
7. foreach (var ventana in VentanasOptimizar)
8. {
9. ExplosionDeMateriales(ventana);
10. }
11. db.Dispose();
```

El método de explosión de materiales toma como dato de entrada el objeto `VentanaProduccion` el cual contiene los datos de la ventana a fabricar. Las líneas 1-2 obtienen de la base de datos la receta de fabricación según el modelo de ventana y almacena los datos de cada componente requerido en la lista de objetos `ComponentesModelo`. Las líneas 3-5 realizan el cálculo de material requerido por cada uno de los componentes de la ventana mediante el método `CalculoMateriales`.

```
private void ExplosionDeMateriales(VentanaProduccion ventana)
1.  { ContextoDB db = new ContextoDB();
2.  IEnumerable<ComponentesModelo> ComponentesReq =
    db.ComponentesFab.Include("TipoMP").Where(c => c.ModeloVentanaId ==
    ventana.ModeloVentanaId);
3.  foreach (var componente in ComponentesReq)
4.  { CalculoMateriales(componente, ventana); }
5.  db.Dispose();}
```

El método `CalculoMateriales` toma como datos de entrada el componente requerido según el modelo de ventana y las medidas de la ventana en el objeto `ventana`. La línea 1 comprueba que el tipo de material sea un perfil ya que solo estos son los que pasan por el proceso de optimización. Las líneas 2-8 crean el objeto `RequerimientosMP` donde se guardaran los requerimientos de materia prima con su cantidad requerida, la longitud requerida, tipo de material requerido y el estado del requerimiento. Las líneas 9-15 crean un objeto similar para el ancho de la ventana. La línea 16-17 guarda el tipo de material usado para su posterior uso en otro módulo.

```
private void CalculoMateriales(ComponentesModelo componente,
VentanaProduccion ventana)
1.  {if (componente.TipoMP.ClaseMP == ClaseMP.PERFIL)
2.  { ReqmaterialBruto.Add(new RequerimientosMP
3.  {RequerimientosMPIId = Guid.NewGuid(),
4.  MateriaPrimaId = componente.CodMP,
5.  CantidadReq = 2,
6.  LongitudReq = ventana.Largo,
7.  VentanaProduccionId = ventana.VentanaId,
8.  ReqCubierto = false });
9.  ReqmaterialBruto.Add(new RequerimientosMP
10. { RequerimientosMPIId = Guid.NewGuid(),
11. MateriaPrimaId = componente.CodMP,
12. CantidadReq = 2,
13. LongitudReq = ventana.Altura,
14. VentanaProduccionId = ventana.VentanaId,
15. ReqCubierto = false });}
```

```

16.     if (!tiposMPpresentes.Contains(componente.CodMP))
17.     { tiposMPpresentes.Add(componente.CodMP); }}

```

El anterior código se ejecuta en varias iteraciones obteniéndose los materiales requeridos para el grupo de órdenes a fabricar.

Algoritmo de corte mejorado

El algoritmo de corte presenta como módulo principal `OptimizarCortes` el cual según la línea 1 repite el código de las líneas 2-10 por cada tipo de material en el objeto creado anteriormente `tiposMPpresentes` el cual contiene los tipos de material usados en el pedido. Las líneas 2-3 obtienen los requerimientos de material para el tipo de materia prima de la iteración actual y los almacenan en una variable `ReqMPTipo`. La línea 4 obtiene los stocks actuales de materia prima de la base de datos y los almacenan en la variable `StockMPActual`. La línea 5 llama al código `OptimizarCorteMateriaPrimaTipo` que optimiza la materia prima según cada tipo presente en la orden de trabajo.

```

private void OptimizarCortes()
1.     { foreach (var MPId in tiposMPpresentes)
2.         { ContextoDB db = new ContextoDB();
3.           IEnumerable<RequerimientosMP> ReqMPTipo =
ReqmaterialBruto.Where(c => c.MateriaPrimaId == MPId);
4.     IEnumerable<StockMP> StockMPActual = db.StockMPs.Where(c => c.CodMP
== MPId);
5.         OptimizarCorteMateriaPrimaTipo(ReqMPTipo,
StockMPActual);
6.         db.Dispose();}
7.     }

```

El módulo `OptimizarCorteMateriaPrimaTipo` en la línea 1 establece que se ejecute el código de las líneas 2-10 de manera iterativa mientras que la cantidad requerida del material sea mayor a 0. Las líneas 2-3 obtiene un patrón de corte óptimo llamando al método `ObtenerPatronCorteOptimo` y lo guarda en un objeto que contiene el patrón de piezas que deben ser usadas para minimizar el desperdicio de corte y cumpliendo con la demanda. La línea 4 ubica el tipo de material a cortar dentro del stock de material actual y lo asigna al objeto `MaterialCorteActual`. La línea 5 establece por defecto que existe una demanda del material en la variable `Demanda`. La línea 6,8 ejecuta el módulo `UsarPatronCorteOptimo` de forma iterativa hasta que la demanda actual sea 0 o no exista stock del tipo de materia prima requerido. La

línea 7 resta en cada iteración una unidad de materia prima al stock actual. La línea 9 se encarga de llamar al módulo que actualiza el inventario de retazos.

```

private void
OptimizarCorteMateriaPrimaTipo(IEnumerable<RequerimientosMP>
ReqMPTipo, IEnumerable<StockMP> MPNueva)

    1.  { while( ReqMPTipo.Any( c => c.CantidadReq > 0))
2.  { Dictionary<RequerimientosMP, int> PatronOptimo =
3.  ObtenerPatronCorteOptimo(MPNueva, ReqMPTipo);
4.  StockMP MaterialCorteActual = MPNueva.Single(c => c.StockMPId ==
    MpCortadoID);
5.  Demanda = true;
6.  while (MaterialCorteActual.Stock > 0 && Demanda == true)
7.  { MaterialCorteActual.Stock -= 1;
8.  ReqMPTipo = UsarPatronCorteOptimo(PatronOptimo, ReqMPTipo);
9.  ActualizarRetazos(StockMPActual,Desperdicio);
    }
    }
  }

```

El módulo `ObtenerPatronCorteOptimo` inicia estableciendo el valor base de las variables desperdicio y desperdicio mínimo en las líneas 1-2. En las líneas 3-5 obtiene los datos de la materia prima nueva y los retazos (stock y longitud) y se almacenan en las variables respectivas `MPNueva` y `Retazos`. La línea 6 crea el objeto donde se almacenará el patrón de corte óptimo. La línea 7-9 ejecutan si existe stock de materia prima nueva, el módulo `ObtenerPatronCortePorLongitud` con el cual se calcula el patrón de corte óptimo para una longitud dada (`LongitudBarrasMP`) y una cantidad requerida de cada materia prima (`ReqMPTipo`). La línea 10 asigna el desperdicio mínimo como el desperdicio que se acaba de calcular en la línea 7-9. La línea 11 itera a través del stock de retazos disponible para el tipo de materia prima que esta siendo optimizado y ejecuta el código `ObtenerPatronCortePorLongitud`. Este módulo consiste en el uso del Algoritmo de obtención de un patrón de corte óptimo para una longitud de materia prima L cuyo funcionamiento se encuentra detallado en el punto 3.1.4 -3.1.5. En caso de que el desperdicio encontrado usando el retazo de la iteración actual presente un desperdicio menor que el desperdicio mínimo (`DesperdicioMinimo`) las líneas 17 - 21 asignan como nueva mejor solución óptima a la solución de la iteración actual y la almacenan en la variable `VariablesCorteOptimo`. Posteriormente, luego de finalizada las iteraciones por cada longitud de retazo para la materia prima optimizada se retorna el valor con el patrón de corte óptimo al módulo `OptimizarCorteMateriaPrimaTipo`.

```

private Dictionary<RequerimientosMP, int>
ObtenerPatronCorteOptimo(IEnumerable<StockMP> DetalleMP,
IEnumerable<RequerimientosMP> ReqMPTipo)

{
    Desperdicio = 0;
    double DesperdicioMinimo = 999999999;
    StockMP MPNueva = DetalleMP.First(c => c.Clasif == clasif.NUEVO);
    IEnumerable<StockMP> Retazos = DetalleMP.Where(c => c.Clasif == clasif.RETAZO);
    double LongitudBarrasMP = MPNueva.Medida;
    Dictionary<RequerimientosMP, int> VariablesCorteOptimo = new
    Dictionary<RequerimientosMP,int>();
    if (MPNueva.Stock > 0)
    {
        MpCortadoID = MPNueva.StockMPId;
        VariablesCorteOptimo = ObtenerPatronCortePorLongitud(LongitudBarrasMP,
        ReqMPTipo);
        DesperdicioMinimo = Desperdicio; }

    foreach (var Retazo in Retazos)
    if (Retazo.Stock > 0)
    {
        Dictionary<RequerimientosMP, int> CorteCompara =
        ObtenerPatronCortePorLongitud(Retazo.Medida, ReqMPTipo);
        if (Desperdicio < DesperdicioMinimo)
        {
            VariablesCorteOptimo = CorteCompara;
            DesperdicioMinimo = Desperdicio;
            MpCortadoID = Retazo.StockMPId; }

    return VariablesCorteOptimo; }

```

El módulo UsarPatronCorteOptimo tiene como entradas los datos del patrón de corte optimo elegido en el módulo ObtenerPatronCorteOptimo y los requerimientos de material del pedido optimizado ReqMPTipo. Con estos datos las líneas 1-7 generan un objeto ConsumoMP que contiene el codigo de material usado, el desperdicio obtenido, el identificador GrupoOptimizacion que indica a que lote de optimización pertenece y una lista de piezas a cortar de la barra de stock actual. La línea 8 itera a través de todas las variables de corte del patrón de corte obtenido. La línea 9 evalua por cada una de estas variables comprobando si su valor es mayor a 0. En caso de ser verdadero las líneas 9-10 disminuye los requerimientos de corte según el valor de la variable corte y las líneas 11-14 añaden la pieza cortada al objeto ConsumoMP. En cada iteración la línea 15 evalua el requerimiento de material de la iteración actual. En caso de que este valor se haya reducido a 0 la variable global Demanda toma el valor de falso y procede a salir de la iteración del módulo OptimizarCorteMateriaPrimaTipo para proceder a calcular un nuevo patrón de corte optimo y finalizar la tarea en caso de que no exista ninguna demanda de

material por satisfacer. Las líneas 16 -19 guardan los valores calculados y devuelven los requerimientos de material actualizados al módulo OptimizarCorteMateriaPrimaTipo

```

private IEnumerable<RequerimientosMP>
UsarPatronCorteOptimo(Dictionary<RequerimientosMP, int> PatronOptimo,
IEnumerable<RequerimientosMP> ReqMPTipo)
    1.  { ConsumoMP CortesBarra = new ConsumoMP();
    2.      Guid CodCorteBarra = Guid.NewGuid();
    3.      CortesBarra.GrupoOptimizacion = GrupoOptimizacion;
    4.      CortesBarra.StockMPId = MpCortadoID;
    5.      CortesBarra.ConsumoMPId = CodCorteBarra;
    6.      CortesBarra.Desperdicio = Desperdicio;
    7.      List<PiezaCortada> ListaPiezasCortadas = new
List<PiezaCortada>();

    8.  foreach ( var corte in PatronOptimo) {
    9.  if (corte.Value > 0) {
        RequerimientosMP Requerimiento = ReqMPTipo.First(c =>
        c.RequerimientosMPId == corte.Key.RequerimientosMPId);
    10.     Requerimiento.CantidadReq -= corte.Value;

        ListaPiezasCortadas.Add(new PiezaCortada
    11.     { ConsumoMPId = CodCorteBarra,
    12.     VentanaId = corte.Key.VentanaProduccionId,
    13.     Longitud = corte.Key.LongitudReq,
    14.     Cantidad = corte.Value, });

    15.     if (Requerimiento.CantidadReq == 0) { Demanda = false; } }

    16.     CortesBarra.PiezasCortadas = ListaPiezasCortadas;
    17.     ConsumoMP.Add(CortesBarra);
    18.     return (ReqMPTipo); }
  
```

El módulo ActualizarRetazos se encarga incrementar el número de retazos según la longitud sobrante obtenida. Si el retazo es menor a 500 mm se considera desperdicio neto. Si supera esta longitud se añade una unidad al stock actual de retazos según la clasificación propuesta en el punto 3.3. La línea 3 establece la longitud mínima para ser considerado el retazo como una pieza reutilizable. La línea 4 establece las 6 categorías de longitud de retazos. La línea 5 comprueba si la longitud del retazo actual es menor a la longitud mínima y devuelve el valor falso verdadero en caso de que así sea. La línea 7 realiza una iteración 6 veces de las líneas 8-12. La línea 8 comprueba si el retazo es menor que la categoría *i*, de cumplirse esto la línea 9-11 procede a ubicar el stock de retazos de la categoría *i* y agregar una unidad al stock y salir de bucle. En caso no cumplirse con esta condición se sigue con las iteraciones hasta encontrar una categoría que cumpla con lo requerido.

```

1.     private bool ActualizarRetazos(IEnumerable<StockMP>
        StockMPActual, double Desperdicio)
    {
2.     double Retazo = Desperdicio;
3.     double LongitudMinima = 500;
4.     double [] Categorias = new double [6]
        {500,1000,1500,2000,3000,4000};
5.     if (Retazo <= LongitudMinima)
6.     { return true; }

7.     for (int i = 0; i <= 6; i++)
    {
8.         if (Retazo < Categorias[i])
    {
9.             var StockRetazo = StockMPActual.Where(c => c.Medida ==
                Categorias[i - 1] && c.StockMPId == MpCortadoID).Single();
10.            StockRetazo.Stock += 1;
11.            break;
12.        }} }

```

3.4 El modelo de simulación de resultados

Para probar ambas soluciones y comparar resultados se utiliza el siguiente modelo el cual introduce al proceso de optimización todos los pedidos del 2014 de forma semanal desde el 01 Enero hasta el 31 de Diciembre. Los resultados obtenidos serán usados como base para predecir los posibles ahorros que se obtendrían en el 2015 de implementarse el sistema considerando el 2015 como un escenario muy similar al del 2014 pero con un crecimiento entre el 10 y 20% en el volumen de fabricación. Las líneas 1-2 establecen los rangos de fecha a trabajar. La línea 4 establece la regla de iteración de las líneas 5-7 la cual se ejecuta hasta que el diaBase sea superior a la fecha de fin establecida. La línea 5 llama al módulo ProgramarSemanaFabricacion el cual se encarga de programar los pedidos para la semana. La línea 6-7 ejecutan el módulo de optimización. El anterior código se ejecuta 2 veces. La primera oportunidad se utiliza el proceso de corte actual y la segunda oportunidad se utiliza el proceso de corte mejorado. Los resultados de ambos procesos son descargados del sistema y comparados en el capítulo 4.

```

1.     public void SimulacionCorteActual()
2.     { DateTime diaBase = new DateTime(2015, 1, 1);
3.       DateTime DiaFin = new DateTime(2015, 12, 31);

4.       while(diaBase < DiaFin)
5.       {diaBase = ProgramarSemanaFabricacion(diaBase);
6.       OptimizaCorte PerfilOptimizar = new OptimizaCorte();
7.       PerfilOptimizar.OptimizacionMateriales();
    }}

```

El módulo de programar semana de fabricación recupera la información de los pedidos de la semana en la línea 2-3. Luego realiza una iteración por cada pedido en la semana y establece su estado como Por optimizar según las líneas 4-5. Con esto los procesos de corte anteriores reconocen el pedido como pendiente y proceden a su optimización. Finalmente la línea 8 agrega 7 días al día base y procede a retornar este valor para su uso en la siguiente iteración.

```
1. private DateTime ProgramarSemanaFabricacion(DateTime
   diaBase)
2. {ContextoDB db = new ContextoDB();
3. IQueryable<VentanaProduccion> ProyectoSemana =
   db.VentanasProduccion.Where(one => one.FechaProduccion ==
   diaBase &&(one.EstadoProduccion ==
   EstadoProduccion.Programar));
4. foreach (var Proyecto in ProyectoSemana)
   {
5. Proyecto.EstadoOptimizacion = Optimizar.Por_Optimizar;
   }
6. db.SaveChanges();
7. db.Dispose();
8. diaBase.AddDays(7);
   return diaBase; }
```

CAPÍTULO IV. EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA

En el presente capítulo se describe el impacto estimado del modelo en la empresa. A continuación se presentan los resultados obtenidos luego de realizada la simulación de corte de las ordenes de producción del 2014 consistente en 1797 ventanas, equivalentes a 76 201 metros lineales de perfil de PVC.

4.1. Evaluación técnica

A continuación se presentan los resultados del modelo actual versus el modelo propuesto y su impacto en los indicadores definidos en la sección 2.2.3 indicadores del proceso.

4.1.1. Consumo de materia prima

Como se observa en la gráfica 37 el consumo de material para el modelo propuesto es menor en un 7% respecto al consumo de material del modelo actual para un requerimiento anual de materia prima de 76 201 metros lineales de material el cual se encuentra detallado en el anexo 3.

Del consumo de material anterior se puede obtener que el modelo actual consume 15 228 barras de materia prima frente a las 13 780 barras de materia prima del modelo propuesto. Esto genera un ahorro anual de 1 448 barras de materia prima aproximadamente el 10% según se aprecia en la gráfica 38. El consumo mensual detallado se encuentra en el anexo 4.

En la gráfica 38 en el mes de octubre el consumo superior de materia prima del modelo propuesto es ocasionado por el método de agrupación utilizado. El modelo actual realiza la optimización según la fecha de cada pedido por cliente mientras que el modelo mejorado agrupa los pedidos por cada semana ocasionando que existan agrupaciones de pedidos que involucren 2 meses.

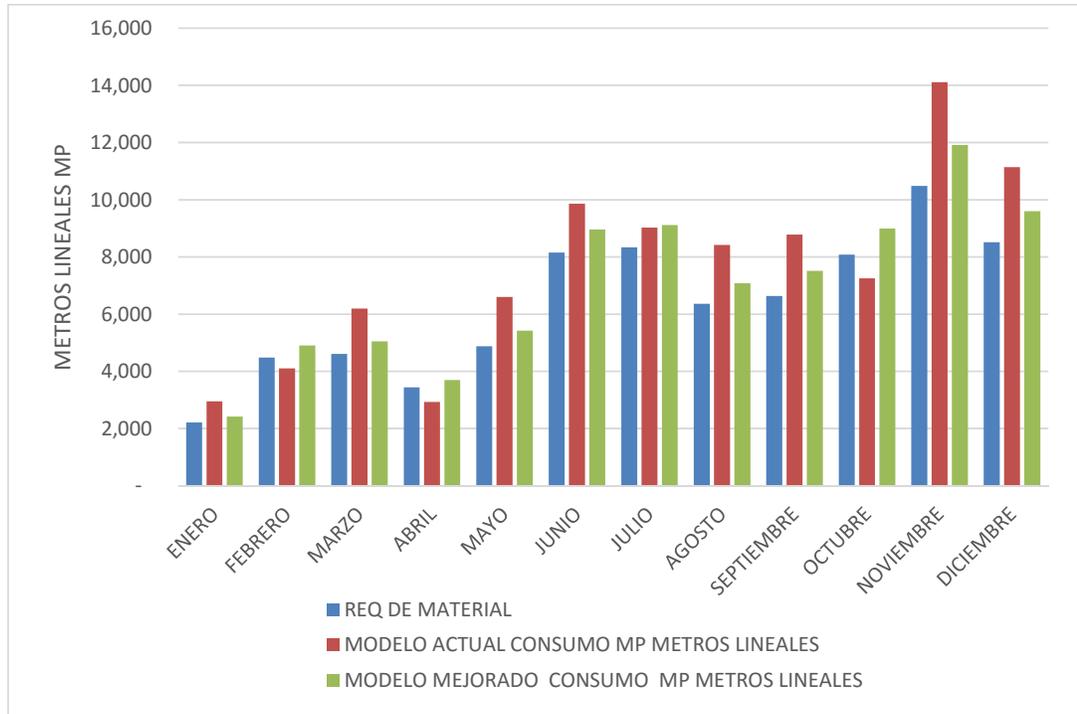


Gráfico 38 – Consumo mensual de MP virgen por modelo
Fuente: Elaboración propia

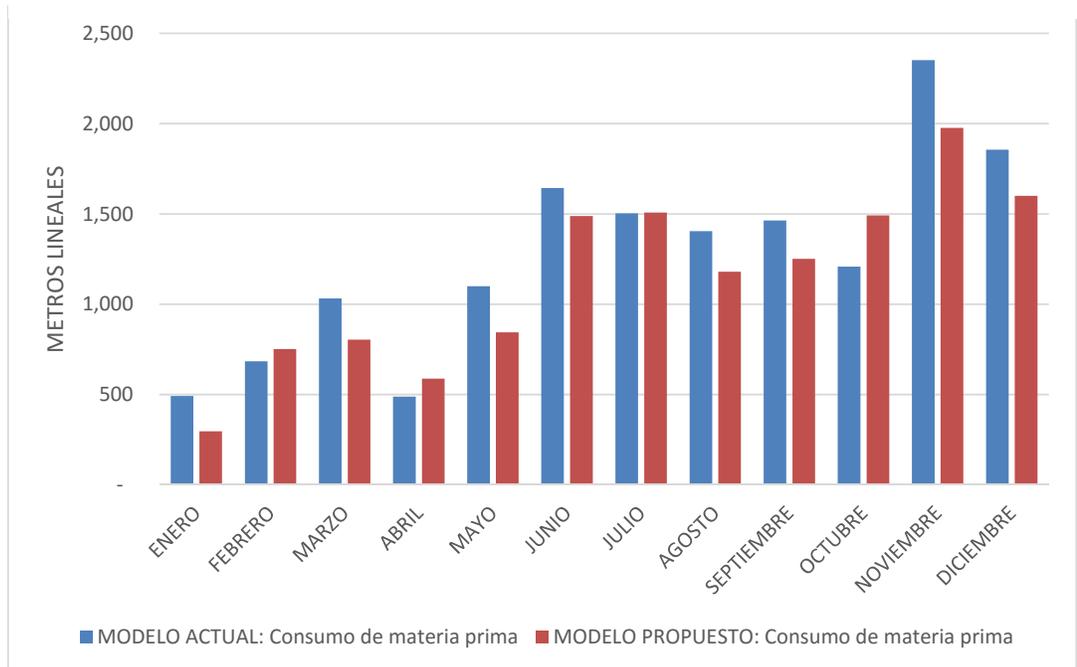
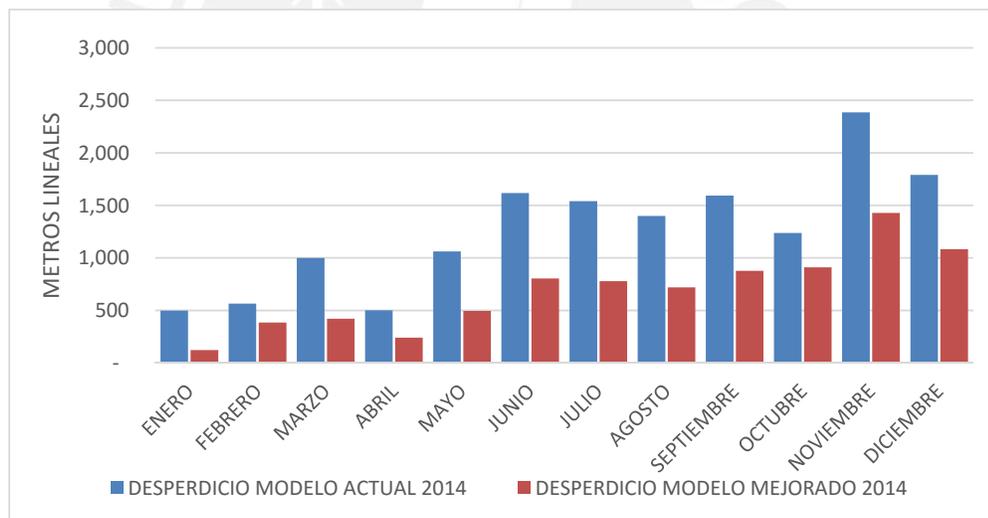


Gráfico 37 – Fabricación mensual de ventanas en metros lineales
Fuente: Elaboración propia

4.1.2. Desperdicio bruto de materia prima

El gráfico 39 presenta el desperdicio bruto de materia prima obtenido para cada uno de los meses del 2014. Como se observa el modelo propuesto genera una reducción del desperdicio del 54% frente al modelo de corte actual. Esto se debe a que el algoritmo propuesto dispone 2 ventajas adicionales para realizar un mejor proceso de optimización. La primera ventaja permite disponer de diversas longitudes de materia prima (retazos) con lo cual el algoritmo puede reducir el desperdicio de manera más eficiente. La segunda ventaja consiste en brindarle al algoritmo una mayor cantidad de piezas de corte mediante el agrupamiento de pedidos de forma semanal lo que ocasiona que se pueda obtener un mejor patrón de corte óptimo. Los datos del desperdicio bruto de materia prima por modelo se encuentran en el anexo 5.

Gráfico 39 – Desperdicio bruto de materia prima por modelo de corte
Fuente: Elaboración propia



4.1.3. Desperdicio neto de materia prima

El gráfico 40 presenta el desperdicio obtenido para el proceso de corte actual en comparación con el proceso de corte mejorado. Como se observa se disminuye el desperdicio obtenido en un 61% lo que representa una disminución anual de 256 kg desperdicio neto. El detalle de Kg por mes se encuentra en el anexo 6.

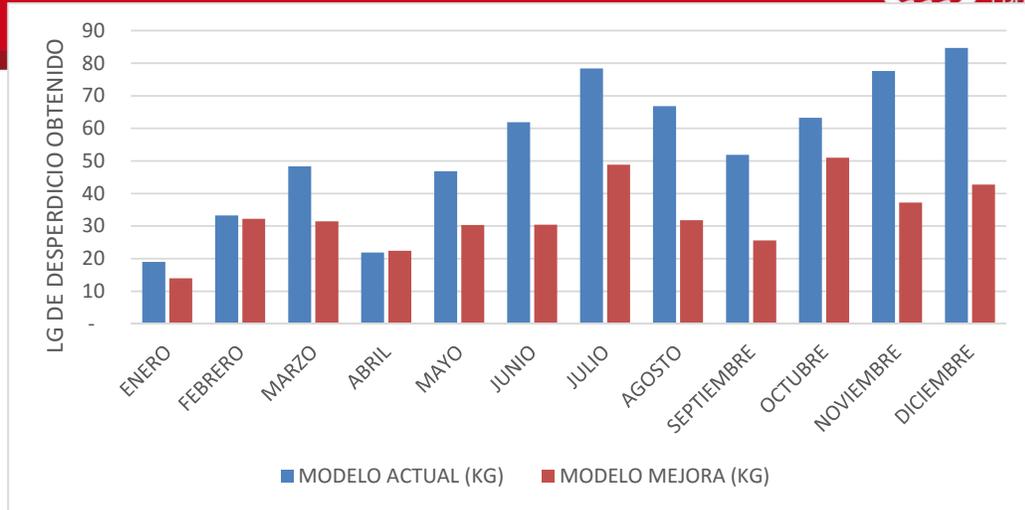


Gráfico 40 – Desperdicio neto de materia prima por modelo de corte
Fuente: Elaboración propia

4.1.4. Consumo de retazos

El gráfico 41 muestra el consumo de retazos para cada modelo. Para la situación actual se tiene un consumo mínimo del 4% de los retazos obtenidos debido a que el proceso de optimización de corte con uso de retazos debe realizarse de forma manual. Para el proceso mejorado se observa un gran incremento en el uso de retazos debido a que el algoritmo dispone de estos como opciones válidas para encontrar un desperdicio mínimo por barra de material cortado. El factor de utilización de retazos incrementa de este modo de 4% a 25%. El detalle del consumo mensual se encuentra detallado en el anexo 7.

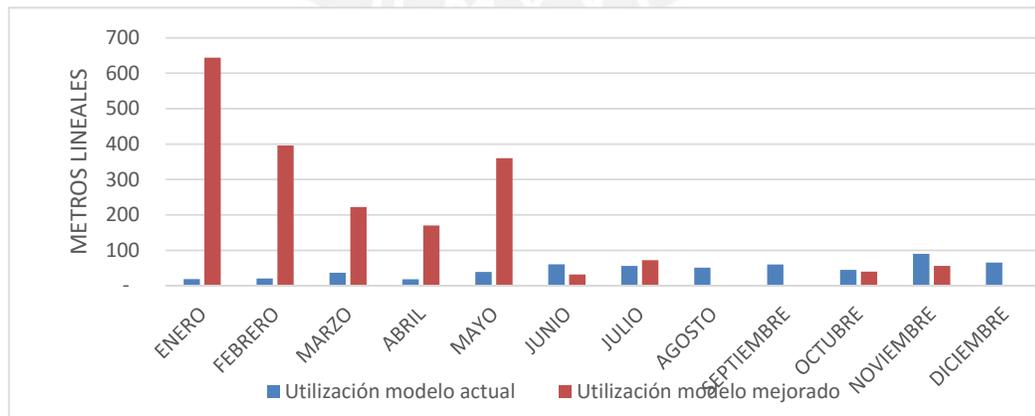


Gráfico 41 – Utilización de retazos por modelo de corte
Fuente: Elaboración propia

4.2. ANÁLISIS ECONÓMICO FINANCIERO

A continuación se cuantifica en unidades monetarias el valor de la mejora y su costo de implementación en la empresa utilizando 3 escenarios de crecimiento estimado del volumen de ventas. El primero, escenario neutro estima un crecimiento de ventas del 15% para el 2015. El escenario negativo por su parte reduce este porcentaje a 0% mientras que el escenario positivo considera un incremento de las ventas en un 25%.

4.2.1. Presupuesto de costos

La tabla 19 presenta los ítems requeridos para implementar el sistema en la empresa.

Tabla 19– Descripción de ítems implementación de mejora

Ítem	Detalle	USD	S./	Fuente
Sistema de almacenamiento en la nube Azure Windows	Costo de almacenamiento por 1 año del sistema en servidores de Microsoft	1,200	3,780	Azure hosting
Microsoft Solver Foundation Express Edition	Licencia para distribución del software de optimización	5,000	15,750	MSDN subscriptions
Implementación del sistema	Desarrollo de los módulos de entrada de datos, optimización, e indicadores ASP.NET	7,000	22,050	Empresa de sistemas Soluciones Tecnológicas DS
Configuración y carga de datos	Configuración del sistema con los datos de la empresa y carga de los inventarios actuales	1,500	4,725	Empresa de sistemas Soluciones Tecnológicas DS
Capacitación usuarios	Capacitación a los usuarios en el uso del sistema	150	473	Empresa de sistemas Soluciones Tecnológicas DS
Total			46,778	

Empresa de sistemas Soluciones Tecnológicas DS SAC. Cotización 15 Mayo 2015 RUC 20600362993

MSDN suscriptions provee una versión del software para desarrollo y despliegue

Fuente: Elaboración propia

El sistema no requiere de una persona dedicada para su administración sino que por el contrario se capacitará al responsable actual de programar las ordenes de producción en el uso del sistema.

4.2.2. Presupuesto de ahorros relevantes

La tabla 20 describe el presupuesto de ahorros esperados en la empresa según los 3 escenarios de crecimiento en volumen de ventas para el 2015. El detalle del presupuesto de ahorro para el 2014 y el 2015 se encuentra en el anexo 8. Si comparamos el ahorro obtenido en el escenario neutro con el volumen de ventas estimado para el 2015 tenemos que esta mejora representa un 2.19% de las ventas, estimadas en 2.1 millones de dólares para el 2015.

Tabla 20 – Ahorro proyectado 2015 por escenarios esperados

Descripción	ESCENARIOS		
	NEUTRO	NEGATIVO	POSITIVO
Reducción de desperdicio bruto obtenido	S/. 38,641	S/. 35,281	S/. 42,002
Reducción de desperdicio neto obtenido	S/. 2,353	S/. 2,149	S/. 2,558
Reducción de costos de mantener inventario metro lineal	S/. 26,335	S/. 24,045	S/. 28,625
Reducción de consumo de materia prima	S/. 133,216	S/. 121,632	S/. 144,800
AHORRO 2015	S/. 200,546	S/. 183,108	S/. 217,985

Fuente: Elaboración propia

Para el cálculo de la reducción del desperdicio bruto se toma como base los datos del 2014 presentes en el anexo 5. Para el cálculo del desperdicio neto se toma como base un valor de S./8 por kg multiplicado por los kg obtenidos en el año. En la estimación de costos de mantener inventario se considera el alquiler del espacio, el sueldo del encargado de almacén y el mantenimiento del lugar obteniéndose un valor mensual por metro de perfil almacenado de S./3.42.

En la reducción del consumo de materia prima se toma en cuenta solo la materia prima virgen que se dejaría de importar al aumentar la eficiencia de uso del material obteniéndose un valor base por metro lineal de S./80 el cual incluye los costos de almacenamiento, importación y otros que se generan a lo largo de la cadena de abastecimiento.

4.2.3. Flujo de caja y periodo de recuperación de la inversión

Para la elaboración del flujo de caja y el periodo de recuperación de la inversión se utilizó la metodología de CAPM para el cálculo del costo de oportunidad como se observa en la tabla 21 utilizando la siguiente fórmula para el cálculo del beta proyectado.

$$COK = r_f + \beta_{proy} \times [r_m - r_f] + riesgo\ país$$

$$\beta_{proy} = \left[1 + \frac{D}{E}(1 - IR) \right] \times \beta$$

Tabla 21 – Calculo de costo de oportunidad

Calculo de oportunidad (COK)		
Indicador	Valor	Fuente
D/C	0.05	Dato de la empresa
rf	0.062	Tasa de interés de los bonos de USA
rm - rf	8.45	Libro finanzas corporativas
Imp. Renta	30%	Dato SUNAT
Riesgo Pais	1.63%	Dato BCR
Beta	1.6	Beta mercado accesorios de construcción Estados Unidos
Beta proy	1.656	
COK	14.07	

Elaboración propia

Además de esto se tuvieron las siguientes consideraciones al momento de calcular el periodo de recuperación de la inversión

- La tasa de préstamo para empresa mediana manejada por la empresa es del 25.25% para préstamos de recursos locales.²⁴ Se emplea esta tasa ya

²⁴ Fuente: BCP – Tasas y tarifas
<https://ww3.viabcp.com/tasasytarifas/TasasDetalle.aspx?ATAS=1&O=005>

que no se va a realizar una inversión en maquinaria o inmuebles que permita acceder a una tasa menor.

- Debido a que la tasa de préstamo bancario es superior a la tasa de retorno del inversionista se sugiere financiar la mejora con capital interno.
- El valor del WACC se calcula mediante la fórmula presentada a continuación y su resultado se indica en la tabla 22. Como se observa el WACC es igual al COK debido a que la inversión se financia con capital propio.

$$WACC = COK \times \frac{CAPITAL}{Inversión} + K_{deuda} \times (1 - T) \times \frac{Deuda}{Inversión}$$

Tabla 22 – Cálculo de WACC

Calculo de WACC	
COK	14%
Capital	0.95
Deuda	0.05
Inversión	1
Kdeuda	14%
T	0.3
WACC	14%

Elaboración propia

- Se elabora un flujo de caja para cada escenario teniendo en cuenta que el ahorro inmediato se produce solo por el menor consumo de materia prima ya que los ahorros por aumento de eficiencia y menores costos de almacenamiento toman un periodo más largo de implementación antes de impactar en el flujo de caja de la empresa.

Bajo estas condiciones se observa en la tablas 23-25 que los 3 escenarios de crecimiento de mercado presentan un periodo de recuperación de la inversión de 3 meses con financiamiento propio con un WACC del 14%. El detalle de cada flujo de caja se encuentra en el anexo 9.

Tabla 23 – Flujo de caja proyectado escenario neutro

ESCENARIO NEUTRO - CRECIMIENTO DE VOLUMEN DE VENTAS DEL 15%			
Descripción	2015	2016	2017
Ahorro estimado compra MP	S/. 133,216	S/. 153,198	S/. 176,178
Inversión del sistema	S/. -46,778	S/. -9,300	S/. -9,300
FLUJO CAJA ECONÓMICO	S/. 86,439	S/. 162,498	S/. 185,478
FINANCIAMIENTO			
CAPITAL PROPIO	S/. 35,100		
COSTO CAPITAL PROPIO	S/. -1,169		
FLUJO CAJA FINANCIERO	S/. 120,370	S/. 162,498	S/. 185,478

Elaboración propia

Tabla 24 – Flujo de caja proyectado escenario positivo

ESCENARIO POSITIVO - CRECIMIENTO DE VOLUMEN DE VENTAS 25%			
Descripción	2015	2016	2017
Ahorro estimado	S/. 144,800	S/. 181,000	S/. 226,250
Inversión del sistema	S/. -46,778	S/. -9,300	S/. -9,300
FLUJO CAJA ECONÓMICO	S/. 98,023	S/. 171,700	S/. 216,950
FINANCIAMIENTO			
CAPITAL PROPIO	S/. 34,000		
COSTO CAPITAL PROPIO	S/. -1,132		
FLUJO CAJA FINANCIERO	S/. 130,890	S/. 171,700	S/. 216,950

Elaboración propia

Tabla 25 – Flujo de caja proyectado escenario negativo

ESCENARIO NEGATIVO - CRECIMIENTO DE VOLUMEN DE VENTAS DE 0%			
Descripción	2015	2016	2017
Ahorro estimado	S/. 115,840	S/. 115,840	S/. 115,840
Inversión del sistema	S/. -46,778	S/. -9,300	S/. -9,300
FLUJO CAJA ECONÓMICO	S/. 69,063	S/. 125,140	S/. 125,140
FINANCIAMIENTO			
CAPITAL PROPIO	S/. 36,600		
COSTO CAPITAL PROPIO	S/. -1,219		
FLUJO CAJA FINANCIERO	S/. 104,444	S/. 143,898	S/. 143,898

Elaboración propia

*Para el 2016 y 2017 se tiene como inversión el mantenimiento del sistema y el alquiler del almacenamiento de datos.

4.2.4. Cronograma de implementación

Se ha estimado una duración total del proyecto de 6 meses dividido en 4 etapas. La primera etapa consiste en el levantamiento de la información de la materia prima y las recetas de fabricación de los diferentes modelos de ventanas. La segunda etapa consiste en la elaboración de un piloto funcional que demuestre el funcionamiento del nuevo algoritmo en el proceso de corte de piezas para el modelo de ventana base (ventanas fijas).

En la tercera etapa se desarrolla el sistema programando sus diferentes módulos en un plazo estimado de 3 meses. La última etapa consiste en realizar pruebas y lanzar el sistema a producción en un lapso aproximado de un mes.

Tabla 25 – Cronograma de implementación

Etapa		Jun 15	Jul 15	Aug 15	Sep 15	Oct 15	Nov 15	Dec 15
1.1	Elaboración de la propuesta inicial de trabajo							
1.2	Levantamiento de información							
2	Programación de prueba de concepto							
3	Programación módulos base							
3.1	Módulo de creación de ordenes de producción							
3.2	Módulo de explosión de materiales PVC TECNOCOM							
3.3	Módulo de corte de materiales							
3.4	Módulo de gestión de inventarios de corte							
4.1	Pruebas del sistema							
4.2	Carga de información actual							
4.3	Lanzamiento							
Duración total del proyecto		6 meses						

Elaboración propia

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente trabajo tuvo como objetivo obtener una reducción en los costes de la empresa mediante la disminución del desperdicio obtenido en el proceso de corte de perfiles. A continuación se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas de este estudio.

Conclusiones

- Los resultados del análisis de los procesos de la empresa indicaron que los subprocesos de corte y ensamblaje contenidos dentro del proceso de fabricación tenían el mayor potencial para obtener una reducción de costos significativa en la empresa. Dentro de estos dos subprocesos se analizaron sus problemas principales identificándose dos problemas responsables del 80% de los costos por problemas del área: el alto nivel de obtención de retazos y desperdicio de materia prima; y el alto número de reclamos por ensamblaje incorrecto.
- De los problemas identificados se realizó un análisis para encontrar las causas raíz determinando 3 causas principales: La primera fue la falta de utilización de retazos en el proceso de optimización de corte, la segunda consistió en la falta de agrupación de los pedidos antes de realizar la optimización de corte, la tercera fue la incorrecta inspección del producto al final del proceso de ensamblaje. De estas se eligió enfocar la mejora en la primera y segunda causas raíces encontradas por estar interrelacionadas y tener un gran potencial de mejora.
- Se determinó como mejora el elaborar un sistema que permita la reutilización de los retazos obtenidos del corte, además de optimizar los patrones de corte de material a fin de reducir el porcentaje de desperdicio obtenido. Para ello se utilizó un algoritmo de corte heurístico el cual permitió mediante iteraciones obtener un patrón de corte óptimo para cada combinación de ordenes de fabricación que ingresara al sistema.

- De implementarse la mejora para el 2015 se obtendría un ahorro que representa el 2.19% de las ventas estimadas para ese año. Por otro lado los costos estimados de implementación son de S./46 000 soles e incluyen el desarrollo del sistema, el alquiler de hosting del servicio por un año y la configuración y capacitación de los usuarios.
- Luego del diagnóstico de los procesos de la empresa se determina que el proceso de corte presenta el mayor potencial de mejora porque produce la mayor cantidad de desperdicio de materia prima de todo el proceso de fabricación y este último representa el mayor costo directo de fabricación del producto.
- El algoritmo de corte presenta un ahorro inmediato por disminución de consumo de materia prima virgen del 10% lo cual representa un valor para la empresa de S./ 130 mil soles anuales. Este valor puede ser incrementado aún más si se tiene en cuenta que el periodo de agrupación de los pedidos en el algoritmo de corte actual puede ser extendido.

Recomendaciones

A continuación se presentan algunas ideas complementarias al modelo propuesto que permiten expandir su aplicación.

- El modelo de corte propuesto puede ser aplicado en otros rubros con necesidades similares como el textil, en los procesos de corte de telas; el de construcción para la optimización de corte de tuberías, barras de acero, entre otros sin requerir de modificaciones significativas.
- El proceso de corte puede ser modificado asignándole un coeficiente de castigo al desperdicio obtenido del uso de una barra de materia prima virgen. Con esta modificación se daría una mayor prioridad al uso de retazos incrementando el consumo de estos últimos y reduciendo los costos por compra de materia prima a costa de incrementar el desperdicio neto obtenido.

- Se sugiere evaluar la posibilidad de extender el plazo de consolidación de pedidos antes del proceso de optimización de 7 días calendario a 15 días calendario con lo que se lograría reducir aún más el desperdicio bruto obtenido al brindarle una mayor cantidad de posibilidades al algoritmo.



BIBLIOGRAFÍA

1. Libros

- Pyzdek, Thomas, The Six Sigma Handbook 2nd Edition, New York: McGraw Hill, 2003.
- John Wiley, Chichester Peter B. Systems Thinking, Systems Practice. UK, 1981. 330 p.
- JONES, Daniel T. Jones y James P. WOMACK. Pensamiento Esbelto. 2da. Ed.
- Ian Rosam and Rob Peddle, Creating a Process-based Management System for ISO 9001:2008 and beyond 2009
- Frederick D. Buggie, (2003) "How to Hold Effective Brainstorming Sessions", Handbook of Business Strategy, Vol. 4 Iss: 1, pp.120 - 123
- HILLIER, F.S Y LIEBERMAN G.J, Introducción a la investigación de operaciones. p. 1010

2. Tesis

- LORENA, Cépeda. Estudio de pre-factibilidad para la implementación de una cadena de comidas rápidas en base a pollo en lima norte. Tesis (Ingeniero Industrial). Lima, Perú, Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería, 2006
- ESTRADA, Maritza. Análisis y mejora de una línea de producción de cocinas usando la filosofía Lean Manufacturing (Manufactura Esbelta). Tesis (Ingeniero Industrial). Lima, Perú, Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería, 2009

3. Investigaciones

- Frederick D. Buggie, (2003), "How to Hold Effective Brainstorming Sessions", Handbook of Business Strategy, Vol. 4 Iss 1 pp.120 - 123
- Eric Gossett, "Discrete Mathematics with Proof". Segunda edición. John Willey 2009.
- Kelly Cristina Poldi*, Marcos Nereu Arenales (2008) Heuristics for the one-dimensional cutting stock problem with limited multiple stock lengths doi:10.1016/j.cor.2008.07.001
- BVVA Research. (2013). Situación inmobiliaria análisis económico 2013 [Versión electrónica]. 4-5. [fecha de consulta: 01 Agosto 2005].

4. Recursos Electrónicos

- Empresa editora El Comercio S.A. (2014, 25 de Enero) Peru21, BCR: Servicios, comercio y construcción, los rubros que más aportan al PBI. [fecha de consulta: 10 de Julio 2014], Disponible en: <<http://peru21.pe/economia/bcr-servicios-comercio-y-construccion-fueron-sectores-mayor-contribucion-al-pbi-2013-2167152>>.
- NPD –SOLUTIONS, La casa de la calidad. [fecha de consulta: 15 de Julio 2014]. Disponible en: <<http://www.npd-solutions.com/qfd.html>>
- Asociación Española para la Calidad. 5 Por qué. [fecha de consulta: 18 de Julio 2014]. Disponible en: <<http://www.aec.es/web/quest/centro-conocimiento/5-porque>>.

- MSDN Library, CLR y CLI. [fecha de consulta: 20 de Julio 2014] Disponible en: <<https://msdn.microsoft.com/es-pe/library/z1zx9t92.aspx>>.
- MSDN Library – Solver Foundation [fecha de consulta: 20 de Julio 2014]. Disponible en: <<https://msdn.microsoft.com/es-pe/library/ms687307.aspx>>
- Guroby - Características y beneficios [fecha de consulta: 20 de Julio 2014]. Disponible en: <<http://www.gurobi.com/products/features-benefits>>.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA, Índice general de materiales de construcción [fecha de consulta: 15 de Setiembre 2014]. Disponible en: <www.inei.gob.pe>.

