



**Modelo de Optimización en Producción Basado en la Teoría de las
Restricciones Como Estrategia para la Gestión de la Productividad. Caso de
Aplicación: Cantera de Agregados para la Construcción Cimaco**

Natalie Morales Londoño

Ing. Holman Ospina Mateus

Magister en Ingeniería

Director de Investigación

Universidad Tecnológica de Bolívar

Maestría en Ingeniería de Producción

Facultad de Ingeniería

Cartagena D.T y C.

2016



**Modelo de Optimización en Producción Basado en la Teoría de las
Restricciones Como Estrategia para la Gestión de la Productividad. Caso de
Aplicación: Cantera de Agregados para la Construcción Cimaco**

Natalie Morales Londoño

Universidad Tecnológica de Bolívar

Maestría en Ingeniería de Producción

Facultad de Ingeniería

Cartagena D.T. y C.

2016

Dedicatoria y Agradecimiento

A Dios que es quién, por su Gracia, permite todo lo que sucede en mi vida.

**A mi esposo Sergio Villar Salinas por su sacrificio y apoyo incondicional
para sacar adelante este proyecto.**

A mi hijo Sergio Elías por ser ese motor para salir adelante.

A mi director de trabajo de grado por su gran apoyo en este proyecto.

A mis padres por creer en mí.

A mis hermanos por estar tan pendientes de su hermana.

A mis hermanos en Cristo por su apoyo en oración.

Tabla de Contenido

| | Pág. |
|---|------|
| Resumen | 9 |
| Abstract | 10 |
| Introducción | 11 |
| Capítulo 0 El problema | 13 |
| 0.1. Descripción del problema..... | 13 |
| 0.2. Justificación..... | 14 |
| 0.3. Alcance | 16 |
| 0.4. Objetivos | 16 |
| 0.5. Metodología | 17 |
| Capítulo 1 Marco referencial | 20 |
| 1.1. La producción..... | 20 |
| 1.2. Planificación en producción bajo enfoques TOC y PL..... | 21 |
| 1.3. La teoría de las restricciones | 26 |
| 1.4. Programación lineal y análisis post- optimal. | 31 |
| Capítulo 2 Cimaco SAS caracterización del proceso productivo..... | 32 |
| 2.1. Pasos para llevar a cabo la caracterización de Cimaco SAS..... | 32 |
| 2.2. PHVA del ciclo productivo de Cimaco SAS..... | 36 |
| 2.3. Value Stream Map (VSA) - Mapa de flujo del valor..... | 37 |
| Capítulo 3 Modelo Cualitativo..... | 51 |
| 3.1. Thinking process | 51 |
| 3.2. Aplicación TOC a Cimaco SAS..... | 60 |
| 3.3. Sistema Drum – Buffer – Rope (Tambor – Amortiguador – Cuerda)..... | 63 |
| 3.4. Indicadores de desempeño | 69 |
| Capítulo 4 Modelo Cuantitativo | 73 |
| 4.1. Planteamiento del modelo matemático | 73 |
| 4.2. Datos utilizados para el modelo | 83 |
| Capítulo 5 Validación del modelo | 92 |

| | |
|---|-----|
| 5.1. Análisis de datos | 93 |
| 5.2. Combinación análisis TOC + PL | 111 |
| 5.3. Análisis de sensibilidad | 115 |
| 5.4. Análisis del modelo incluyendo demanda | 130 |
| Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones..... | 138 |
| 6.1. Conclusiones..... | 138 |
| 6.2. Recomendaciones | 142 |
| Bibliografía | 143 |
| Agudelo, L., & Escobar, J. (2010). Gestión por procesos. <i>Ed. Kimpres</i> , 237. | 143 |
| Anexos | 147 |

Listas de Figuras

| | Pág. |
|---|------|
| Figura 1. Flujo Físico Genérico de Producción..... | 21 |
| Figura 2. Proceso de Pensamiento de la Teoría de las Restricciones..... | 26 |
| Figura 3. Árbol de Prerrequisitos | 27 |
| Figura 4. Esquema de la Técnica TAC..... | 30 |
| Figura 5. Red de Macro Procesos de Cimaco SAS..... | 33 |
| Figura 6. Flujo Productivo de Cimaco SAS | 34 |
| Figura 7. Excavadora Extrayendo Material – Fase 0..... | 39 |
| Figura 8. Excavadora Extrayendo Material – Fase 0..... | 39 |
| Figura 9. Proceso en Zaranda – Fase 1..... | 40 |
| Figura 10. Cargador Llenado Volqueta – Fase 1..... | 41 |
| Figura 11. Lado Este Línea de Producción | 42 |
| Figura 12. Lado Oeste Línea de Producción..... | 43 |
| Figura 13. Triturado de ½” | 43 |
| Figura 14. Proceso Productivo Cimaco SAS. Fase 0, Fase 1 y Transporte..... | 44 |
| <i>Figura 15. Proceso Productivo Cimaco SAS. Plataformas 4, 5 y 6.....</i> | 45 |
| Figura 16. Mapa de Flujo del Valor Cimaco SAS. Estado Actual | 49 |
| Figura 17. Esquema del Diseño de Implementación de la Teoría de las Restricciones para CIMACO SAS. | 51 |
| Figura 18. Nube de Conflicto Genérica de Cimaco SAS. | 52 |
| Figura 19. Árbol de la Realidad Actual de Cimaco SAS | 54 |
| Figura 20. Árbol de la Realidad Futura de Cimaco SAS..... | 56 |
| Figura 21. Árbol de Pre-Requisitos Cimaco SAS. | 58 |
| Figura 22. Árbol de Transición Cimaco SAS. | 59 |
| Figura 23. Determinación del Drum de Cimaco SAS..... | 65 |
| Figura 24. DBR Cimaco SAS | 69 |
| Figura 25. Ubicación de Variables, Parámetros y Costos del Modelo de PL de Cimaco SAS | 74 |
| Figura 26. Comportamiento de las Variables de la Fase 0 | 96 |
| Figura 27. Comportamientos Variables Fase 1 | 101 |
| Figura 28. Comportamiento variables Plataformas 4, 5 y 6. | 108 |
| Figura 29. Cantidades de productos finales de Cimaco | 109 |
| Figura 30. Capacidades de los Recursos..... | 111 |
| Figura 31. Capacidades Utilizadas de los Recursos | 112 |
| Figura 32. Análisis de las Capacidades para Identificación del Cuello de Botella. | 115 |
| Figura 33. Aumento de la Capacidad del Recurso Restricción..... | 119 |
| Figura 34. Comportamiento de las Variables al Modificar la Capacidad del Recurso Restrictivo..... | 120 |
| Figura 35. Comportamiento la Función Objetivo | 121 |
| Figura 36. Comportamiento de los Productos Variando la Capacidad del Recurso Restricción..... | 123 |
| Figura 37. Óptimos Arrojadados por el Modelo..... | 125 |
| Figura 38. Valores Óptimos de las Variables con Dos Turnos | 126 |
| Figura 39. Cantidad total de Productos Fabricadas con Dos Turnos..... | 127 |
| Figura 40. Comportamiento de la Demanda y la Producción con Aumento de Turnos... .. | 128 |
| Figura 41. Comportamiento de los Productos Finales en el Nuevo Modelo con Demanda | 134 |
| Figura 42. Comportamiento de la Demanda vs Producción | 135 |
| Figura 43. Inventarios de Productos Semanal | 136 |
| Figura 44. Faltantes de Productos | 136 |

Lista de Tablas

| | Pág. |
|---|------|
| Tabla 1. Pasos de la TOC..... | 28 |
| Tabla 2. Caracterización del Proceso Productivo de Cimaco SAS..... | 35 |
| Tabla 3. Ciclo PHVA del Proceso Productivo de CIMACO SAS..... | 37 |
| Tabla 4. Familia de Productos de Cimaco SAS..... | 46 |
| Tabla 5. Datos de Jornada Laboral y Demanda Cimaco SAS..... | 47 |
| Tabla 6. Datos del Proceso de Extracción – Fase 0..... | 48 |
| Tabla 7. Datos del Proceso de Zarandeo - Fase 1..... | 48 |
| Tabla 8. Datos del Proceso de Trituración / Línea de Producción - P4, P5 y P6..... | 48 |
| Tabla 9. Capacidades de recursos de Cimaco SAS por fases de operación..... | 60 |
| Tabla 10. Tabla Simulación DBR Cimaco. SAS..... | 68 |
| Tabla 11. Calculo del Throughput por Pedido..... | 71 |
| Tabla 12. Cuadro de Indicadores de Gestión Cimaco SAS..... | 71 |
| Tabla 13. Capacidad de Extracción de las Terrazas de Cimaco.SAS..... | 83 |
| Tabla 14. Costo de Extracción por Terrazas por Niveles de Cimaco SAS..... | 84 |
| Tabla 15. Capacidad de Zarandeo en las Plataformas 1, 2 y 3 de Cimaco SAS..... | 84 |
| Tabla 16. Costo de Operación de la Fase 1 por Terrazas por Niveles de Cimaco SAS ... | 85 |
| Tabla 17. Cantidad de Unidades Transportadas de las Plataformas 1, 2 y 3 a la Plataforma 4 de Cimaco SAS. | 85 |
| Tabla 18. Costo Transporte por Tonelada de las Plataformas 1, 2 y 3 a la Plataforma 4 de Cimaco SAS. | 85 |
| Tabla 19. Capacidad de la Línea de Producción por Plataforma de Cimaco SAS..... | 86 |
| Tabla 20. Costo de la Línea de Producción, Plataforma 4, 5 y 6 de Cimaco SAS..... | 87 |
| Tabla 21. Factor de Recuperación del Producto 4 en las Plataformas 1, 2 y 3 de Cimaco SAS. | 88 |
| Tabla 22. Factor de Recuperación del Producto 4 en la Plataforma 4 de Cimaco SAS.... | 88 |
| Tabla 23. Factor de Recuperación del Producto 3 en la Plataforma 5 de Cimaco SAS.... | 89 |
| Tabla 24. Factor de Recuperación de los Productos 1, 2 y 3 Salientes de la Plataforma 6 por Niveles de Terrazas en Cimaco SAS..... | 89 |
| Tabla 25. Factor de Finos por Niveles de las Terrazas de Cimaco SAS. | 90 |
| Tabla 26. Precios de Venta al Público de cada uno de los Productos Ofrecidos por Cimaco SAS. | 90 |
| Tabla 27. Costo de Inventarios de Cimaco SAS. | 91 |
| Tabla 28. Resultados Variable X_{tnp} . Cantidad de Toneladas Extraídas De Las Terrazas. | 94 |
| Tabla 29. Resultados Variable I_{tnp} . Cantidad De Toneladas En Inventario En La Fase 0 . | 95 |
| Tabla 30. Resultados Variable W_{tnp} Cantidad de Toneladas que se Procesan en la Fase 1 | 98 |
| Tabla 31. Resultados Variable $I1_{tnp}$. Cantidad De Toneladas en Inventario en la Fase 1. | 99 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 32. Resultados Variable Y_{tnp} . Cantidad de Toneladas Transportadas de la Fase 1 Hacia la Plataforma 4..... | 100 |
| Tabla 33. Resultados Variable Z_{tnp} . Cantidad de Toneladas Procesadas en la Plataforma 4 | 103 |
| Tabla 34. Resultados Variable $I2_{tnp}$. Cantidad de Toneladas en Inventario al Inicio de la Plataforma 4 | 104 |
| Tabla 35. Resultados Variable O_{tnp} . Cantidad de Toneladas Procesadas en la Plataforma 5 | 105 |
| Tabla 36. Resultados Variable K_{tnp} . Cantidad de Toneladas Procesadas en la Plataforma 6. | 107 |
| Tabla 37. Cantidades de productos finales de Cimaco. | 109 |
| Tabla 38. Proporción de los Productos Principales con los Productos Desperdicios..... | 110 |
| Tabla 39. Comparación Modelos Aplicados en Cimaco. | 113 |
| Tabla 40. Análisis de Sensibilidad. Variación de la Capacidad del Recurso Restricción | 117 |
| Tabla 41. Comportamiento de la Función Objetivo | 120 |
| Tabla 42. Comportamiento de los Productos Finales | 122 |
| Tabla 43. Costos Aumento de la Capacidad del Recurso Restringido | 123 |
| Tabla 44 . Resultados Escenario 2. Cambio en la Configuración de la Línea de Producción..... | 129 |
| Tabla 45. Cantidades de Productos Finales de Cimaco en el Escenario 2..... | 130 |
| Tabla 46. Demanda Semanal Productos de Cimaco..... | 132 |
| Tabla 47. Resultados del Modelo Incluyéndole Demanda e Inventarios de Productos Finales..... | 133 |

Resumen

La cantera de agregados Cimaco SAS ubicada en el corregimiento de Turbaco, departamento de Bolívar, no cuenta con una programación eficiente y efectiva de su producción, lo cual le ha generado una cadena de consecuencias negativas para la empresa, tales como pedidos retrasados, clientes insatisfechos, problemas de rentabilidad y liquidez, y uno de los que actualmente es considerado un punto crítico, exceso de inventario.

Este trabajo de grado presenta un modelo de optimización de la producción para esta empresa basado en la teoría de las restricciones y la programación lineal, de manera que facilite el proceso de planificación y el gerenciamiento de la producción, y presente soluciones a las problemáticas planteadas en el área de fabricación, ubicando las restricciones y gestionándolas de manera efectiva.

Se hace una comparación entre el modelo cuantitativo aplicando PL y el modelo cualitativo aplicando TOC donde se obtuvieron las cantidades óptimas para producir y maximizar la utilidad de Cimaco lo que a su vez se refleja en resultados satisfactorios en la planificación de la producción.

Palabras claves:

Programación de la producción, planificación de la producción, restricciones, optimización, programación lineal, teoría de las restricciones (TOC).

Abstract

Cimaco is located in Turbaco, a small town inside Bolivar department. Nowadays, this quarry doesn't have an efficient program for its production and this situation have generated negative consequences for the company such as delayed orders, unsatisfied costumers, profitability problems, and one of the most critical points, inventory issues.

This thesis presents an optimization model for the production of this company, based on the Theory of Constraints (TOC) and linear programming, facilitating the planning process and the production management in order to show solutions to the problems suggested in the production area, locating the constraints and handling them effectively.

This thesis made a comparison between quantitative and qualitative models applying TOC and achieving concise results in order to plan the production in Cimaco, while obtaining the optimum results and maximizing the profits.

Palabras claves:

Planning production, Constraints, optimizing, linear programming, Theory of Constraints (TOC).

Introducción

Uno de los principales objetivos de las empresas es aumentar la productividad de sus procesos y como consecuencia el aumento de sus ganancias en el tiempo, por lo cual resulta primordial la efectiva gestión de las restricciones que se dan en un sistema productivo.

La cantera de agregados Cimaco SAS, presenta varias situaciones que le han generado pérdidas y subutilización de sus recursos en el proceso productivo; la Teoría de restricciones (TOC) y la programación lineal (PL), se presentan como herramientas que permitirán gestionar de manera óptima y efectiva la utilización de los distintos recursos, que se encuentran sujetos a condiciones de carácter restrictivo en su proceso productivo.

El presente trabajo de investigación aborda esta temática en 6 capítulos relacionados así: el capítulo 0, presenta el problema de investigación, los objetivos, la justificación y el alcance de esta; en el capítulo 1 se encuentra el marco referencial, se definen conceptos acerca de la producción, la planificación de la producción con el enfoque TOC y PL y antecedentes sobre casos donde se aplicó la teoría de las restricciones (estado del arte); el capítulo 2 está dedicado a la empresa Cimaco SAS y la caracterización de su proceso productivo: pasos, PHVA del ciclo productivo y el VSM.

Por su parte los capítulos 3 y 4 abordan la teoría de las restricciones en sus modelos cualitativo y cuantitativo respectivamente; en el capítulo 3 se plasma el diagnóstico actual de la empresa Cimaco SAS en su sistema productivo, con el fin de definir cuál es la raíz del problema utilizando las herramientas que suministra la TOC (nube de conflicto, árbol de la realidad actual, entre otras), se definen las restricciones y que se debe cambiar en el proceso, teniendo en cuenta los indicadores de desempeño y gestión de la empresa; y el capítulo 4 presenta un modelo de PL desarrollado para planificar la producción de la cantera Cimaco SAS, describiendo la formulación matemática desarrollada como estrategia de gestión de la productividad.

El capítulo 5 se muestra la validación del modelo planteado para Cimaco SAS, mediante la utilización del software GAMS, se presentan los análisis por fases incluyendo las variables, las restricciones y parámetros que interactúan en cada una. En este capítulo, se realiza un análisis de sensibilidad que permite llevar a la

empresa a diferentes escenarios supuestos para analizar cuál es la mejor opción para esta incluyendo la demanda, como se abarca actualmente y como se abracaría con los escenarios planteados, y en el último capítulo se esbozan las conclusiones y recomendaciones que arrojo la investigación y validación del modelo para la empresa.

Capítulo 0 El problema

0.1. Descripción del problema

En el año 2014 en Colombia, el sector de la construcción jugó un papel muy importante para el crecimiento de la economía del país, siendo el sector líder con una expansión del 9.9% se consolidó como el motor de la economía colombiana, seguido por el sector explotación de minas y canteras el cual creció un 8,7%.

Por otra parte en el 2015, la construcción generó aproximadamente 98.800 nuevos empleos, demostrando así que es el sector de mayor crecimiento porcentual de ocupados. Además, según el dinamismo regional, Cartagena se ubicó entre las cinco ciudades con mayor crecimiento en la construcción en el país (El tiempo, 2015).

Es de vital importancia gracias al crecimiento que ha tenido la ciudad en la construcción, que este sector cuente con proveedores que estén organizados, de manera que puedan cumplir con los pedidos y con el alto crecimiento que tendrá los siguientes años.

Cimaco SAS abarca los dos sectores más importantes para el crecimiento de la economía del país, es una empresa del sector minero y de la construcción del departamento de Bolívar, ubicada en Turbaco sector loma de piedra Km. 8, cuya actividad económica es la producción de agregados para la construcción, derivada de la piedra Caliza mediante la explotación de cantera.

Actualmente Cimaco SAS maneja la programación de la producción en una hoja de datos de Excel, los trabajadores del área no cuentan con una formación técnica que les permita consolidar este proceso, como uno de los claves para aumentar su rentabilidad, además, no están capacitadas para retroalimentar el sistema en la hoja electrónica, lo que equivale a 1 o 2 días de atraso.

Con respecto a los grandes pedidos de clientes, estos se manejan directamente con el gerente, quien informa al área encargada de una manera informal, generando una cadena de consecuencias negativas para la empresa, como pedidos retrasados por falta de aseguramiento de la calidad, clientes insatisfechos y producción de manera descontrolada, problemas de rentabilidad, problemas de liquidez, aumento de costos de mantenimiento y almacenamiento, y, uno de los que actualmente es considerado un punto crítico, exceso de inventario lo que a su vez puede resultar en la obsolescencia del material.

Teniendo en cuenta que esta práctica de explotación se lleva a cabo a cielo abierto, se considera el clima como uno de los factores más influyentes en la producción puesto que son susceptibles a condiciones naturales inciertas, como lluvias, fuertes vientos, entre otros, convirtiéndose en un tema delicado debido a la presencia de agua en los agregados durante tiempos prolongados o los continuos ciclos de saturación y secado causando reacciones negativas en los componentes químicos de los materiales y descomposición orgánica, convirtiéndolos no aptos para la construcción.

Es por esto que para Cimaco SAS es una necesidad, que el despacho del material se realice en estado seco para que sea considerado material apto y así evitar poner en riesgo la calidad de los productos por obsolescencia de material, lo cual representa costos considerables para la empresa.

Dado el caso descrito anteriormente, se pretende aportar en el mejoramiento de la estructura empresarial de Cimaco SAS, a través de una planificación de producción adecuada a su actividad económica, que le permita optimizar los recursos de la empresa y sacarles el máximo rendimiento relacionado con mano de obra, infraestructura e instalaciones y parar las pérdidas que están teniendo por exceso de inventario, gasto excesivo de energía, entre otros, de acuerdo a los conceptos que mejor se adapten a su entorno empresarial sirviendo como punto de partida para una implementación novedosa en la industria.

0.2. Justificación

La planeación de la producción es de vital importancia en cualquier empresa de manufactura, puesto que permite organizarse de manera adecuada con el fin de satisfacer las necesidades de los clientes. Es por esto que es significativa cualquier actividad que busque la eficiencia y la efectividad para garantizar la buena prestación del servicio, aumento de la productividad, disminución de inventarios y por ende, el aumento de los ingresos representados en su Throughput (Sipper, 1998).

Cimaco SAS es conocida por los años de trayectoria, es considerada la cantera más antigua del sector y la más acreditada por grandes y pequeños clientes. Su buen nombre le ha permitido mantenerse posicionada en el mercado de la construcción, sin embargo, sus administradores son conscientes que deben realizar un cambio estratégico para mejorar sus procesos productivos y para ello, por medio de este trabajo de grado, se ha encontrado en la Teoría de las Restricciones una herramienta valiosa gracias a su integración de pensamiento sistémico y la interacción de sus partes, una estrategia metodológica que le permitirá focalizar sus

actividades en la obtención de una mejora integral de la organización, la cual será medida en mayores utilidades y no mejoras aisladas.

Por lo tanto, la TOC permitirá a Cimaco SAS entrar en el proceso de mejora continua a través de las herramientas desarrolladas por su creador, denominadas procesos de pensamiento la cual se basa en responder de manera lógica y sistemática a tres preguntas, ¿Qué cambiar?, ¿A que cambiar? Y ¿Cómo provocar el cambio?

En los últimos años, la administración de Cimaco SAS ha venido sumando esfuerzos para lograr una incorporación de conceptos, que le permitan conseguir un óptimo desarrollo de su producción con el fin de alcanzar niveles satisfactorios. Actualmente, Cimaco SAS buscar centrar sus actividades empresariales para el desarrollo de un sistema de planeación de producción fiable, con bases matemáticas, que se adapten a sus necesidades y que le permita alcanzar una toma de decisiones pensando en sus metas estratégicas empresariales, lo cual le permitirá obtener resultados efectivos y tangibles en los puntos más críticos de la cantera como gastos energéticos excesivos, tiempo de ocio en máquinas y empleados, incumplimiento en fechas de entrega de grandes pedidos, exceso de inventario, entre otros.

Es por esto, que se requiere el apoyo de herramientas que permitan gestionar de manera óptima y efectiva los recursos de carácter restrictivo de la compañía, técnicas como la teoría de las restricciones y la programación lineal las cuales ofrecen un soporte sólido para la toma de decisiones incidiendo directamente en el crecimiento rentable de la empresa. La teoría de las restricciones se ha consolidado como una herramienta fundamental para focalizar las acciones, hacia una correcta toma de decisiones. La TOC como metodología está al servicio de la gerencia, lo cual le permite direccionarla hacia la consecución de resultados de manera lógica y sistemática, contribuyendo a garantizar el principio de continuidad empresarial.

Bajo estas expectativas, este trabajo de grado busca ofrecer una metodología sólida, como es la que nos presenta la teoría de las restricciones junto con la técnica de programación lineal, que permita abordar los puntos críticos del proceso productivo, para fortalecerlo de una manera robusta sobre las bases matemáticas lo que proporcionará una óptima planificación de la producción identificando y gestionando las restricciones mediante el desarrollo de un modelo base de optimización. Esto proporcionará una fuente de ventaja competitiva y permitirá llevar a cabo la implementación del modelo de planificación y control de la producción bajo este enfoque, el cual servirá a su vez como antecedente a otras investigaciones futuras para la optimización de la producción, en empresas de este tipo realizando un respectivo balance por medio de indicadores de gestión.

0.3. Alcance

La presente investigación llegara hasta desarrollar un modelo de optimización de la producción basado en la teoría de las restricciones, aplicable a la pyme cantera de agregados CIMACO SAS, ubicada en Turbaco sector loma de piedra Km. 8.

Se desarrollara el modelo cualitativo aplicando la teoría de las restricciones y el modelo matemático por medio de programación lineal, obteniendo resultados en cada uno de ellos para luego llevar a cabo una comparación de los dos modelos, de manera que permitan establecer si existe alguna diferencia, esto se realizara debido a que la teoría de las restricciones tiene muchos detractores por no incluir planteamientos matemáticos en su modelo, esta tesis busca encontrar si existe alguna diferencia entre un modelo y otro.

En esta investigación se pretende aplicar los modelos mencionados, de manera que den soporte a la administración de Cimaco SAS para la toma de decisiones en el área de producción, suministrando un sistema de mejora continua y un mecanismo que permita identificar las restricciones y gestionarlas de manera correcta para que no se limiten sus ganancias.

Para ello se tomara en cuenta la situación actual de la empresa (2016) en su proceso de producción y el (los) problema (s) que restringe (n) un mayor desempeño de la misma, para dejar como producto de este proceso un planteamiento de las mejoras (modelo de optimización), sin llegar a su ejecución sirviendo como punto de partida para futuros trabajos de investigación.

0.4. Objetivos

Objetivo general

Diseñar un modelo de optimización en producción basado en la teoría de las restricciones, para facilitar el proceso de planificación y el gerenciamiento de las restricciones como herramienta estratégica para la maximización de las utilidades en una cantera de agregados para la construcción CIMACO SAS en la ciudad de Cartagena.

Objetivos específicos

- Recolectar información a través de un estado del arte, sobre la definición de los modelos aplicados a producción en sectores de manufactura flujo continuo, que complemente la aplicación de la teoría de las restricciones con modelos de optimización.
- Caracterizar y evaluar el proceso productivo de Cimaco SAS, por medio de la herramienta Value Stream Map o mapa del flujo del valor para el análisis del flujo del proceso, material e información inmiscuido en él y la identificación de los cuellos de botellas del sistema así como las actividades que agregan valor a este.
- Diseñar un modelo matemático para la planificación de producción, que integre los conceptos de la teoría de las restricciones, de tal manera que permita explorar y determinar cómo se rompen las capacidades y como se balancea el flujo del proceso.
- Resolver por medio de programación lineal entera usando el software **GAMS**, el modelo matemático representado con las restricciones del sistema productivo declarando variables, ecuaciones y Solver de tal manera que permita obtener resultados que sirvan como referencia para su posterior implementación por parte de la empresa.
- Analizar y validar el impacto de los modelos por medio de análisis cuantitativos de manera que permita determinar si son una representación efectiva, para el sistema actual de la empresa, realizando mediciones en términos económicos y una evaluación del mejoramiento obtenido.

0.5. Metodología

El desarrollo del modelo que se propondrá se llevará a cabo de la siguiente manera:

- **Revisión y análisis del estado del arte, sobre modelos de optimización de producción que incluyan teoría de las restricciones.**
 1. Identificación de investigaciones de referencia en la teoría de las restricciones.

2. Revisión de modelos de optimización basados en la teoría de las restricciones.
 3. Descripción de enfoques y criterios a tener en cuenta en la implementación de la teoría de las restricciones dentro del modelo matemático.
- **Caracterización del proceso productivo**
 1. Identificación de la distribución de la línea de producción.
 2. Esquema del flujo del proceso o diagrama de flujo de proceso.
 3. PHVA de la empresa.
 4. Mapa del flujo del valor y análisis de la técnica grafica VSM.
 5. Evaluación del modelo actual.
 - **Modelo Cualitativo**
 1. Aplicación conceptos TOC.
 2. Desarrollo diagramas TOC.
 3. Aplicación sistema DBR.
 4. Análisis de indicadores TOC.
 - **Modelo matemático e identificación de variables, restricciones y planteamiento de función objetivo como representación del sistema productivo actual.**
 1. Identificación de variables, parámetros y restricciones.
 2. Determinación de datos utilizados en el modelo.
 - **Aplicación PL a través de software GAMS**
 1. Declaración de variables y ecuaciones.
 2. Declaración de resolución y solver.
 3. Análisis de los resultados arrojados.
 4. Análisis de capacidades y flujo del proceso.
 - **Análisis del modelo**
 1. Análisis de datos arrojados por el modelo. para la determinación de una correcta dirección en términos financieros.
 2. Comparación TOC + PL.
 3. Análisis de sensibilidad como base objetiva que le sirva a la gerencia, para la toma de decisiones en tiempo real para el corto y mediano plazo estableciendo una relación directa con la meta de la empresa.

- **Evaluación y/o validación del modelo planteado y comparación con el actual.**
 1. Pruebas del modelo bajo el contexto de escenarios productivos.
 2. Comparación cuantitativa de los modelos.
 3. Conclusiones del modelo según resultados arrojados.

- **Consolidación de los resultados del trabajo de investigación**
 1. Documento de trabajo de grado.
 2. Entrega de resultados de la investigación

Capítulo 1 Marco referencial

1.1. La producción

La función de producción comenzó a estudiarse desde principios de la historia. El hombre guiado por sus necesidades la descubrió sin darse cuenta, iniciando su desarrollo; el cual se ha extendiendo hasta la actualidad y seguramente seguirá con esa misma tendencia hacia el futuro, pues sin producir se estancaría la economía mundial.

Marx, definió la producción como “Todo proceso a través del cual un objeto, ya sea natural o con algún grado de elaboración, se transforma en un producto útil para el consumo o para iniciar otro proceso productivo. La producción se realiza por la actividad humana de trabajo y con la ayuda de determinados instrumentos que tienen una mayor o menor perfección desde el punto de vista técnico” (Barráez & Grimau, 2010);

A este concepto de producción, se le han incorporado muchas otras definiciones que se articulan al proceso productivo, tal es el caso de la planeación de la producción de la cual Buffa (1996) afirma:

“La planeación de la producción se ocupa de la toma de decisiones, relacionadas con los procesos de producción, de modo que los productos o servicios resultantes se elaboren de acuerdo con las especificaciones, en las cantidades y la distribución requerida, al costo mínimo”.

La esencia de cualquier sistema de producción está relacionado con el proceso de manufactura, este abarca dos componentes fundamentales: materiales e información.

Figura 1. Flujo Físico Genérico de Producción



Fuente: Adaptado de Sipper, D. (1998). Planeación y control de la producción. México: Editorial McGraw-Hill

En la figura 1, se observa un modelo genérico del flujo físico en un sistema de producción, donde la materia prima fluye por todas las etapas que llevan a cabo la transformación hasta llegar al cliente.

Poco a poco, la producción comenzó a convertirse en uno de los conceptos fundamentales dentro del ámbito empresarial y de manufactura, y fueron surgiendo diferentes investigaciones que se relacionaban con la producción, su planeación, estrategias y el desarrollo de nuevas herramientas como apoyo para mejorar (optimizar) significativamente el proceso de producción.

En las últimas décadas se han desarrollado varias herramientas de gestión con el fin de lograr procesos que permitan mejorías sostenibles y continuas en la producción, programas como calidad total, mejoramiento continuo, sistema de justo a tiempo y la teoría de las restricciones, han surgido como alternativa de solución para una eficiente y eficaz planeación de proceso de producción.

1.2. Planificación en producción bajo enfoques TOC y PL

En la búsqueda de herramientas para mejorar los proceso de producción desde su planificación, el Dr. Eliyahu Goldratt (Goldratt & Cox, 1988) a principios de los 80's, empezó el desarrollo de una nueva filosofía de gestión llamada "Teoría de Restricciones" (TOC por sus siglas en inglés: Theory of Constraints), que buscaba ser solución al problema de optimización de la producción.

Esta teoría plantea un proceso de mejora continua y su premisa básica establece que la salida del sistema está determinada por sus restricciones, teniendo una aplicación más amplia que la planeación y control de la producción.

Estas limitaciones o restricciones pueden ser políticas de venta, contratación, proveedores incluso de mercado; sin embargo, las limitaciones más frecuentes se encuentran dentro de los sistemas productivos y estos son los recursos con capacidad insuficiente; a estos recursos se les conoce como cuello de botella, los cuales marcan el ritmo dentro de la producción limitándola.

Goldratt & Cox (1988), sostienen que el objetivo de toda empresa es ganar dinero y es aquí donde entran una serie de parámetros claves que desarrollaron para entender mejor su filosofía, entre los que se encuentran inventario, gastos de operación y Throughput; este último se define como la velocidad en que el sistema genera dinero a través de las ventas, entendiendo mejor este concepto, vale la pena saber que una unidad producida no vendida no generará Throughput y está dada por precio de venta menos costo de materia prima.

La pregunta de cómo la metodología TOC puede ofrecer soporte válido a las empresas, ha permitido que se hayan realizado en los últimos años diferentes investigaciones al respecto, aplicando y probando esta teoría en diferentes escenarios y empresas obteniendo resultados positivos

Dentro de estas investigaciones podemos nombrar algunas significativas como la realizada por Bakke & Hellberg (1991), quienes hicieron una comparación entre la contabilidad tradicional y la contabilidad que propone la TOC determinando que esta última es una metodología apropiada para la toma de decisiones a corto plazo, puesto que fija la diferencia entre sus costos fijos y sus costos variables, mientras que el costeo ABC, es apropiado para la toma de decisiones a largo plazo, pues refleja la relación causa y efecto que se generen en el tiempo entre las actividades, productos y costos.

Por su parte Lee & Plenert (1993), tuvieron la iniciativa de investigar cómo se podría ligar la Teoría de las Restricciones, con el uso de técnicas matemáticas para la solución de los problemas de programación de la producción y fueron quienes determinaron que cuando se trata de un modelo con numerosas restricciones la programación lineal es superior para encontrar la solución.

Los investigadores Fredendall & Lea (1997), se enfocaron en el desarrollo de un algoritmo que les permitió tomar decisiones óptimas, concernientes a la producción de productos mixtos para sobrepasar el déficit del enfoque TOC; siguiendo la misma corriente, Hsu & Chung (1998) presenta un algoritmo (más efectivo que el de los autores anteriores) siguiendo la esencia de los cinco pasos de la TOC sugiriendo que es útil cuando una planta tiene múltiples recursos limitados o restringidos.

El tema de los tiempo de entrega y la teoria de las restricciones fue abordado por Torres (2004), el cual aplico la TOC a una empresa fabricante de productos semiterminados de acero obteniendo como resultado una mejora significativa en los tiempos de entrega al detectar los cuellos de botellas, gestionarlos y elevarlos hasta lograr un desempeño alto.

Por su parte Tsai, W., Lai, C. & Chang, J. (2005), desarrollaron un algoritmo para optimizar la programación de la producción, donde realizaron un cálculo de prioridades a los cuellos de botella mostrando que este se constituye como una herramienta practica para la obtención de la programación de productos que optimizan beneficios.

La metodología de la teoría de las restricciones es versátil en su aplicación pues esta puede ser aplicada a cualquier clase de industria considerando que todos los procesos de producción tienen restricciones, para esto, se ha demostrado el éxito de su aplicación en las áreas de empresas que tienen necesidades marcadas, tal es el caso de Morales J. (2006) quien aplicó los conceptos de la teoría de las restricciones en una empresa de artes gráficas, específicamente en el área logística, detectando cuales eran las dificultades que impedían aumentar las ganancias, de manera que permitiera estructurar los mecanismos y elementos para afrontarlas.

Amorim & Seido (2012) propusieron una nueva heurística basada en la teoría de las restricciones para optimizar la producción mixta convirtiéndola en una opción favorable y óptima; así mismo Tsou (2012), exploró algunas técnicas de simulación en la cadena de suministros mediante la aplicación de la teoría de las restricciones con el fin de ajustar los niveles de inventario, además, permitió estudiar la eficacia de diferentes estrategias de gestión de inventarios como objetivo principal de esta investigación.

Ortiz & Cai (2012), realizaron una investigación donde diseñaron un plan óptimo de producción, en una planta embotelladora de gaseosas en la cual se identificaron las restricciones del sistema productivo. Para el desarrollo del modelo matemático según la metodología propuesta por la programación lineal, obteniendo las cantidades optimas de fabricación al menos costo. Además, el estudio permitió evidenciar que existía una capacidad productiva que estaba siendo subutilizada para lo que se plantearon diferentes escenarios con el fin de aprovechar todos los recursos que nos ofrece la empresa.

Cannon, Cannon & Low (2013), incorporaron en el problema de optimización factores en la función objetivo del problema tales como las limitaciones de la oferta

en la interacción de productos mixtos, demostrando así, la importancia de considerar teorías alternativas en las simulaciones de negocios.

Ortiz (2013), utilizó técnicas de optimización y teoría de las restricciones para diseñar un modelo aplicado a una empresa del sector textil y de confecciones obteniendo como resultado un aumento de los niveles de productividad en sus procesos y por ende, un aumento de utilidades y beneficios para la empresa.

La teoría de las restricciones ha ayudado a identificar los problemas de muchas organizaciones permitiendo el desarrollo de estrategias de mejora continua, es el caso de Calvachi & Gonzalez (2013), quienes usaron la teoría de las restricciones como herramienta gerencial dentro de una pequeña empresa del sector de confecciones lo cual les permitió identificar que el alto nivel de inventarios está afectado su rentabilidad de manera estrepitosa pues, en el caso de aplicación, la empresa recurre al apalancamiento financiero lo que les incrementa sustancialmente los gastos operacionales.

Pretorius (2013) , utilizó los pasos de la TOC en la elaboración de un diagrama de flujo con el objetivo de mejorar la comprensión de estos cinco pasos del enfoque mediante la adición de algunos puntos decisivos que permiten una aplicación más práctica de esta poderosa herramienta obteniendo resultados la demostración de la aplicabilidad de los cinco pasos del enfoque TOC a todo tipos de restricciones, la toma de decisiones basándose en la dinámica de las restricciones y la necesidad de que la explotación y la subordinación siempre se lleve a cabo de manera continua.

Por su parte Cabrera (2014), utilizó un simulador que le permitió hacer una representación de la realidad de una empresa manufacturera con el fin de saber cómo se puede manejar la planificación de la producción y su cadena de distribución con base en la teoría de las restricciones evidenciando las ventajas competitivas que se pueden tener a través de los niveles de inventarios teniendo una buena planificación de la producción y control dentro de la cadena de suministros; Caicedo & Ortiz (2014), desarrollaron un modelo matemático para determinar la mezcla óptima de producción en una empresa de calzado partiendo del enfoque de la contabilidad del Throughput identificando las restricciones del sistema productivo obteniendo como resultado las cantidades optimas y la secuenciación de producción demostrando que se pueden obtener mayores utilidades operacionales a través de la identificación de escenarios y oportunidades para el aprovechamiento de sus recursos.

Costas, Borja, de la Fuente, Pino, & Puche (2014), aplicaron la teoría de las restricciones aportando evidencias de que esta contribuye para generar ventajas

operativas y financieras para cada elemento dentro de la cadena de suministro sin ningún efecto colateral indeseable y Golmohammadi (2014), investigó técnicas de optimización implementando la teoría de las restricciones y las reglas del sistema JobShop aplicando un estudio de caso en la industria automotriz obteniendo como resultados que las actuales reglas deben ser modificadas para su aplicación en la industria actual.

En cuanto a las restricciones los investigadores Sims & Wan (2015), aplicando la TOC proponen tres nuevos métodos para identificar de las restricciones en los sistemas de manufactura esbelta. El primero de ellos es análisis de restricción de flujo el cual se utiliza realizando una comparación de las cadencias y los tiempos de ciclo de los recursos en el sistema de producción, análisis de la utilización efectiva que se puede empelar para determinar la ubicación de la restricción para un proceso o una estación específica comparando el rendimiento de la producción actual con la capacidad ideal del sistema y por último, análisis de la utilización efectiva y rápida usado cuando hay pocos datos históricos de rendimiento de la línea.

Y este año 2016 Matloub, Mehmood, & Hussein (2016), han investigado el impacto de las restricciones de capacidad y las existencias de seguridad en el efecto látigo en un modelo de una cadena de suministros mediante experimentos de simulación junto con el diseño de Taguchi con el fin de estudiar los efectos no lineales de las restricciones de la capacidad en la cadena de suministros ofreciendo así a los administradores una forma práctica para encontrar el equilibrio entre la capacidad y los inventarios de seguridad en los diferentes escalones para la toma de decisiones sobre sus existencias y su capacidad.

El modelo de las restricciones ha sido implementado por diferentes empresas en el mundo tales como : 3M, Delta airlines, Ford Electronic, General Motors Corporation y Protect and Gamble entre otras; por su parte en Colombia empresas como Leonisa, Licorera de Calda, Purina, Azul K, Sicolsa y otras; obteniendo con la implementación del modelo entre otros los siguientes resultados: reducción del 50% en el tiempo de entrega, reducción de inventarios del 49%, e incremento del 40% en las utilidades netas entre otros (Morales, 2006)

Teniendo en cuenta las investigaciones y casos citados acerca de la teoría de las restricciones y las estadísticas presentadas, se considera aplicar esta teoría y la programación lineal en a la empresa Cimaco SAS, buscando con ello desarrollar una favorable planificación de la producción, de manera que se aporte un modelo de optimización que sirva como estrategia para la gestión de la productividad, midiendo su efectividad, llevando al límite de la capacidad sus cuellos de botellas y por ende acelerando todo el proceso productivo para conseguir aumentar su Throughput.

1.3. La teoría de las restricciones

La teoría de las restricciones es una metodología concebida por el Dr Eliyahu Goldratt en 1979 la cual ha sido desarrollada progresivamente para ayudar a las empresas a pensar en los problemas existentes de manera que puedan desarrollar soluciones de gran avance e implementar estas soluciones de manera exitosa.

1.3.1. Metodología para el desarrollo de la teoría de las restricciones. La TOC se basa en el principio de que todas las empresas tienen al menos una restricción crítica que les impide la generación infinita de utilidades. Estas restricciones se clasifican en dos tipos: Restricciones físicas y Restricciones políticas

Restricciones políticas

Son aquellas que se dan por la manera de administrar la empresa y se originan en una causa raíz. TOC desarrolla una metodología basada en el método de pensamiento científico o Thinking process con el fin de encontrar las causas profundas de los efectos que nos encontramos en nuestros sistemas.

Figura 2. Proceso de Pensamiento de la Teoría de las Restricciones



Fuente: Adaptado de Goldratt, E., & Cox, J. (1988). *La meta*. Argentina: Editorial Granica

Este proceso permite:

- Identificar cual es el problema principal que no permite el avance hacia la meta de la organización mediante el uso de la herramienta del árbol de la realidad actual (efecto-causa-efecto) la cual consiste en detectar los problemas de raíz certificando las causalidades en cada paso.

- Buscar acciones innovadoras y estratégicas que permitan eliminar conflictos organizacionales que causan el problema principal de la empresa a través de la herramienta nube de conflicto central considerada uno de los procesos de pensamiento de Goldratt que consiste en definir adecuadamente un problema para su resolución (indeseable) concretando el problema en termino de daño directo y su remedio habitual (difícil).
- Validar las acciones estratégicas que permitirán alcanzar los objetivos estratégicos. Para esto se utiliza el árbol de la realidad futura que se usa para evaluar la solución, encontrar posibles contingencias y neutralizarlas antes de que ocurran.
- Diseñar con claridad el camino de la implementación en la operación del negocio utilizando las herramientas de Árboles de Prerrequisitos, técnica usada para identificar y relacionarse con los obstáculos de implementación de la nueva solución. Creando una nueva realidad con cada solución.

Figura 3. Árbol de Prerrequisitos



Fuente: Oscar Morales & Asociados. (2008). Medidores TOC. Obtenido de <https://www.citethisforme.com/es>

Restricciones físicas

Son aquellas restricciones que se dan cuando el recurso no es capaz de suministrar la demanda que le es solicitada.

Para llevar a cabo el proceso de mejora continua, Goldratt desarrolló cinco pasos para aplicar la TOC:

Tabla 1. Pasos de la TOC

| # | Pasos de la TOC |
|---|---|
| 1 | <i>Identificar las restricciones del sistema.</i> |
| 2 | <i>Decidir cómo explotar las restricciones del sistema.</i> |
| 3 | <i>Subordinar todo lo demás a la decisión tomada en el paso 2.</i> |
| 4 | <i>Elevar las restricciones del sistema. El término elevar significa hacer posible el logro de un desempeño más alto respecto a la meta.</i> |
| 5 | <i>Si en los pasos anteriores se ha violado una restricción, se regresa al paso 1. No debe permitirse que la inercia se convierta en una restricción.</i> |

Fuente: Goldratt, E., & Cox, J. (1988). *La meta*. Argentina: Editorial Granica

Estos pasos conllevan a la plena identificación, administración y gestión de las restricciones cuellos de botellas.

Paso 1. Identificar la restricción del sistema: cuál es el cuello de botella; el recurso que tiene una capacidad inferior a los demás y es considerada la restricción del sistema.

Paso 2: Explotar las restricciones: Se requiere determinar de qué manera se debe explotar la restricción para maximizar su utilidad y usarlo de la manera más efectiva posible; esto se logra evitando tiempo ocioso, haciendo mantenimientos para evitar averías, producir partes que no serán necesarias, etc.

Paso 3. Subordinar el resto del sistema a la restricción: se hace necesario que el nivel de utilización de los recursos no restrictivos, sean determinados por el cuello de botella. Es decir, se deben programar los recursos con base en la restricción.

Paso 4. Elevar la restricción. Este paso lo que busca es tratar aumentar la capacidad del cuello de botella de manera que permita agregar valor a este. Para lograrlo se puede desplazar partes a otros procesos, aumentar las horas-hombres, aumentar maquinaria o subcontratando parte de la producción del cuello de botella.

Paso 5. Volver al paso 1: Tras haber roto la restricción, se lleva a cabo un nuevo ciclo de TOC en el que se debe identificar una nueva restricción; un análisis que permitirán mantener una revisión continúa del proceso y de sus restricciones.

1.3.2. Medición del desempeño. La metodología TOC postula que la meta y el desempeño de una organización pueden medir a través de 3 indicadores definidos de manera cuidadosa para observar el rendimiento operacional:

- Throughput (T): se define como la razón en el cual el sistema genera dinero mediante las ventas de los productos elaborados. El cálculo del Throughput está definido por el resultado de las ventas totales menos los costos variables totales.
- Inventario (I): se reporta como la infraestructura, equipos, herramientas, pallets y otras inversiones en activos; así como materia prima e insumos que hacen parte del proceso para producir el Throughput. (Hernández, 2014).
- Gastos operativos (G.O): hace referencia a todo el dinero que emerge de la organización para el pago de salarios, arriendo y cualquier otro costo no variable.
- Utilidad neta (U.N): Es considerada como la diferencia del Throughput y los gastos operacionales, es decir, la diferencia entre el precio de venta y los costos variables.
- Rendimiento de la inversión (ROI) = $[T - GO] / I$: Es la razón entre la utilidad neta y la inversión que se ha realizado. Este indica que tan bien está siendo utilizado el dinero puesto por los accionistas de la empresa.
- Productividad= Throughput / Gastos operacionales

1.3.3. Técnica Tambor – Amortiguador – Cuerda (TAC). Esta herramienta es una técnica para el control de la producción que permite implementar los pasos de explotación, supeditación y elevación de TOC. Esta analogía creada por Goldratt, tiene en cuenta tres factores en los procesos productivos:

- Amortiguador. Inventarios de productos en proceso que debe existir antes del cuello de botella para que este no se detenga.

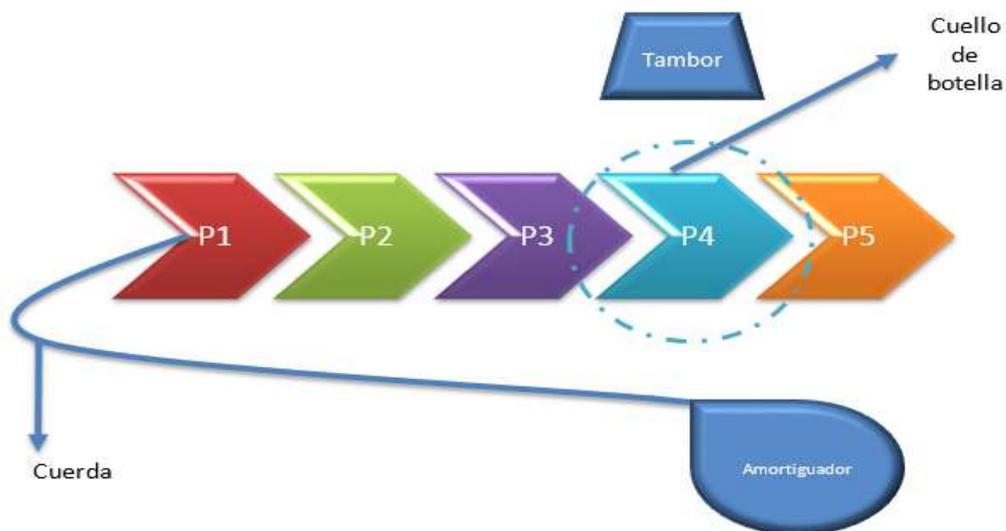
- Tambor. Determina el ritmo al cual debe trabajar el cuello de botella.
- Cuerda. Indica el momento en que se debe suministrar materiales al cuello de botella y cuando parar dicho suministro.

El objetivo de esta técnica es trabajar al ritmo de la capacidad del recurso cuello de botella y procesar los productos en el momento oportuno para su entrega a tiempo sin necesidad de utilizar la capacidad máxima de los recursos no cuello de botellas.

Para que la técnica TAC sea efectiva, se debe tener una buena programación del cuello de botella teniendo en cuenta su capacidad máxima, el amortiguador de tiempo por si se presentan inconvenientes durante el proceso y los productos que se tienen que cumplir para la entrega final a los clientes. Esta práctica, permite utilizar la capacidad máxima del cuello de botella.

Consiste en identificar los cuellos de botellas de manera que se conviertan en un punto de control natural, es decir, el cuello de botella marca el ritmo de producción que controla el sistema, a este punto de control le llamaremos Tambor. La razón por la que se usa el cuello de botella como punto de control es garantizar que las operaciones anteriores produzcan lo suficiente para crear un inventario antes del cuello de botella.

Figura 4. Esquema de la Técnica TAC



Fuente: Elaboración propia

1.4. Programación lineal y análisis post- optimal.

La programación lineal es un método de planificación muy útil para la toma de decisiones el cual requiere elegir entre un gran abanico de alternativas.

Según Alvarado (2011) la importancia de la aplicación de la programación lineal radica en la fortaleza de modelar problemas complejos y la posibilidad que tienen los usuarios para resolver modelos de gran escala mediante programas de cómputo sustentados en el procedimiento de resolución simplex. Sin embargo, lo más importante es el análisis pos óptimo, el cual nos permite realizar cambios en el modelo original con el fin de encontrar un valor óptimo aún mejor o conocer los resultados que se darían si se cambia el plan de producción antes de ejecutar el proyecto representado en el modelo.

“La programación lineal es un método matemático de resolución de problemas donde el objetivo es optimizar un resultado a partir de seleccionar los valores de un conjunto de variables de decisión, teniendo en cuenta las restricciones correspondientes a disponibilidad de recursos, especificaciones técnicas y otras condicionantes que limiten la libertad de elección”. (Weber, 1984)

Un modelo general de programación lineal, consta de función objetivo y restricciones; para la construcción del modelo de programación lineal, se tienen en cuenta datos como costos, e ingresos generados por unidad, disponibilidad de recursos, especificaciones técnicas, requerimientos y aportes por unidad de cada actividad que se considere dentro del modelo.

Después de construir, procesar y analizar el modelo y el comportamiento de los resultados encontrando el óptimo económico y la solución óptima se procede a realizar el análisis post óptimo el cual comprende la variación de datos del modelo de manera individual, es decir, se realizan cambios de un dato a la vez para hacer un análisis de sensibilidad con el supuesto que todos los demás datos permanecen estables (Alvarado, 2011).

Capítulo 2 Cimaco SAS caracterización del proceso productivo

La caracterización de un proceso consiste en identificar todos los elementos que hacen parte de un proceso específico, documentándolos en función de la naturaleza de sus actividades, de manera que se establezca una relación con los demás procesos internos o externos, insumos, salidas y clientes. (Universidad Nacional , 2008)

Para llevar a cabo la caracterización del proceso de producción de Cimaco SAS, se realizó un estudio sobre el sector en el que se mueve, de manera que permitiera determinar diferentes puntos claves dentro del proceso.

La contribución minera en la economía Colombiana ha registrado incrementos significativos de manera progresiva y palpables en indicadores como el PIB minero de Colombia, así como en las exportaciones, inversión extranjera, entre otros; este incremento en la producción minera del país se debe principalmente al carbón y en una medida menor a la caliza, la cual en su gran mayoría es consumida dentro del mercado doméstico y especialmente en el sector de la construcción que en los últimos años ha presentado un creciente auge. (Ministerio de Minas y Energía, 2016)

Actualmente en el departamento de Bolívar y en especialmente en la ciudad de Cartagena, existen varias proyecto inmobiliarios que demandan este tipo de material para construcción, lo que significa que las canteras de la zona deben tener un plan de producción que permita abastecer toda la demanda del sector de la construcción, con los materiales para ello como la caliza.

En el caso de Cimaco SAS, cuyo producto principal y materia prima es la caliza, se deben organizar de tal manera que puedan suministrar y proveer a los clientes de los productos requeridos.

2.1. Pasos para llevar a cabo la caracterización de Cimaco SAS

Paso 1. Definición de los macro procesos: Como primer paso se identificaron de manera gráfica la red de procesos dentro de Cimaco, teniendo en cuenta los tipos de niveles con los que cuenta:

- **Procesos estratégicos:** son aquellos procesos que establecen, definen y controlan las metas de la empresa proporcionando directrices e indicando como se debe operar para el logro de la visión de la empresa.

- Procesos operativos: son los procesos que impactan directamente sobre la satisfacción del cliente y aspectos fundamentales de la misión de la empresa.
- Procesos de soporte: estos procesos apoyan los procesos operativos y estratégicos para el cumplimiento de los objetivos.

Después de llevar a cabo un análisis de todos los procesos de Cimaco SAS, se define el mapa de procesos de la siguiente manera:

Figura 5. Red de Macro Procesos de Cimaco SAS



Fuente: Elaboración Propia

Paso 2. Despliegue e inventario de procesos: Luego de definido los macro procesos se selecciona el que será objeto de análisis, en el caso de Cimaco SAS, el objeto del estudio estará dentro del macro proceso operativo específicamente el proceso de producción.

Se llevó a cabo un despliegue de la manera como se opera esta función identificando los procesos o conjunto de actividades que permiten que las entradas se transformen en resultados y se tengan unas salidas.

En la siguiente ilustración, se puede observar, para el caso de Cimaco SAS, cuales son los procesos que componen la gestión de la producción.

Figura 6. Flujo Productivo de Cimaco SAS



Fuente: Elaboración propia

A partir de esta información, se llevó a cabo un análisis de cada uno de los procesos concluyendo que cumplen con las condiciones de que son secuenciales, se complementan entre si y son lógicos; además se determinaron los elementos que lo componen tales como proveedores, entradas, recursos, controles, salidas y usuario.

Paso 3. Validar el resultado con los responsables del proceso: El siguiente paso consiste en llevar a cabo la divulgación de la información y la validación de los resultados que se van alcanzando por medio de la socialización con los responsables de cada proceso, discusión de contenidos y su presentación final.

La caracterización del proceso de gestión de la producción de Cimaco SAS, se definieron claramente cada uno de los componentes que lo conforman, con los involucrados del proceso. El resultado lo podemos ver a continuación:

Tabla 2. Caracterización del Proceso Productivo de Cimaco SAS

| PROCESO: Gestión de la Producción | | |
|---|--|---|
| OBJETIVO: proceso que se lleva a cabo para fabricar los productos que se venden al consumidor final pasando por la planificación, ejecución y control de técnicas productivas para el éxito de este. | | |
| PROVEEDORES Proceso de Compras - Proceso de Ventas - Almacén - Recursos humanos - Proceso de Mantenimiento – Clientes | | |
| ENTRADAS | ACTIVIDADES | SALIDAS |
| Orden de despacho de material. Orden de producción. Orden de salida del almacén. Bitácora de combustible. Informe técnico de maquinaria. Concesión minera. | <u>Extracción – Fase 0</u> Escogencia de terreno. Preparación de la máquina. Extracción del banco de tierra. <u>Zarandeo – Fase 1</u> Cargue de volqueta. Alimento de zaranda. Proceso de vibración para la separación y división del material. | Producto terminado Registro control Control de producción Formato control insumos. Informe promedio día. |
| PROCESOS DE APOYO | <u>Transporte</u> Cargue del material apto para procesado Transporte del material. | CLIENTES Ventas Calidad |
| MECANISMO DE CONTROL | <u>Triturado</u> Plataforma 4 Descargue de material. Inspección del proceso. Operación mandíbula Almacenamiento zavorra Operación trituradora primaria <u>Plataforma 5</u> Operación Zaranda Operación cono o trituradora secundaria <u>Plataforma 6</u> Operación zaranda Almacenamiento | INDICADORES Indicador de productividad Eficiencia de maquinaria. |
| DOC. ASOCIADOS | RESPONSABLE Jefe de operaciones Operadores de planta Operadores de máquina. | REQUISITOS Resolución 307 del 7 de julio del 2014. Resolución 125 del 31 de mayo del 2014 Concesión minera #10350 |
| | RECURSOS Maquinaria: Retroexcavadora hidráulica x 3, Volqueta x 3, Zaranda Scalper x 3, Cargador Volvo x 3, Trituradora, Gasolina Recursos humanos: 5 operadores, Suministro de oficina, PC, Paquete office | |

Plataformas 1, 2 y 3

Fuente: Elaboración Propia

La caracterización como base para todo despliegue de los procesos de producción de Cimaco SAS se llevó a cabo de forma cuidadosa, atendiendo la coherencia y su consistencia, para esto se aplicó una metodología basada en enfoque por procesos que permitió plasmar y manejar los conceptos manteniendo un hilo conductor a lo largo de toda la caracterización, siendo más eficientes al considerar las actividades agrupadas entre si teniendo en cuenta que las actividades deben permitir una transformación de las entradas en salidas y que debe aportar valor y ejercer control sobre el conjunto de actividades.

2.2. PHVA del ciclo productivo de Cimaco SAS

La herramienta PHVA es una herramienta de mejora continua, que brinda a las empresas una solución para mantener la competitividad de los productos, servicios, reduce costos, mejora la calidad y productividad, aumenta la participación del mercado, provee nueva visión de puestos de trabajo y aumenta la rentabilidad de la empresa.

Para nuestro trabajo, se llevó a cabo el ciclo PHVA del proceso de producción de Cimaco SAS, con el fin de establecer las metas del proceso suprimiendo del camino los inconvenientes encontrados y siguiendo la estrategia del ciclo de la calidad, evidenciando que este ciclo se encuentra asociado con la planificación, implementación, control y mejora del desempeño de los procesos, siendo un faro de orientación a la alta gerencia de Cimaco SAS, para soportar la toma de decisiones que afectan la organización. Además, esta herramienta garantiza una uniformidad de los procesos y procedimientos que se siguen en el sistema productivo de Cimaco SAS para la fabricación de los productos finales.

Para Cimaco SAS, esta herramienta permitió visualizar de una manera completa, amplia y sistémica todo el entorno y la singularidad del proceso de producción, permitiéndole tener una visión integral

A continuación, se presenta el ciclo PHVA del proceso de producción de Cimaco SAS.

Tabla 3. Ciclo PHVA del Proceso Productivo de CIMACO SAS

| CICLO | QUE | COMO | QUIEN |
|-------|---|---|---|
| P | Gestionar y presupuestar los insumos y la producción total limite. | Organización orden de producción y especificaciones confirmando pedidos de clientes por medio de su contacto. | Jefe de operaciones |
| H | Llevar a cabo proceso de extracción – fase 0, zarandeo – fase 1 y trituration donde se ubican las plataformas 1, 2 y 3 teniendo en cuenta especificaciones y cantidad de clientes. | Recursos humanos Recursos técnicos. Maquinaria. Recursos monetarios. | Operadores de planta Operadores de máquina |
| V | Verificar que los estándares y especificaciones se cumplan. | Tomando muestras de la producción. | Jefe de operaciones |
| A | En casos de encontrar anomalías, si el porcentaje de finos supera el 1% del peso del material, se debe hallar la causa y aplicar los correctivos. Material llevado a reproceso de trituration. | Identificando que características no cumplen con lo especificado y cuales pueden causar reacciones a los componentes químicos de materiales y descomposición orgánica a través de pruebas realizadas. | Jefe de operaciones |

Fuente: Elaboración Propia

2.3. Value Stream Map (VSA) - Mapa de flujo del valor

El Mapeo de Flujo de Valor es una herramienta que sirve para ver y entender un proceso e identificar sus desperdicios, permitiendo detectar fuentes de ventaja competitiva.

Ayuda a establecer un lenguaje común entre todos los usuarios del mismo y comunica ideas de mejora, enfocando al uso de un plan priorizando los esfuerzos de mejoramiento. Un flujo de valor muestra la secuencia y el movimiento de lo que

el cliente valora. Incluye los materiales, información y procesos que contribuyen a obtener lo que al cliente le interesa y compra; se define como:

La técnica de dibujar un “mapa” o diagrama de flujo simple, mostrando como los materiales e información fluyen “puerta a puerta” desde el proveedor hasta el Cliente. Busca eliminar o al menos reducir desperdicios, pudiendo ser útil para la planeación estratégica y la gestión del cambio. (Cabrera, 2012)

Para mostrar la secuencia y el movimiento de todo el proceso productivo de Cimaco SAS, se utilizó la herramienta Value Stream Map o Mapa de flujo de valor la cual nos permite entender su proceso e identificar desperdicios; permitiendo detectar fuentes de ventaja competitiva, además, esta metodología, permite crear una trazabilidad para localizar los puntos críticos o de mejora del proceso a través de indicadores, de manera que nos proporciona suficiente información para la generación de un feedback y nos permita modificar los procesos con el fin de optimizar la creación de valor al consumidor final o cliente.

Esta herramienta servirá como material de gestión visual para la identificación de puntos de mejora, en el proceso productivo de Cimaco SAS. Básicamente se muestra como los materiales e información fluyen desde los diferentes lugares de origen, pasando desde los proveedores hasta los clientes buscando reducir o eliminar desperdicios de manera que sirva dentro de la planeación estratégica y la gestión de cambio de la empresa permitiendo identificar todas las actividades que hacen parte del desarrollo de un producto o servicio desde que entra la materia prima, hasta que llega al cliente, con el fin de encontrar oportunidades de mejora que tengan un impacto sobre toda la cadena productiva y no en procesos aislados.

Michael Porter inicio la idea de cadena de valor con el fin de establecer lo que realmente es importante y tiene valor para el cliente. (Cabrera R., 2014)

Al final, obtendremos un conocimiento integral y completo de cada uno de los procesos que intervienen en la cadena productiva de Cimaco SAS, consiguiendo un conocimiento integral de cada uno de los procesos que intervienen en la cadena de valor, permitiendo centrarse en cada uno de los eslabones descubriendo los momentos en que el servicio pueda ser mejorado, eliminando los factores que no generan valor ni optimizan recursos. De igual forma, se pretende coordinar las actividades entre los distintos departamentos buscando maximizar correctamente los intereses de la empresa.

2.3.1. Proceso productivo de Cimaco SAS. Actualmente Cimaco SAS se encuentra operando bajo la licencia de explotación minera 10350, otorgada por la Agencia Nacional de Minería (ANM).

El proceso productivo de Cimaco SAS inicia en la fase 0, donde hacen parte los bancos de tierra disponibles para su explotación los cuales abarcan una extensión de 300 metros cada uno. Debido a su gran longitud, Cimaco SAS divide su explotación en terrazas, cada una cuenta con una excavadora hidráulica CAT 390. Cada terraza maneja 3 niveles imaginarios de extracción que abarcan de 2 a 3 metros aproximadamente de arriba hacia abajo.

Figura 7. Excavadora Extrayendo Material – Fase 0



Figura 8. Excavadora Extrayendo Material – Fase 0



Luego que las excavadoras extraen se pasa a la fase 1, la cual consta de la operación principal zarandeo. Para llevar a cabo esta operación, Cimaco cuenta con volqueta de 15 m³, un cargador Volvo y una zaranda Scalper sobre oruga.

El material extraído de las diferentes terrazas se lleva a una zaranda donde se separa el material del más fino al más grueso. Del total del material zarandeado, Aproximadamente 20% se almacena como zahorra y el 80% pasa a la línea de producción con el objetivo de convertir las piedras en tamaño comercial y limpiarlas quitándole la cantidad de finos, este porcentaje depende del nivel de la terraza del que se extraiga.

Figura 9. Proceso en Zaranda – Fase 1



Figura 10. Cargador Llenado Volqueta – Fase 1



Las volquetas ubicadas en las plataformas 1, 2 y 3 transportan el material zarandeado hacia la línea de producción.

La línea de producción se divide en 3 plataformas subsiguientes en todo el proceso de producción. La plataforma 4 está compuesta primeramente por una rampa de descarga donde las volquetas se ubican para descargar el material extraído de las terrazas, seguido por un alimentador que hace veces de zaranda, lo que permite sacar el material de relleno llamado Zahorra que sale por una banda transportadora. Aproximadamente el 20% del material ingresado pasa a ser zahorra y el 80% continua en línea de producción, este porcentaje depende del nivel de la terraza del que se extraiga. El material más grueso, pasa a la trituradora primaria la cual tritura el material rompiéndolo y convirtiéndolo en material más pequeño.

Todo el material procesado pasa a la plataforma 5 por medio de una banda transportadora que recibe el material en la zaranda 1, cuyo objetivo es limpiar el material quitándole la mayor cantidad de finos a la piedra más grande. El material que traspasa la zaranda sale por una banda transportadora la cual termina en el almacenamiento de polvillo aproximadamente 5%, este porcentaje depende del nivel de la terraza del que se extraiga. El material que no traspasa la zaranda, el otro 95%, es llevado a un shuttle de descarga y preclasificación, el cual va dosificando el material poco a poco hacia un cono o trituradora secundaria que tiene como objetivo romper las piedras para llevarlas al tamaño comercial.

El material triturado, pasa a la plataforma 6 por medio de un shuttle de descarga y preclasificación seguido de una nueva banda transportadora que conecta con la zaranda 2. Una vez ingresado el material a la zaranda 2, este es zarandeado desprendiéndole más cantidad de finos los cuales pasan a una banda transportadora que permite almacenar polvillo para su venta, un 5%, así como una nueva malla interna clasifica el material de 1" y 1/2" con un porcentaje de 30% y 30% respectivamente saliendo cada uno por diferentes bandas transportadoras para su almacenamiento, este porcentaje depende del nivel de la terraza del que se extraiga. El material que no pasa la malla principal de la zaranda, 30%, retorna a la trituradora secundaria a través de una banda transportadora que lleva este material al reproceso. Los valores que se presentan son aproximados, en el capítulo donde se desarrollara el modelo cuantitativo, se presentaran las tablas con los datos exactos por terrazas y niveles.

Figura 11. Lado Este Línea de Producción



Figura 12. Lado Oeste Línea de Producción



Figura 13. Triturado de ½"



A continuación, se presenta el proceso productivo de Cimaco SAS.

EXTRACCIÓN, ZARANDEO Y TRANSPORTE

| | | |
|-------------------------------|-----------------|-------------------|
| Fase 0 | Fase 1 | Transporte |
| Plataformas 1, 2 y 3 | | |
| Extracción de terrazas | Zarandeo | |

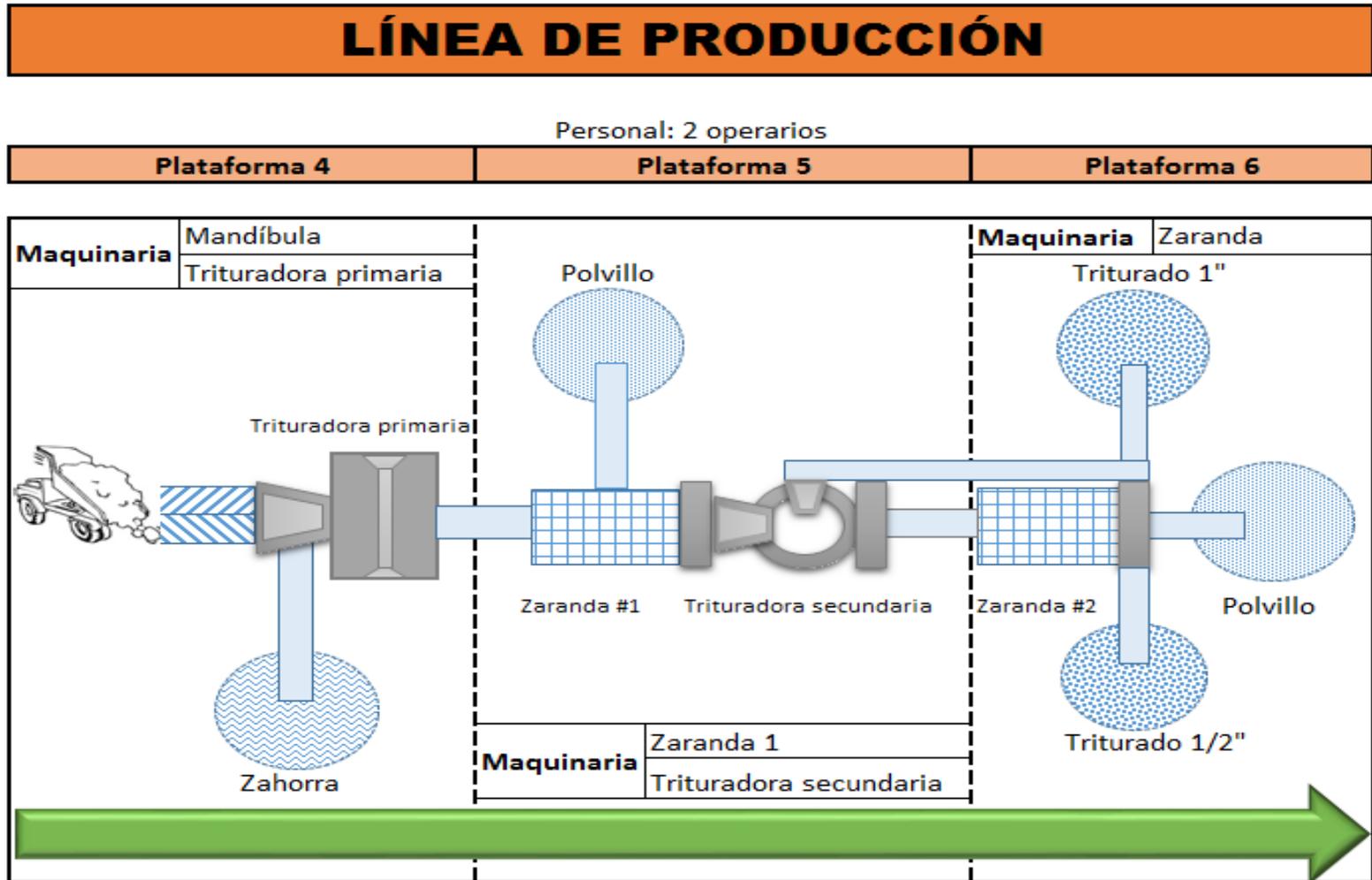
| | | | | | |
|-------------------|--------------------|-------------------|-----------------|-------------------|------------------|
| Maquinaria | Excavadora CAT 360 | Maquinaria | Zaranda Scalper | Maquinaria | Volqueta |
| Cantidad | 3 | | Cargador Volvo | Cantidad | 3 |
| Personal | 1 operario x maq. | | Volqueta | Personal | 1 operario x Rec |

| | | | |
|-----------------|----------------|-----------------|--------------------|
| Cantidad | 1 de cada Maq. | Personal | 2 op. X plataforma |
|-----------------|----------------|-----------------|--------------------|



Fuente: Elaboración propia

Figura 15. Proceso Productivo Cimaco SAS. Plataformas 4, 5 y 6



Fuente: Elaboración propia

2.3.2. Elaboración del VSM. Para la elaboración del mapa de flujo de valor de Cimaco SAS, se tomó como referencia los pasos que describe el auto Rafael Cabrera en su libro VSM: Mapeo del Flujo de Valor. VSM: Extendido para Cadena de Suministro los cuales se describen a continuación:

Paso 1. Identificar la familia de producto: Para el caso de Cimaco SAS, la familia de productos es una sola puesto que los tres productos que produce son del mismo material, mono material, y pasan por todas las operaciones del proceso. En la siguiente tabla podemos observar:

Tabla 4. Familia de Productos de Cimaco SAS

| | | OPERACIONES | | | | | | |
|--|-----------------------------|--------------------|----------|-------------|----|------------------------|--|--|
| | | Fase 0 | | Fase 1 | | Línea de producción | | |
| | | Plataformas | | P1, P2 y P3 | | Triturado y almacenaje | | |
| | | Extracción | Zarandeo | P4 | P5 | P6 | | |
| P R O D U C T O S | Zahorra de Zaranda | ✓ | ✓ | | | ✓ | | |
| | Polvillo | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | |
| | Triturado de 1´ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | |
| | Triturado de 1/2´ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | |
| | Zahorra de triturado | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | |

Fuente: Elaboración propia

Paso 2. Diagrama del estado actual: este paso permite mostrar los procesos como actualmente existen en la empresa, lo que permite comprender las necesidades para el cambio y para detectar donde se encuentran las oportunidades de mejora.

Para su elaboración se obtuvieron los siguientes datos:

- El Tiempo del Ciclo (CT). Es el tiempo que pasa entre la fabricación de una pieza o producto completo y la siguiente.
- El tiempo del valor agregado (VA). Es el tiempo de trabajo dedicado a las tareas de producción, que transforman el producto, de tal forma que el Cliente esté dispuesto a pagar por el producto.
- El tiempo de cambio de modelo (C/O). Es el tiempo que toma para cambiar un tipo de proceso a otro. Tiempo de puesta a punto. (Un cambio de color a otro, etc.)

- d. El número de personas (NP) El número de personas requeridas para realizar un proceso particular.
- e. Tiempo Disponible para Trabajar (EN) Es el tiempo de trabajo disponible del personal restando descansos por comidas, ir al baño, etc.
- f. El plazo de Entrega - Lead Time (LT) Es el tiempo que se necesita para que una pieza o producto cualquiera recorra un proceso o una cadena de valor de principio a fin.
- g. % del Tiempo Funcionando (Uptime) Porcentaje de tiempo de utilización o funcionamiento de las máquinas. Confiabilidad de la máquina.
- h. Cada pieza Cada... (CPC): Es una medida del lote de producción, cada cuanto cambia de modelo (...cada día, cada turno, cada hora, cada tarima, cada charola, etc.)

Para iniciar con el proceso de mapeo de flujo de valor, se partirá de la base que ninguna operación tiene cambio de modelo por lo tanto tampoco se maneja los datos relacionados con estos.

A continuación se presentan los datos de la jornada laboral y demanda de Cimaco SAS

Tabla 5. Datos de Jornada Laboral y Demanda Cimaco SAS

| | |
|---|----------------------------|
| Jornada laboral: | 9,5 horas por turno |
| Tiempo de almuerzo: | 1 hora |
| Tiempo preparación maquina (inicio operación): | 1,25 horas/día |
| Tiempo de alistamiento (final operación): | 1,25 horas/día |
| Numero de turnos: | 1 turno diario |
| Día hábiles por mes: | 20 días/mes |
| Demanda mensual: | 22.000 ton/mes |

Fuente: Elaboración propia

2.3.2.1. *Calculo de datos de cada uno de los procesos*

1. Proceso de Extracción – Fase 0:

Tabla 6. Datos del Proceso de Extracción – Fase 0

| MAQUINARIA O EQUIPO | RETROEXCAVADORA | 3 UND. |
|--|------------------------|--|
| Número de personas | NP | 3 operadores |
| Tiempo de ciclo | CT | 28" x 1 Ton |
| Tiempo disponible para trabajar. | EN | 360 ´ x día x 3 Maquinas = 1080 min x día |
| Porcentaje del tiempo de funcionamiento | UPTIME | 70,5% |

Fuente: Elaboración propia

2. Proceso de Zarandeo – Fase 1 Plataformas 1, 2 y 3:

Tabla 7. Datos del Proceso de Zarandeo - Fase 1

| Maquinaria o equipo usado | Cargador Volvo Volqueta de 15 m3 Zaranda sobre oruga | 1 c/u |
|--|---|--|
| Número de personas | NP | 3 operadores |
| Tiempo de ciclo | CT | 30" x ton |
| Tiempo disponible para trabajar. | EN | 360 ´ x día x 3 Maquinas = 1080 min x día |
| Porcentaje del tiempo de funcionamiento | UPTIME | 75,5% |

Fuente: Elaboración propia

3. Línea de producción – Plataformas 4, 5 y 6:

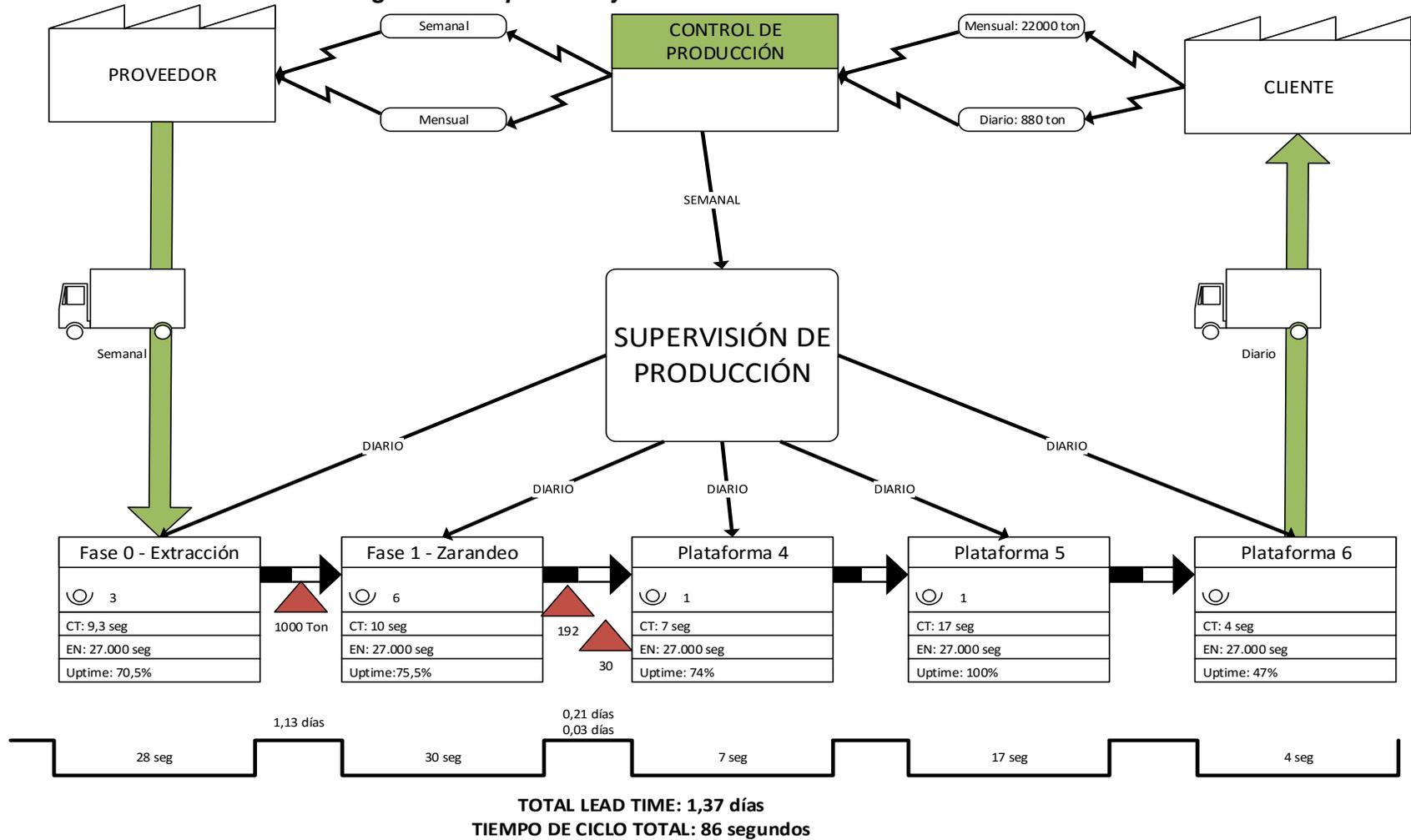
Tabla 8. Datos del Proceso de Trituración / Línea de Producción - P4, P5 y P6

| | P4 | P5 | P6 |
|--|-----------------------------|-----------|-----------|
| Maquinaria o equipo usado | Trituradora | | |
| Número de personas | 2 operarios | | |
| Tiempo de ciclo | 7" x ton | 17" x ton | 4" x ton |
| Tiempo disponible para trabajar. | 450 ´ x día = 27.000" x día | | |
| Porcentaje del tiempo de funcionamiento | 73,8% | 100% | 46,6% |

Fuente: Elaboración propia

Se construye el mapa de flujo del valor de Cimaco SAS:

Figura 16. Mapa de Flujo del Valor Cimaco SAS. Estado Actual



Fuente: Elaboración propia

2.3.2.2. *Calculo del tiempo TAKT*. El tiempo takt es un indicador de la frecuencia de compra del cliente y que generalmente se calcula con el objetivo de adaptar el sistema de producción de manera que se satisfaga las expectativas de los clientes.

A continuación se calcula el Tiempo TAKT o TAKT time del proceso productivo de Cimaco SAS:

Se toman los datos de la jornada laboral especificados anteriormente en la tabla 4:

$$\text{Tiempo disponible} = \left(9,5 \frac{\text{horas}}{\text{turno}}\right) - \left(1 \frac{\text{hora}}{\text{turno}}\right) - \left(1,25 \frac{\text{hora}}{\text{turno}}\right) - \left(1,25 \frac{\text{hora}}{\text{turno}}\right)$$

$$\text{Tiempo disponible} = 6 \frac{\text{horas}}{\text{turno}} * 60 \text{ minutos} * 60 \text{ segundos}$$

$$\text{Tiempo disponible} = 21.600 \frac{\text{seg}}{\text{turno}}$$

$$\text{Demanda diaria} = \frac{22.000 \frac{\text{ton}}{\text{mes}}}{20 \frac{\text{dias}}{\text{mes}}} = 1.100 \frac{\text{ton}}{\text{día}}$$

$$\text{Tiempo TAKT} = \frac{21.600 \frac{\text{seg}}{\text{día}}}{\frac{1100 \text{ton}}{\text{día}}} = 20 \text{ seg/ton}$$

Por medio de esta herramienta, mapa de flujo de valor o Value stream map se conoció y entendió a profundidad y de una manera visual el proceso productivo de Cimaco, permitiendo identificar el flujo de información y materiales hasta que el producto llega al cliente, además, permitió identificar las operaciones que no agregan valor al proceso y el tiempo asociado a dichas actividades.

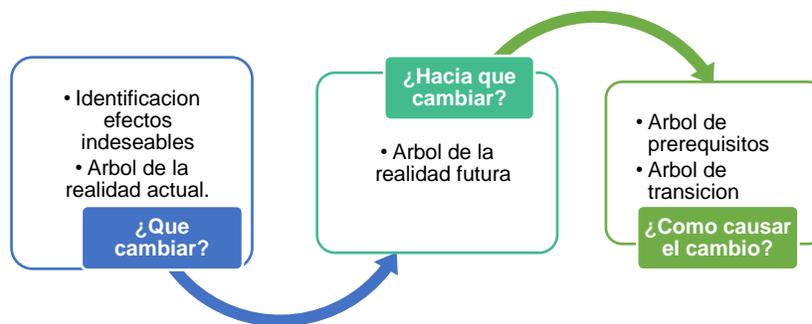
El sistema productivo de Cimaco tiene una capacidad de producción de 960 toneladas/día, sin embargo, tiene una demanda superior a su capacidad productiva. Esta capacidad se limita por la plataforma 5 considerado el cuello de botella de la línea de producción, con una capacidad muy inferior lo que no permite que la producción sea mayor. El tiempo TAKT indica que en Cimaco SAS el cliente compra con una frecuencia promedio de 20 segundos por tonelada, lo que significa que este deberá ser el objetivo de producción. La capacidad disponible del proceso productivo no se usa al 100%.

Capítulo 3 Modelo Cualitativo

3.1. Thinking process

Para el desarrollo del modelo cualitativo de Cimaco, se aplicaron los pasos de la Teoría de las restricciones tal como se muestra en la siguiente figura

Figura 17. Esquema del Diseño de Implementación de la Teoría de las Restricciones para CIMACO SAS.



Fuente: Elaboración propia

3.1.1. ¿Qué cambiar? La primera fase de la metodología a aplicar es el diagnóstico de la situación actual de la empresa a través de la identificación de conflictos que se presentan en el sistema productivo de Cimaco para luego identificar los efectos indeseables y finalmente, sintetizar toda la información recolectada para determinar la causa raíz de los problemas. Para este paso, se usaran las herramientas que nos suministra la TOC como nube de conflicto, árbol de la realidad actual, árbol de la realidad futura, árbol de prerequisites y árbol de transición.

Nube de conflicto

Esta es una herramienta lógica de TOC la cual consiste en definir bien un problema con el fin de resolverlo, esta herramienta sirve para explicar y eliminar los conflictos que se presentan en la realidad. Goldratt introdujo la herramienta de evaporación de nubes como un medio para el desarrollo de soluciones sencillas y beneficiosas para los conflictos de larga data en la gestión de la producción ayudando a tomar mejores decisiones de forma sistémica, enfocando cada

problema con un conflicto y el desarrollo de soluciones que invalida una o más de las suposiciones. (Andersen, Guptab, & Gupta, 2013)

A continuación, se presenta la gráfica de nube de conflicto de Cimaco:

Figura 18. Nube de Conflicto Genérica de Cimaco SAS.



Fuente: Elaboración propia

El sistema de producción de Cimaco SAS es un sistema rustico el cual no comprende manejos administrativos formales y la comunicación entre áreas es pobre o nula, esto permite que los volúmenes de producción no sean los adecuados

pues, no se trabaja de manera alineada por lo que hay pérdidas de tiempo, exceso de inventarios y no se tiene en cuenta los requerimientos de calidad para el proceso de producción y sus actividades generando reprocesos lo que inmediatamente, disminuye el Throughput del sistema.

La anterior nube de conflicto se lee de la siguiente manera, para que haya una correcta planificación de la producción se debe conocer las necesidades de los clientes con anticipación para lo que es bueno implementar in sistema sobre pedidos; por otro lado, para que haya una correcta planificación de la producción, se deben integrar todas las áreas de las empresas y proveedores por lo que no se debe implementar sistema sobre pedidos.

Árbol de la realidad actual

Esta herramienta se utiliza para identificar los problemas de fondo que son causantes de los efectos indeseables. Teniendo en cuenta que el primer paso para llegar a la solución es el opuesto al problema de fondo. Para la construcción del árbol de la realidad actual de Cimaco, se listaron los efectos indeseables que se dan dentro del sistema productivo y se relacionaron entre si llevando a cabo conexiones.

En la figura 12 podemos observar el árbol de la realidad actual de Cimaco.

Figura 19. Árbol de la Realidad Actual de Cimaco SAS



Fuente: Elaboración propia

3.1.2. ¿Hacia qué cambiar? En este paso se trata de construir una solución completa que permitirán el alcance de un nivel de desempeño superior.

De acuerdo a lo descrito en el árbol de la realidad actual de Cimaco, se considera que la causa principal que está afectando a Cimaco es la falta de planificación de la producción de manera que no se controla cada una de las actividades que hace parte del sistema productivo de la empresa así como tampoco se priorizan las actividades críticas para disminuir los tiempos y cumplir con los pedidos a clientes a tiempo. De esta manera, el área operativa de Cimaco, contará con herramientas que le permitirán llevar a cabo una toma de decisiones objetiva, basada en lo planeado de manera que se contribuya a la mejora de indicadores globales de la empresa.

Continuando con la metodología TOC, el siguiente paso es la búsqueda de alternativas de solución a esos efectos indeseables. Para esto, se construye el árbol de la realidad futura de manera que permita indicar hacia donde se quiere llegar

En la figura 13 podemos observar el árbol de la realidad futura de Cimaco.

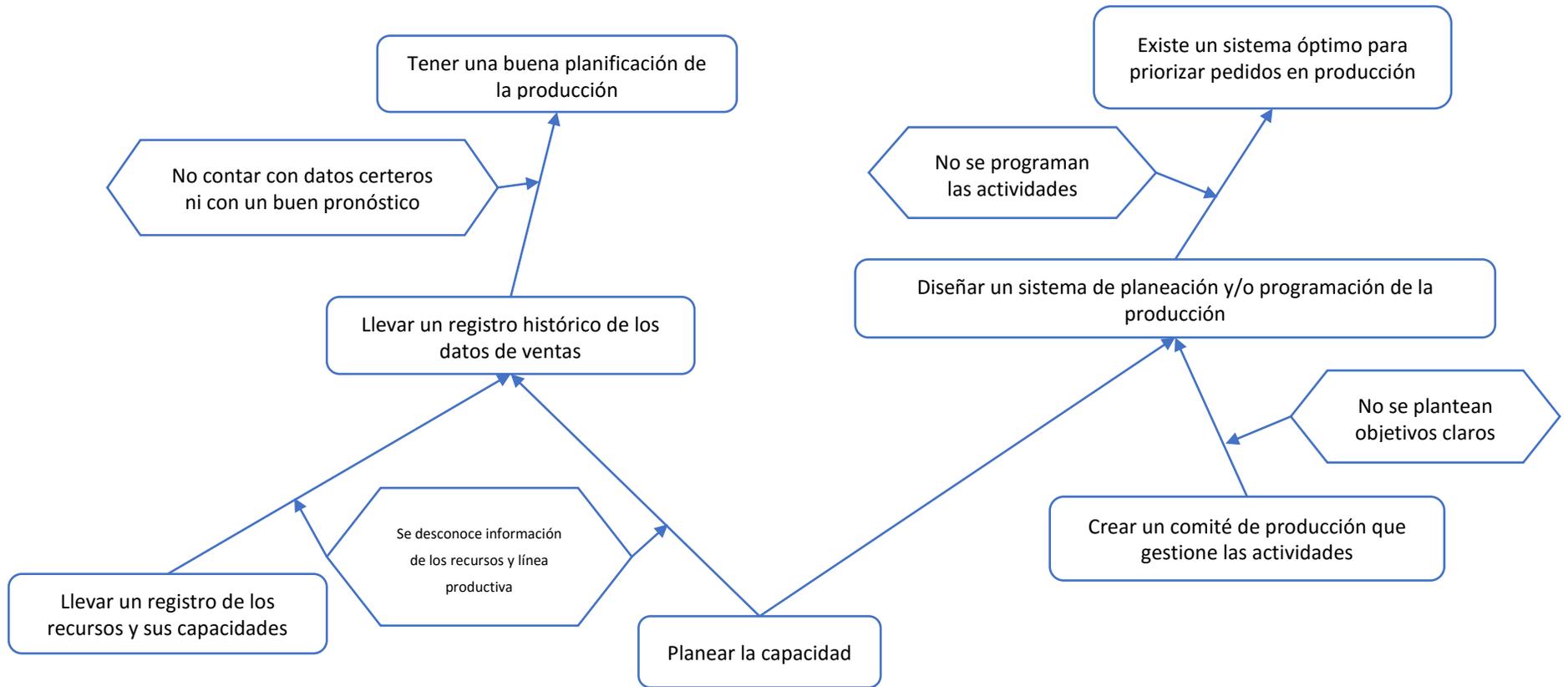
3.1.3. ¿Cómo inducir el cambio? Para inducir el cambio, se deben establecer estrategias para el logro de los objetivos descritos anteriormente, de manera que se identifiquen cuáles son las acciones necesarias para cumplirlos. Goldratt propone la construcción del árbol de prerequisites donde se identifican y relaciones los obstáculos que se pueden encontrar al implementar una solución así como la manera de superarlos.

Adicional a esto, se debe construir un esquema gráfico que materializa la táctica que permitirá que la solución obtenida se implemente con éxito cuantificando las necesidades económicas y los beneficios esperados, así como el plan de acción. Este esquema es el árbol de transición el cual proporciona los detalles de cómo se alcanzaran los objetivos y como se superan los obstáculos

El árbol de transición, es la técnica que se materializa en la táctica que permitirá que la solución obtenida sea implementada con éxito convirtiéndose en el plan de seguimiento para una implementación exitosa.

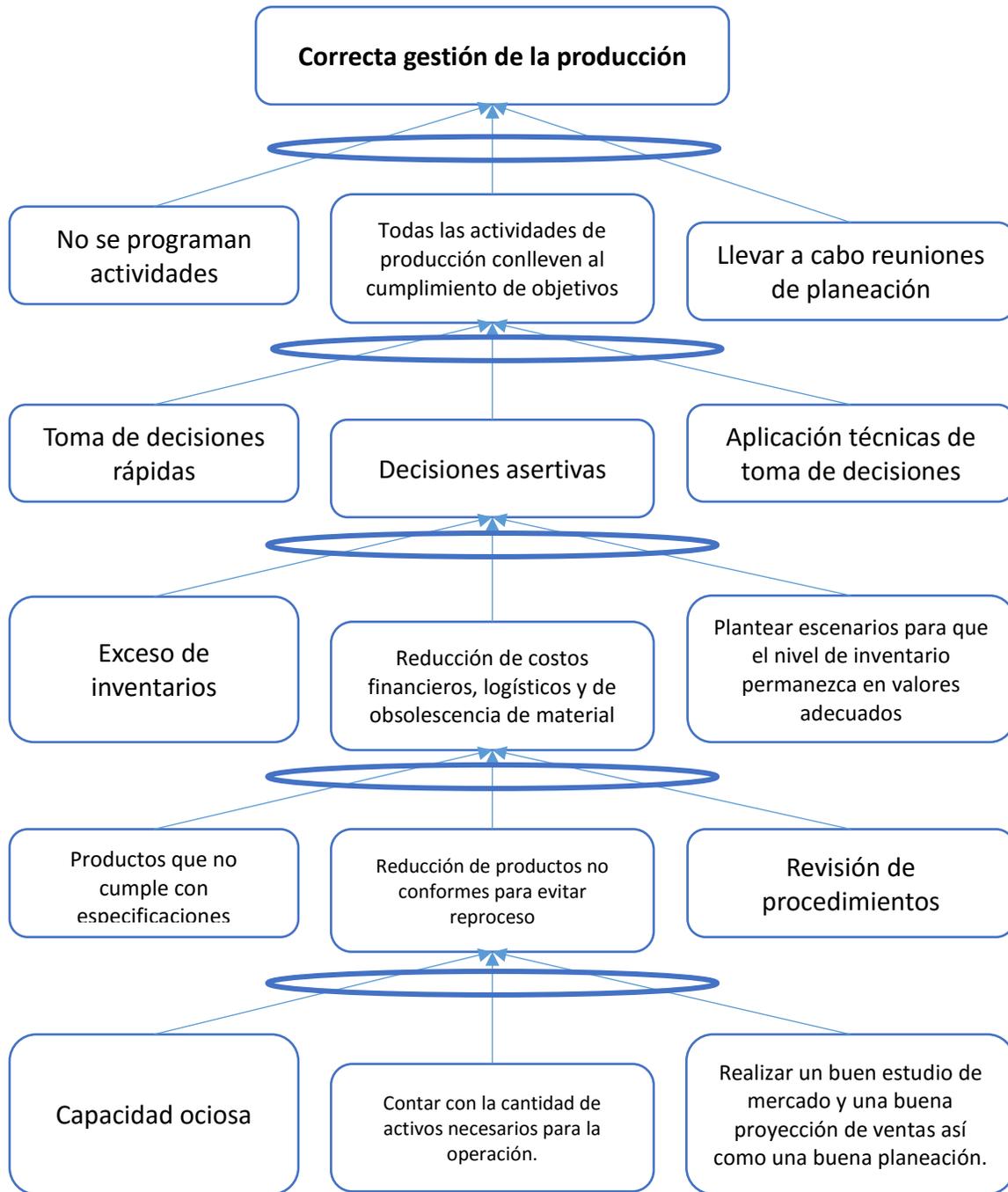
En la figuras 14 y 15 podemos observar el árbol de prerequisites y el árbol de transición respectivamente

Figura 21. Árbol de Pre-Requisitos Cimaco SAS.



Fuente: Elaboración propia

Figura 22. Árbol de Transición Cimaco SAS.



Fuente: Elaboración propia

3.2. Aplicación TOC a Cimaco SAS

3.2.1 Identificación de las restricciones del sistema. Con el objetivo de hallar las restricciones del sistema productivo de Cimaco, se llevó a cabo un diagnóstico de las diferentes áreas y de los diferentes procesos de manera que se conociera a profundidad lo que hacía cada una de las áreas, los recursos con que se cuentan, capacidades de las maquinarias.

Se tomaron uno a uno los procesos que hacen parte del sistema productivo de Cimaco explicados en el numeral 2.3.1 y se calcularon las capacidades de maquinarias y la capacidad productiva de la línea en sí.

A continuación, se presentan las tablas de las capacidades de los recursos utilizados en el proceso productivo de Cimaco SAS

Tabla 9. Capacidades de recursos de Cimaco SAS por fases de operación.

| Fase 0 – proceso de extracción | | Capacidad | PLATAFORMAS 1, 2 Y 3 |
|---------------------------------------|----------------|--------------------|---------------------------------|
| Capacidad excavadora | 28 seg/ton | 9,3 seg/ton | |
| Fase 1 - Zarandeo | | 10 seg/ton | PLATAFORMAS 1, 2 Y 3 |
| Cargador volvo | 7 ton/cucharon | | |
| Volqueta | 30 ton | | |
| Zaranda | 30 seg/ton | | |
| Línea de producción | | | |
| Plataforma 4 | | 7 seg/ton | LÍNEA DE PRODUCCIÓN |
| Mandíbula | 1300 ton/día | | |
| Trituradora primaria | 1300 ton/día | | |
| Plataforma 5 | | 17seg/ton | |
| Zaranda 1 | 1480 ton/día | | |
| Cono / trituradora secundaria | 732 ton/día | | |
| Plataforma 6 | | 4 seg /ton | |
| Zaranda 2 | 1570 ton/día | | |

Fuente: Elaboración propia

Después de llevar a cabo un análisis y visitas continuas para entender todo el proceso productivo de Cimaco tomando uno a uno los procesos, midiendo el tiempo, calculando capacidades de producción, analizando niveles de inventarios, se determinó que el cuello de botella se encuentra en la línea de producción, en la

plataforma 5 y es la trituradora secundaria o trituradora de cono la cual tiene una capacidad muy reducida en comparación con las demás plataformas que hacen parte de la línea de producción y es la operación que mayor tiempo se toma para procesar una tonelada de producto.

Cuando se inicia el proceso de la línea de producción en la plataforma 4, el operador debe verificar y estar al tanto cuando el proceso en el cono de la plataforma 5 haya llegado a su capacidad máxima pues debe apagar la plataforma 4 de manera que las piedras no continúen el recorrido hasta la plataforma 5 porque puede ocurrir un derrame de productos en proceso. Esta operación, genera una espera considerable y un gasto energético desmedido pues el acto de encender y apagar la plataforma 4 cada vez que el cono se llene, conlleva a un aumento de los kW consumidos por el arranque de la línea.

Las volquetas llegan a la rampa de descargue y en algunas ocasiones tienen que esperar que la línea de producción este lista de manera que puedan descargar el material para ser procesado, esto genera un inventario al inicio de la línea de producción, sin embargo, debido a la mala comunicación, los operarios de las volquetas en su espera, deciden regresar al área de zarandeo para continuar con el proceso de manera que, en ocasiones, se da el caso que la línea de producción está libre para iniciar nuevamente el proceso y no se encuentra material disponible para llevar a cabo la actividad, es decir, que el cuello de botella no se utiliza en su capacidad máxima.

Por otro lado, en la fase 0, donde se da el proceso de extracción, el operador extrae de manera descontrolada pues son las exigencias de la gerencia y su cumplimiento con el indicador de medición de ese proceso, lo que genera un inventario considerable en esa fase.

3.2.2 Explotación de la restricción. Después de determinar las restricciones del proceso, se deben explotar, es decir, tratar de aprovecharlas al máximo, hacer todo lo necesario para que este trabaje al 100%.

La restricción del proceso productivo de Cimaco, se encontró en la línea de producción, plataforma 5 exactamente la capacidad del cono o trituradora secundaria que es muy inferior a las capacidades de los demás recursos, por lo tanto, las acciones que se sugieren tomar para aprovechar al máximo el recurso restricción son:

Evitar las paradas de almuerzo de la línea de producción: Esta acción se da con una planeación de los turnos del almuerzo de manera que siempre estén disponibles operadores que aseguren la continuidad del proceso.

Evitar paradas por falta de materia prima: el recurso restrictivo debe disponer de materiales listos para su procesamiento de manera que este se pueda utilizar en un 100%.

Asignación estratégica de operarios: a la línea de producción se le debe asignar los operarios más hábiles de manera que estén atentos a la operación de manera proactiva.

Evitar los reprocesos: esto permite que el recurso restrictivo no ocupe una capacidad que va a necesitar

Aumento de la capacidad del cono: aumentar la capacidad del cono de manera que este pueda procesar mayor cantidad de toneladas posibles. Esta opción, además, es una de las más convenientes puesto que, al aumentar la capacidad productiva, también asegura una continuidad en la línea de producción para lo que no requiere apagar y encender la plataforma 4 generando una reducción del consumo energético en la planta, sin embargo, esta es una de las primeras opciones que tienen en cuenta los gerentes, aumentar la capacidad sin aprovechar la que tienen al máximo.

3.2.3 Supeditación de la restricción. Esta es etapa una etapa muy importante en la que se debe enfrentar políticas las cuales deben suprimirse y esto implica un cambio de radica y profundo en la forma de actuar y de pensar no solamente en el nivel operativo sino en la de los directivos de Cimaco, quienes han manejado la cantera de manera especial durante mucho años por lo que se requiere de compromiso para la implementación del sistema.

Para el cumplimiento de este paso de subordinación, se aplicara el sistema DBR a Cimaco, el cual se presenta más adelante.

3.2.4 Elevación de la restricción. Para elevar la restricción del sistema de Cimaco, es necesario aumentar la capacidad de la restricción, en este caso, Cimaco debe tomar medidas que llevan a elevar la restricción de su sistema productivo incrementando considerablemente sus niveles de producción.

Para el recurso restricción, cono o trituradora secundaria, cuya capacidad es de 735 ton/día que es de 200 caballos por una de 400 caballos que le daría el doble de la capacidad actual del cono. Con esta práctica, se lograría un sistema totalmente

flexible que cumpliría con todos los pedidos de los clientes y atendería cualquier aumento de la demanda.

3.3. Sistema Drum – Buffer – Rope (Tambor – Amortiguador – Cuerda)

La operatividad de los escenarios productivos planteados en la explotación de la restricción se da mediante una solución genérica de TOC el cual se basa en el sistema DBR propuesto dentro de la teoría de las restricciones, por Goldratt (1988) considerada una técnica de control de la producción para la implementación de los pasos de explotación, supeditación y elevación de la restricción.

En el caso de aplicación, Cimaco, esta herramienta permitirá explotar de la forma más eficiente la limitación del sistema que a través del Drum se consigue ya que es el programa de la limitación. El Drum o tambor hace referencia al recurso restricción y marcará el ritmo de la producción dentro del sistema productivo. En el caso de Cimaco, el recurso restricción es el cono ubicado en la plataforma 5, el cual está determinado por el plan de producción que deberá seguir este recurso para ser explotado al máximo.

Se hace necesario definir el tiempo de procesamiento de cada pedido antes de la restricción y posterior a ella, para esto se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- El recurso restricción no es operado directamente por un operario sino por medio del cuarto de control, por lo que no se considera la opción de trasladar personal de otras áreas hacia esta pues esta operación no depende directamente de la mano de obra.
- Determinar los tiempos que se toman para la preparación y de operación por cada tonelada pedida en los procesos de extracción, zarandeo y los que se dan en la plataforma 4 con la mandíbula y trituradora primaria.
- Programar la restricción para lo cual se deben tener en cuenta lo siguiente:
 - El inicio de la operación se realiza según la programación finita hacia atrás, sumando los tiempos de procesos antes de la restricción, tiempos de restricción y el Buffer dado a la restricción
 - Los tamaños de los buffer son determinados de manera empírica, para el caso de Cimaco, se ha tomado 28.800 seg (8 horas) que ha sido la mitad del lead time calculado en el capítulo anterior.
 - Se realiza la programación de la restricción tomando como base los pedidos de clientes y el pronóstico de ventas. Hay que tener en cuenta, que si bien, Cimaco maneja productos los cuales generan un mayor Throughput, también se debe tener en cuenta que la línea de producción

opera una sola materia prima y esta saca los 4 productos que comercializa la compañía, es decir, no es posible darle prioridad a un producto u otro ya que si ingresa una tonelada de materia prima, esa misma sale distribuida en los diferentes productos. Por lo tanto, no es posible dar prioridad a un producto u otro ya que la línea de producción está configurada de esa manera. De igual forma, el producto que genera mayor Throughput es el Triturado de ½”

- Se calcula la cuerda - fecha de expedición la cual es considerada la fecha límite en que una tarea debe llegar al origen del amortiguador con un 90% de probabilidad dando como resultado la siguiente formula:

$$\text{Fecha expedición} = \text{tambor} + (\text{amortiguador} + \text{lead time})$$

3.3.1. Drum – Tambor. Teniendo en cuenta todo lo anterior y haciendo un análisis de cada una de las operaciones de Cimaco se procede a calcular la disponibilidad en tiempo de cada operación.

Calculo de disponibilidad de cada operación

Se determina la disponibilidad de cada operación de Cimaco considerando los mantenimientos programados de la maquinaria, días no laborales y el horario de trabajo.

| Factores de disponibilidad | variable |
|-----------------------------------|----------|
| Horas de producción por turno | h |
| Numero de turnos operativos día | t |
| Número de días laborables | d |
| Numero de máquinas operativas | n |
| Horas de mantenimiento programado | mp |

La disponibilidad estaría dado a razón de: $\text{Disponibilidad} = h * t * d * n - mp$
 Calculo de disponibilidad de las operaciones de Cimaco

Extracción: $\text{Disponibilidad} = 7,5 * 1 * 6 * 3 - 7,5$

$\text{Disponibilidad} = 127,5 \text{ horas}$

Zarandeo: $\text{Disponibilidad} = 7,5 * 1 * 6 * 3 - 3$

$\text{Disponibilidad} = 127 \text{ horas}$

Línea de producción

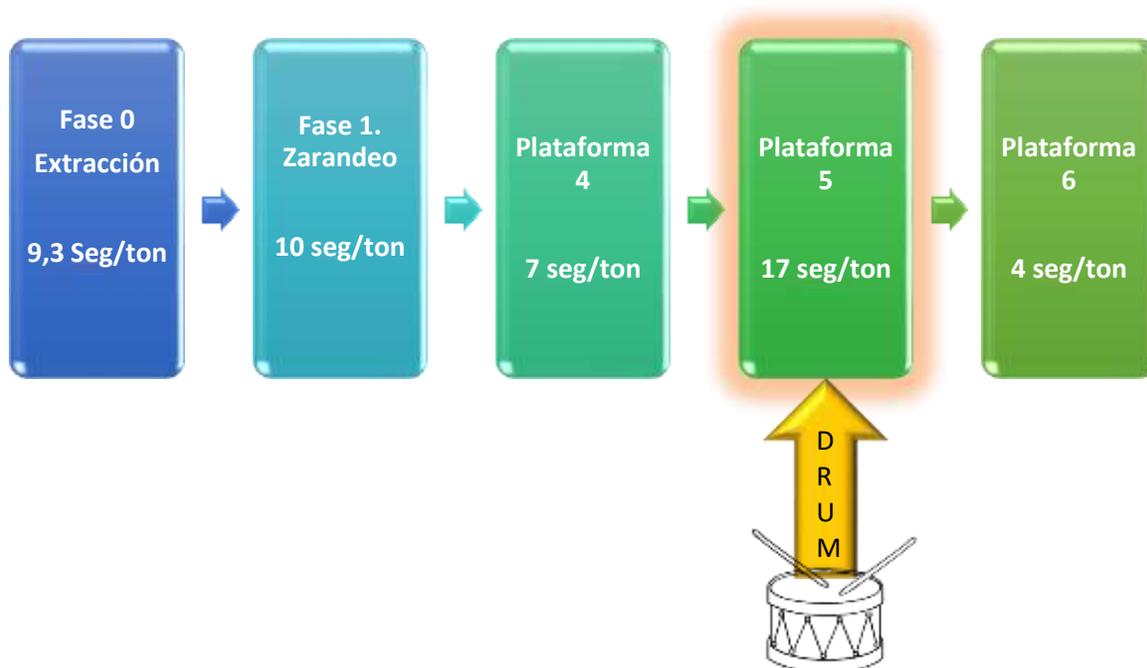
Teniendo en cuenta que la línea de producción es una sola, pero que se dividen en 3 plataformas independientes, se calculara la disponibilidad de la línea completa puesto que cada plataforma no es independiente sino que una conlleva a la otra.

$$\text{Disponibilidad} = 7,5 * 1 * 6 * 1 - 8$$

$$\text{Disponibilidad} = 37 \text{ horas}$$

Obtenida la disponibilidad de cada actividad, se determina que la operación con mayor carencia de disponibilidad se encuentra en la línea de producción, con una muy inferior a las demás operaciones del sistema, sin embargo, hay que tener en cuenta que este cálculo de disponibilidad se realizó a toda la línea de producción por lo que no podemos determinar cuál es la plataforma restricción dentro de ella, para esto, se toma como referencia el tiempo que cada plataforma demora en procesar una tonelada de piedras y evidentemente, la operación de la plataforma 5 es el que mayor tiempo se toma para procesar lo que significa que este será el tambor, es decir, este será el ritmo con el que se trabajara en Cimaco SAS.

Figura 23. Determinación del Drum de Cimaco SAS.



Fuente: Elaboración propia

3.3.2 Buffer – Amortiguador. La siguiente herramienta usada en este sistema es el Buffer o amortiguador, elemento esencial porque protege contra las fluctuaciones naturales en todas las maquinas. Teniendo en cuenta que el tiempo estándar de operación de las maquinas representa un promedio el cual puede tener variaciones dependiendo de una serie de eventos, es decir no representa una medida estática sino que representa un rango y protege contra las fluctuaciones inevitables que se dan dentro del sistema productivo.

EL buffer se calculará en términos de tiempo, es decir, con base en los procesos que alimentan la restricción se determina cual es el tiempo natural de acuerdo con los comportamientos típicos de los recursos buscando que la restricción no se detenga pues cualquier pérdida de tiempo en el mismo, es considerada una pérdida de tiempo en todo el sistema. Entendiendo esto, el buffer será un cierto inventario colocado ante del recurso restricción para que esta pueda seguir procesando material aun cuando los procesos que la alimentan sufran fallas o no puedan cumplir con los tiempos establecidos. En el caso de Cimaco, los recursos no se pueden ubicar antes de la restricción pues es una línea de producción, por lo tanto, se considera ubicarlo al inicio de esta, es decir, al inicio de la plataforma 4.

Determinación del amortiguador para la restricción

El amortiguador o buffer de Cimaco se calcula en tiempo, es decir, cuanto tiempo de protección se desea para la restricción. Para esto, es necesario conocer los procesos previos. De manera que la restricción no pare y siga produciendo en un 100%.

El tamaño del amortiguador, debe cubrir el tiempo del proceso desde que el operador inicia la extracción de las terrazas hasta que este llega al recurso restrictivo, es decir debe ser mayor a la suma de los tiempos de proceso tiene en cuenta decir tiempo de proceso más tiempo de preparación máximo más cierto tiempo de protección, este último asegura que si hay algún fluctuación en ese proceso el material llegue a la restricción con suficiente tiempo. (Darlington, Francis, Found, & Thomas, 2015)

Para este último, tiempo de protección, se tomara como referencia el lead time calculado por medio del VSM en el capítulo 2 numeral 2.3.2 por lo tanto, el amortiguador de restricción de recurso será de 1 día por lo que lead time es de 2,05 días. Por lo tanto, el buffer será el siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Buffer} &= \text{tiempo de proceso} + \text{tiempo de preparacion maximo} \\ &+ \text{tiempo de proteccion} \end{aligned}$$

$$\text{Buffer} = 17 \text{ seg} + 12,5 \text{ seg} + 36,990 \text{ seg}$$

$$\text{Buffer} = 37,020 \text{ seg} = 617 \text{ min} = 10 \text{ horas}$$

3.3.3 Rope – Cuerda. El tercer elemento dentro del sistema DBR es la cuerda, elemento que asegura que los procesos previos de la restricción sigan el ritmo, en nuestro caso, el programa de inicio de operaciones. Si se tiene controlada la restricción a través del tambor y controlada el inicio de operación a través de la cuerda, todos los procesos intermedios en el cambio hacia la restricción lo que deberían hacer es procesar lo más rápido los materiales que le lleguen y si no les llega material es porque no está siendo liberado a través de la cuerda, es decir, no nos interesa que estén operando.

Cuando la cuerda libera materiales, indica que todos los procesos que le siguen deben fluir lo más rápido posible para llegar a la restricción. (Chakravorty & Hales, 2016)

En este paso, se debe solucionar cuando lanzar la orden de inicio de operaciones, en este caso, en la fase 0, extracción, el buffer va a ser el tiempo de gabela para el cual deben darse los recursos anteriores. Es decir, es el margen de seguridad que garantiza que el recurso restrictivo siempre esté en funcionamiento. Este factor es muy importante pues lanzar la orden tarde afectaría el incumplimiento del Drum y lanzar la orden prontamente, afectaría alargando el lead time con los inventarios que se incrementarían.

Se calcula la cuerda o tiempo de expedición con la formula dada al inicio del numeral.

$$\text{Fecha expeditacion} = \text{tambor} + (\text{amortiguador} + \text{lead time})$$

Para realizar la dinámica de la aplicación del sistema, se han tomado 10 pedidos realizados a Cimaco y se realizaron los cálculos correspondientes para cada uno de los pedidos. A continuación se presenta la tabla 2 con la información.

Tabla 10. Tabla Simulación DBR Cimaco. SAS

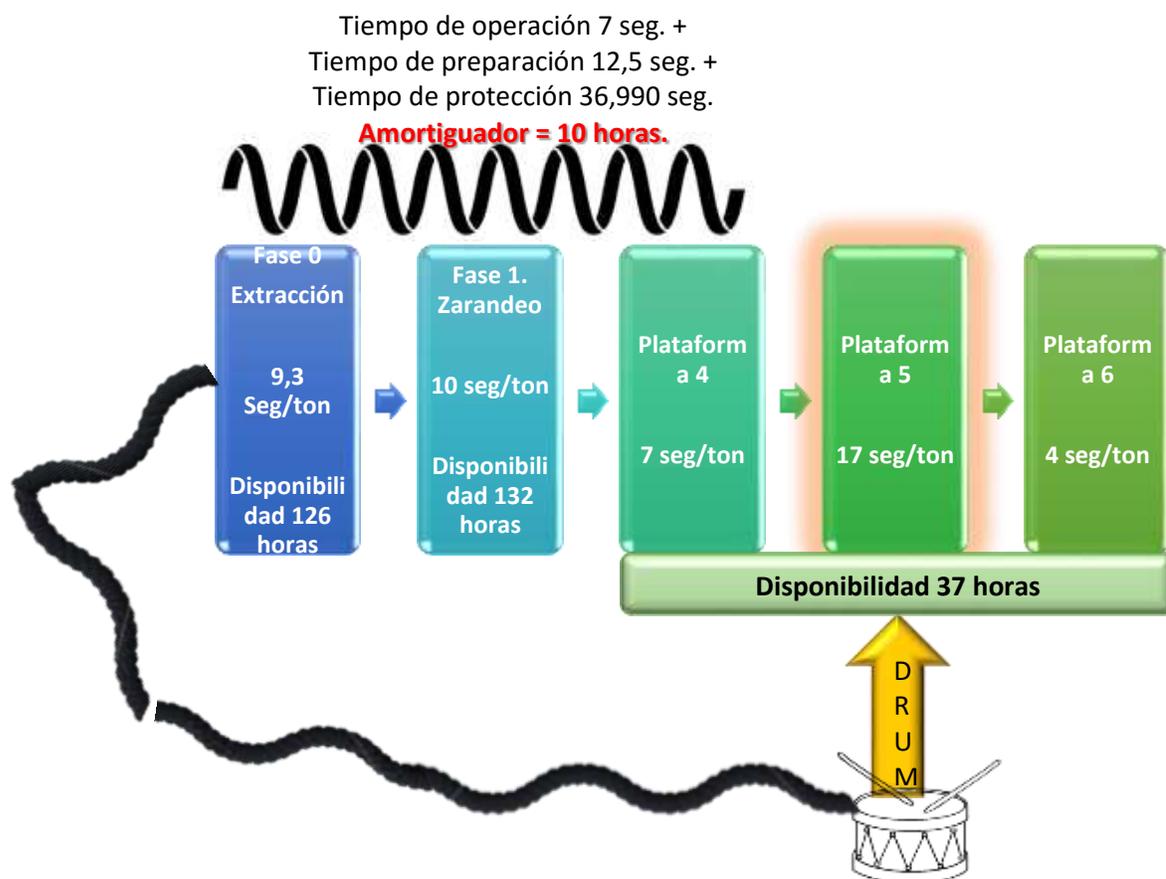
| Producto | Q en ton. | DRUM | | | | | | | | | BUFFER | | | ROPE | |
|----------------|-----------|-------------------------------|----------------|-----------------|-------------------------------|---------|--------------------|-----------------------|-------------------------------|-------------------|--|-----------------------------------|--------------------|-------------------------------|----------------|
| | | Fecha inicio | Hora inicio | Tiempo de prep. | Hora finalización preparación | # horas | Tiempo de proc. Hr | Hora inicio operación | Fecha fin | Hora finalización | Buffer de la restricción en tiempo = 8 horas | Tiempo de preparación y operación | Tiempo para recibo | Fecha de exp | Hora |
| Triturado 1/2" | 500 | jueves, 05 de Mayo de 2016 | 8:00:00 a. m. | 0,02 | 8:30:14 a. m. | 7,28 | 0,30 | 8:30:14 a. m. | jueves, 05 de Mayo de 2016 | 3:46:52 p. m. | 0,43 | 0,32 | 2,12 | domingo, 01 de Mayo de 2016 | 1:18:04 p. m. |
| Triturado 1/2" | 400 | viernes, 06 de Mayo de 2016 | 11:00:00 a. m. | 0,02 | 11:30:14 a. m. | 5,82 | 0,24 | 11:30:14 a. m. | sábado, 07 de Mayo de 2016 | 9:24:21 a. m. | 0,43 | 0,26 | 2,06 | lunes, 02 de Mayo de 2016 | 11:50:45 a. m. |
| Triturado 1/2" | 120 | sábado, 07 de Mayo de 2016 | 12:00:00 p. m. | 0,02 | 12:30:14 p. m. | 1,75 | 0,07 | 12:30:14 p. m. | sábado, 07 de Mayo de 2016 | 2:15:02 p. m. | 0,43 | 0,09 | 1,89 | miércoles, 04 de Mayo de 2016 | 3:41:26 p. m. |
| Triturado 1/2" | 50 | martes, 10 de Mayo de 2016 | 9:00:00 a. m. | 0,02 | 9:30:14 a. m. | 0,73 | 0,03 | 9:30:14 a. m. | martes, 10 de Mayo de 2016 | 10:13:54 a. m. | 0,43 | 0,05 | 1,85 | sábado, 07 de Mayo de 2016 | 2:40:18 p. m. |
| Triturado 1/2" | 450 | miércoles, 11 de Mayo de 2016 | 8:00:00 a. m. | 0,02 | 8:30:14 a. m. | 6,55 | 0,27 | 8:30:14 a. m. | miércoles, 11 de Mayo de 2016 | 3:03:12 p. m. | 0,43 | 0,29 | 2,09 | sábado, 07 de Mayo de 2016 | 12:34:24 p. m. |
| Triturado 1/2" | 800 | jueves, 12 de Mayo de 2016 | 10:00:00 a. m. | 0,02 | 10:30:14 a. m. | 11,64 | 0,49 | 10:30:14 a. m. | viernes, 13 de Mayo de 2016 | 10:08:51 a. m. | 0,43 | 0,51 | 2,31 | lunes, 09 de Mayo de 2016 | 9:44:51 a. m. |
| Triturado 1/2" | 750 | viernes, 13 de Mayo de 2016 | 4:00:00 p. m. | 0,02 | 4:30:14 p. m. | 10,92 | 0,45 | 4:30:14 p. m. | sábado, 14 de Mayo de 2016 | 3:25:11 p. m. | 0,43 | 0,48 | 2,28 | lunes, 09 de Mayo de 2016 | 4:56:23 p. m. |
| Triturado 1/2" | 80 | sábado, 14 de Mayo de 2016 | 8:00:00 a. m. | 0,02 | 8:30:14 a. m. | 1,16 | 0,05 | 8:30:14 a. m. | sábado, 14 de Mayo de 2016 | 9:40:06 a. m. | 0,43 | 0,07 | 1,87 | miércoles, 11 de Mayo de 2016 | 3:06:30 p. m. |

Fuente: Elaboración propia

Interpretamos la anterior tabla de la siguiente manera:

Para un pedido de 500 toneladas de triturado de 1/2" se toma un tiempo de operación de 7,28 horas aproximadamente lo que significa que el valor de la cuerda está dado por 2,12 días, es decir que si las operaciones para entrega del pedido inician el día 01/05/16 a la 1:18 p.m., considerando un solo turno de 8 horas con 0.5 horas de preparación, se tendría que la operación de ese pedido se iniciarían el 05/05/16 a las 8:00 a.m. y estará listo para entrega el 05/05/16 a las 3:46 p.m

Figura 24. DBR Cimaco SAS



Fuente: Elaboración propia

3.4. Indicadores de desempeño

- Throughput: El Throughput se define como la velocidad que el sistema genera dinero por medio de las ventas (Goldratt, 1988). Para determinar el Throughput se debe considerar el ingreso bruto por cada pedido y el costo de la materia prima e insumos.

$$T = N(PV - CTV)$$

Siendo

T: throughput

N: Cantidad de unidades vendidas

PV: Precio de venta del producto

CTV: Costo totalmente variables

A continuación, se presenta la tabla utilizada para calcular el sistema DBR para calcular el Throughput de cada pedido.

Los valores han sido modificados por petición de la compañía, estos fueron adaptados porcentualmente a la realidad.

- **Gastos operativos:** Los gastos operativos están dados por los gastos que se tienen para convertir el inventario en Throughput y está dada por la siguiente relación:

$$GO = \text{sueldos} + \text{gastos de fabricacion}$$

- **Inventario:** Es todo el dinero que Cimaco invierte en elementos que se propone vender. Dentro del sistema productivo de Cimaco, se encuentran inventarios en varios puntos del sistema, tanto como material en proceso así como productos terminados
- **Utilidad neta:** Su relación corresponde a la sumatoria de todo el Throughput de un periodo determinado menos todos los gastos operativos correspondientes a ese periodo.

$$U.N. = \text{Throughput} - \text{Gastos operativos}$$

- **ROI:** Este indicador relaciona la utilidad con la inversión y se calcula de la siguiente manera

$$ROI = \text{BENEFICIO NETO} / \text{INVERSION}(\text{INVENTARIOS})$$

Con base en esta información, se puede decir que la aplicación del sistema DBR es rentable para la empresa pues el ROI da positivo y es alto lo que significa que es más eficiente al usar el capital para generar utilidades.

Hay que tener en cuenta que si hay una buena utilidad y un alto ROI, no se puede quedar tranquilo puesto que si no hay disponibilidad de efectivo es difícil que la empresa sea saludable. (Agudelo & Escobar, 2010)

Así, por ejemplo, para el caso de la semana de pedidos que vimos anteriormente calculamos el Throughput y tenemos la siguiente información:

Los datos han sido modificados por petición de la empresa, se relacionó porcentualmente a la realidad.

Tabla 11. Calculo del Throughput por Pedido

| Pedido | Venta | Materia prima | Insumos | Throughput |
|------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| P-1 | \$ 15.000.000 | \$ 6.539.000 | \$ 2.400.000 | \$ 6.061.000 |
| P-2 | \$ 9.900.000 | \$ 4.315.740 | \$ 1.584.000 | \$ 4.000.260 |
| P-3 | \$ 3.600.000 | \$ 1.569.360 | \$ 576.000 | \$ 1.454.640 |
| P-4 | \$ 1.500.000 | \$ 653.900 | \$ 240.000 | \$ 606.100 |
| P-5 | \$ 13.500.000 | \$ 5.885.100 | \$ 2.160.000 | \$ 5.454.900 |
| P-6 | \$ 24.000.000 | \$ 10.462.400 | \$ 3.840.000 | \$ 9.697.600 |
| P-7 | \$ 22.500.000 | \$ 9.808.500 | \$ 3.600.000 | \$ 9.091.500 |
| P-8 | \$ 2.400.000 | \$ 1.046.240 | \$ 384.000 | \$ 969.760 |
| | \$ 92.400.000 | \$ 40.280.240 | \$ 14.784.000 | \$ 37.335.760 |

Nota: Elaboración propia

Tabla 12. Cuadro de Indicadores de Gestión Cimaco SAS

| Indicadores de Gestión | Programa de la Semana |
|------------------------|-----------------------|
| Throughput | \$ 37.335.760 |
| Gasto operativo | \$ 14.934.304 |

Nota: Elaboración propia

Con estos datos se calcula la utilidad neta:

$$U.N. = T - G.O = 37.335.760 - 14.934.304$$

$$U.N. = 22.401.456$$

Se calcula el ROI

$$ROI = \text{BENEFICIO NETO} / \text{INVERSION(INVENTARIOS)}$$

$$ROI = 22'401.456 / 18'726.453$$

$$ROI = 1,20$$

Con base en esta información, se puede decir que la aplicación del sistema DBR es rentable para la empresa pues el ROI da positivo y es alto lo que significa que es más eficiente al usar el capital para generar utilidades.

Capítulo 4 Modelo Cuantitativo

La planificación de la producción, por lo general, resulta una tarea administrativa crítica. Las técnicas matemáticas sirven como base para la toma de decisiones en esta área pues siendo un enfoque clásico, ofrece un soporte sólido para planificación de la producción. Los modelos matemáticos son una herramienta fundamental que sirven para planificar la producción, siendo las restricciones aquellas que establecen los tiempos de operación de planta, capacidad de producción, su límite, balance de inventario ofreciendo resultados óptimos de producción.

En el capítulo 3 se desarrolló el modelo cualitativo aplicando la teoría de las restricciones, en este capítulo se plantea el modelo cuantitativo haciendo uso de la herramienta programación lineal. Teniendo en cuenta que la literatura de modelos de optimización para planificar la producción en una mina es escasa.

4.1. Planteamiento del modelo matemático

A continuación se presenta un modelo de PL desarrollado para planificar la producción de la cantera Cimaco SAS, describiendo la formulación matemática desarrollada como estrategia de gestión de la productividad.

Para mayor comprensión, se graficó el proceso productivo de Cimaco SAS ubicando cada una de las variables, los parámetros y los costos que hacen parte del modelo de programación lineal para un mejor análisis de cada uno de los datos que intervienen en el modelo.

Los siguientes supuestos fueron adoptados para el desarrollo del modelo:

- El inventario de la fase 0 no se limita gracias al gran espacio con el que cuenta la empresa.
- Un día laborado de operación consta de 6 horas, teniendo en cuenta tiempo de preparación y alistamiento, además, se ha promediado este valor teniendo en cuenta las paradas inesperadas por reparaciones mínimas que se dan en el día a día de la operación.
- un mes laborado consta de 20 días teniendo en cuenta tiempo de reparación y mantenimientos.
- Cada estación de trabajo se dedica a una operación particular.
- Al inicio de la plataforma 4 se permite inventario.
- La extracción es igual por terrazas, niveles y periodos.
- Los inventarios pueden ser ilimitados gracias al espacio que se considera, es decir, no existe restricción de capacidad para los inventarios.
- Parte del inventario de la fase 1 hace parte del total del producto terminado 4.

Modelo

Índices

t terrazas

n nivel

p período

Conjuntos

T terrazas

N nivel

P período

Variables

$X_{tnp} =$

Cantidad de piedra que se extraen de la terraza t del nivel n en el periodo p (Ton/semana)

$I_{tnp} =$ *Inventario de la terraza t del nivel n en la fase 0 en el periodo p (Ton/semana)*

$W_{tnp} =$

Cantidad de piedra que se procesa de la terraza t del nivel n en la fase 1 en el periodo p (Ton/semana)

$I1_{tnp} =$ *Inventario de la terraza t del nivel n en la fase 1 en el periodo p (Ton/semana)*

$$Y_{tnp} =$$

Cantidad de piedra que se transportan de la terraza t a la plataforma 4 en el periodo p (Ton/semana)

$$I2_{tnp} =$$

Inventario de la plataforma 4 de la terraza t del nivel n en el periodo p (Ton/semana)

$$Z_{tnp} =$$

Cantidad de piedra que se procesa en la plataforma 4 de la terraza t del nivel n en el periodo p (Ton/semana)

$$O_{tnp} =$$

Cantidad de piedra que se procesan en la plataforma 5 de la terraza t del nivel n en el periodo p (Ton/semana)

$$K_{tnp} =$$

Cantidad de piedra que se procesan en la plataforma 6 de la terraza t del nivel n en el periodo p (Ton/semana)

$$PF1_{tn}$$

= Producto 1 Triturado de 1" saliente de la plataforma 6 de la terraza t del nivel n (Ton/semana)

$$PF2_{tn}$$

= Producto 2 Triturado de 0,5" saliente de la plataforma 6 de la terraza t del nivel n (Ton/semana)

$$PF3_{tn} =$$

Producto 3 Polvillo saliente de la plataforma 6 de la terraza t del nivel n (Ton/sem)

FPP1_p = Producto final 1 triturado 1" en el periodo p (Ton/semana)

FPP2_p = Producto final 2 triturado 1/2" en el periodo p (Ton/semana)

FPP3_p = Producto final 3 polvillo en el periodo p (Ton/semana)

FPP4_p = Producto final 4 zahorra en el periodo p (Ton/semana)

Parámetros

$$Cap_t =$$

Capacidad de extracción de fuerza productiva en las terrazas t en la fase 0 (Ton/semana)

$Caproc_t$ = Capacidad de procesamiento de la plataforma t en la fase 1 (Ton/semana)

$Captran_t$ =

Cantidad de toneladas que se transportan de la plataforma P1, P2 o P3 a la plataforma 4 (Ton/semana)

$Caplat4$ = Capacidad máxima de procesamiento de la plataforma 4 (Ton/semana)

$Caplat5$ = Capacidad máxima de procesamiento de la plataforma 5 (Ton/semana)

$Caplat6$ = Capacidad máxima de procesamiento de la plataforma 6 (Ton/semana)

FR_{tn} = Factor de recuperación de la terraza t del nivel n en la fase 1

$FR4_{tn}$ = Factor de recuperación de la plataforma 4 de la terraza t del nivel n

$FR5_{tn}$ = Factor de recuperación de la plataforma 5 de la terraza t del nivel n

$FRetorno_{tn}$ = Factor de retorno de lo que sale de la plataforma 6 a la plataforma 5

$FFinos_{tn}$ = Factor de finos por terraza t por nivel n

$FRP1_{tn}$

= Factor de recuperación para el producto 1 de la terraza t del nivel n en la plataforma 6

$FRP2_{tn}$

= Factor de recuperación para el producto 2 de la terraza t del nivel n en la plataforma 6

$FRP3_{tn}$

= Factor de recuperación para el producto 3 de la terraza t del nivel n plataforma 6

$V1$ = Precio de venta del producto 1 (\$/tonelada)

$V2$ = Precio de venta del producto 2 (\$/tonelada)

$V3$ = Precio de venta del producto 3 (\$/tonelada)

$V4$ = Precio de venta del producto 4 (\$/tonelada)

CX = Costo de extracción - Fase 0 (\$/tonelada)

CTR = Costo transporte (\$/tonelada)

$CPF1$ = Costo de zarandeo - Fase 1 (\$/tonelada)

$CP4$ = Costo de Producción en la plataforma 4 (\$/tonelada)

$CP5$ = Costo de Producción en la plataforma 5 (\$/tonelada)

$CP6$ = Costo de Producción en la plataforma 6 (\$/tonelada)

$CIF0$ = Costo inventario en fase 0 (\$/tonelada)

$CIF1$ = Costo inventario en fase 1

$CIP4$ = Costo inventario en plataforma 4

Función objetivo

La formulación de la función objetivo considera la maximización de la utilidad la cual está definida como los ingresos percibidos por la venta de productos menos los costos incurridos en el proceso productivo más el inventario.

$$\begin{aligned}
 FO(Max) = & \sum_{p=1}^P \left((FPF1_p * V1) + (FPF2_p * V2) + (FPF3_p * V3) \right. \\
 & \left. + (FPF4_p * V4) \right) - \sum_{T,N,P} ((CX * X_{tnp}) - (CPF1 * W_{tnp}) \\
 & - (CTR * Y_{tnp}) - (CP4 * Z_{tnp}) - (CP5 * O_{tnp}) - (CP6 * K_{tnp}) \\
 & - (CIF0 * I_{tnp}) - (CIF1 * I1_{tnp}) - (CIP4 * I2_{tnp}))
 \end{aligned}$$

Restricciones

Capacidad de extracción de las terrazas – Fase 0

En esta fase, la excavadora se encarga de extraer el material directamente de los bancos de tierra para dejarlo disponible para la siguiente fase. Esta restricción se encarga de determinar la cantidad total factible en toneladas que se pueden extraer de las terrazas.

$$\sum_{n=1}^N \max X_{tnp} \leq Cap_t \quad \forall t \in T, \quad p \in P$$

Restricción de excavación

Esta restricción determina que las cantidades que se pueden extraer de las terrazas dependiendo de los niveles. Esta restricción se da por razones de seguridad del trabajador pues se considera peligroso por posibles derrumbes.

$$X_{t3} \leq X_{t2} \leq X_{t1} \quad \forall t \in T$$

Capacidad de procesamiento de las plataformas 1 a la 3 en la fase 1

Las plataformas 1, 2 y 3 en la fase 1 están conformadas por una excavadora, un cargador Volvo y una zaranda. El cargador Volvo carga la volqueta que una vez llena descarga el material completo sobre la zaranda la cual por medio de movimientos vibratorios, separa el material que contiene zahorra del rocoso. Esta restricción determina la cantidad factible en toneladas que se pueden procesar en la operación de zarandeo en la fase 1.

$$\sum_{n=1}^{N \max} W_{tnp} \leq Caproc_t \quad \forall t \in T, \quad p \in P$$

Capacidad de transporte de las plataformas 1, 2 y 3 a la plataforma 4

Esta restricción determina la cantidad factible de toneladas máximas que pueden ser transportadas de las plataformas 1,2 y 3 fase 1 a la plataforma 4

$$\sum_{n=1}^{N \max} Y_{tnp} \leq Captran_t \quad \forall t \in T, \quad p \in P$$

Capacidad de procesamiento de la plataforma 4

La plataforma 4 es el inicio de la línea de producción, la cual está conformada por una mandíbula y una trituradora primaria, la mandíbula hace las veces de zaranda la cual separa el material más suelto o zahorra y lo almacena por medio de una banda transportadora, el material que continua, pasa a la trituradora la cual se encarga de fraccionar el material que ingresa en diferentes tamaños, el material rocoso en medidas más pequeñas. Esta restricción determina la cantidad de toneladas que pueden ser procesadas en la plataforma 4.

$$\sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^{N \max} Z_{tnp} \leq Caplat_4 \quad \forall p \in P$$

Capacidad de procesamiento de la plataforma 5

La plataforma 5, está conformada por una zaranda y una trituradora de cono o trituradora secundaria, la zaranda recibe el material que ha sido fraccionado de la trituradora principal separando el material más fino el cual es almacenado por medio de una banda transportadora saliendo el producto polvillo. El material que no es considerado fino, pasa a una trituradora cono que se encarga de fraccionar aún más el material convirtiéndolo en los tamaños comerciales que se manejan en Cimaco. Esta restricción determina la cantidad de toneladas que pueden ser procesadas en la plataforma 5.

$$\sum_{t=1}^T \max \sum_{n=1}^N \max O_{tnp} \leq Caplat_5 \quad \forall p \in P$$

Capacidad de procesamiento de la plataforma 6

La plataforma 6 está conformada por una zaranda la cual separa y almacena los productos finales por medio de bandas transportadoras. Esta restricción determina la cantidad de toneladas que pueden ser procesadas en la plataforma 6.

$$\sum_{t=1}^T \max \sum_{n=1}^N \max K_{tnp} \leq Caplat_6 \quad \forall p \in P$$

Inventario fase 0

Esta restricción indica que el inventario de la fase 0 es igual al inventario del periodo anterior más la cantidad de toneladas que se extraen en esta fase menos la cantidad de producto que se va para la siguiente fase, zarandeo fase 1.

$$I_{tnp} = I_{tnp-1} + X_{tnp} - W_{tnp} \quad \forall t \in T, \quad n \in N, \quad p \in P$$

Inventario fase 1

Esta restricción indica que el inventario de la fase 1 es igual al inventario del periodo anterior más la cantidad de toneladas que se extraen en esta fase 1 menos la cantidad de toneladas recuperadas menos la cantidad de toneladas transportadas hacia la plataforma 4.

$$I1_{tnp} = I1_{tnp-1} + W_{tnp} - (W_{tnp} * (1 - FR_{tn}) - Y_{tnp}) \quad \forall t \in T, \quad n \in N, \\ p \in P$$

Inventario inicio plataforma 4

Esta restricción indica la cantidad de inventario al inicio de la plataforma 4 está relacionado por el inventario del periodo anterior más la cantidad transportada menos la cantidad procesada en esa plataforma.

$$I2_{tnp} = I2_{tnp-1} + Y_{tnp} - Z_{tnp} \quad \forall t \in T, \quad n \in N, \quad p \in P$$

Balance de la plataforma 4 a la plataforma 5

Esta restricción garantiza el balance de la plataforma 4 a la plataforma 5 el cual está dado por la cantidad de producto que pasa a ser procesado a la plataforma 5 es igual a la cantidad de toneladas recuperadas en el proceso en la mandíbula de la plataforma 4.

$$O_{tnp} = Z_{tnp} * FR4_{tn} \quad \forall t \in T, \quad n \in N, \quad p \in P$$

Balance de la plataforma 5 a la plataforma 6

Esta restricción garantiza el balance de flujo de producto de la plataforma 5 a la plataforma 6 la cual protege que la cantidad procesada en la plataforma 6 está dada por la cantidad de toneladas recuperadas en la plataforma 5 menos la cantidad que retorna de la plataforma 6.

$$K_{tnp} = O_{tnp} * FR5_{tnp} + Fretorno_{tn} * K_{tnp} \quad \forall t \in T, \quad n \in N, \quad p \in P$$

Producto 1 recuperado de la plataforma 6

Esta restricción determina la cantidad de producto 1 triturado de 1" que sale de la plataforma 6

$$PF1_{tnp} = K_{tnp} * FRP1_{tn} \quad \forall t \in T, \quad n \in N, \quad p \in P$$

Producto 2 recuperado de la plataforma 6

Esta restricción determina la cantidad de producto 2 triturado de ½" que sale de la plataforma 6

$$PF2_{tnp} = K_{tnp} * FRP2_{tn} \quad \forall t \in T, \quad n \in N, \quad p \in P$$

Producto 3 recuperado de la plataforma 6

Esta restricción determina la cantidad de producto 3 - polvillo que sale de la plataforma 6

$$PF3_{tnp} = K_{tnp} * FRP3_{tn} \quad \forall t \in T, \quad n \in N, \quad p \in P$$

Producto final 1

Esta restricción determina la cantidad total final del producto 1 triturado de 1”

$$FPF1_p = \sum_{T,N} PF1_{tnp}$$

Producto final 2

Esta restricción determina la cantidad total final del producto 2 triturado de 1/2”

$$FPF2_p = \sum_{T,N} PF2_{tn}$$

Producto final 3

Esta restricción determina la cantidad total final del producto 3 – polvillo teniendo en cuenta la cantidad de producto final 3 que sale de la plataforma 6 más la cantidad de toneladas no recuperadas de la plataforma 5.

$$FPF3_p = \sum_{T,N} PF3_{tn} + O_{tnp} * (1 - FR5_{tn})$$

Producto final 4

Esta restricción determina la cantidad total final del producto 4 – zahorra teniendo en cuenta la cantidad de toneladas no recuperadas de la plataforma 4 y la cantidad de toneladas no recuperadas en la fase 1- zarandeo.

$$FPF4_p = \sum_{T,N} Z_{tnp} * (1 - FR4_{tn}) + W_{tnp} * (1 - FR_{tn})$$

Norma de calidad para el producto 1

Esta restricción determina la calidad mínima que debe tener el producto 1 – triturado de 1” con respecto al porcentaje de finos máximos permitidos para este producto. La calidad varía para el tipo de producto por nivel.

$$\sum_{T,N} FPF1_{tnp} * FFinos_{tn} \leq Calidad * \left[\sum_{T,N} FPF1_{tnp} \right] \quad \forall p \in P$$

Norma de calidad para el producto 2

Esta restricción determina la calidad mínima que debe tener el producto 2 – triturado de 1/2" con respecto al porcentaje de finos máximos permitidos para este producto. La calidad varía para el tipo de producto por nivel.

$$\sum_{T,N} FPF2_{tnp} * FFinos_{tn} \leq Calidad * [\sum_{T,N} FPF2_{tnp}] \quad \forall p \in P$$

4.2. Datos utilizados para el modelo

Los datos suministrados por la empresa son de carácter confidencial, para esto, se ha determinado llevar a cabo el ejercicio por medio de ponderaciones que permitan trasladar a un escenario porcentual real y que este sirva como herramienta para realizar los cálculos. Para los datos, se llevó a cabo una toma de tiempos la cual al ser promediada arrojó los valores que serán utilizados para correr el modelo en el software.

Capacidad de extracción de las terrazas

Cada terraza maneja una excavadora hidráulica CAT 390 la cual puede ser operada con diferentes herramientas como martillo hidráulico, ripper o balde. El operador, a través de su experiencia, determina que herramienta utilizar dependiendo de la dureza del terreno. En promedio, el operador se toma 28 segundos para extraer una tonelada de material el cual queda a disposición inmediata para ser trasladado hacia la siguiente fase.

Tabla 13. Capacidad de Extracción de las Terrazas de Cimaco.SAS

| Terraza | Capacidad de extracción | Horas trabajadas | Capacidad por día |
|-------------------------------|-------------------------|------------------|----------------------|
| 1 | 1 ton 28 seg | 6 Horas | 771,4 Ton/día |
| 2 | 1 ton 28 seg | 360 Min | 771,4 Ton/día |
| 3 | 1 ton 28 seg | 21600 Seg | 771,4 Ton/día |
| Capacidad total de extracción | | | 2.314,3 Ton/día |
| | | | 11.571,4 Ton/Semanal |

Fuente: Elaboración propia

El costo de extracción por tonelada de material de las terrazas se presenta en la siguiente tabla teniendo en cuenta mano de obra, combustibles, lubricantes y mantenimiento de maquinaria, esta última incluye repuestos.

Tabla 14. Costo de Extracción por Terrazas por Niveles de Cimaco SAS

| Terraza | Nivel | Costo de extracción | |
|-----------|-------|---------------------|---------------|
| | | Semanal | \$ 11.921.418 |
| 1 - 2 - 3 | 1 | Por tonelada | \$ 1.030 |
| | 2 | | |
| | 3 | | |

Fuente: Elaboración propia

Capacidad de operación de las plataformas en la fase 1

En esta fase, cada plataforma maneja una zaranda, un cargador y una volqueta. Todo el proceso que conlleva este ciclo comienza con el cargador que recoge lo que extrae cada excavadora llenando la volqueta hasta su capacidad máxima, esta se dirige hacia la zaranda y vacía todo el contenido sobre ella, la zaranda clasifica los materiales separándolos en partes diferentes.

Tabla 15. Capacidad de Zarandeo en las Plataformas 1, 2 y 3 de Cimaco SAS

| Terraza | Capacidad de extracción | Horas trabajadas | Capacidad por día |
|------------------------------------|-------------------------|------------------|--------------------------|
| 1 | 1 ton 30 seg | 6 Horas | 720 Ton/día |
| 2 | 1 ton 30 seg | 360 Min | 720 Ton/día |
| 3 | 1 ton 30 seg | 21600 Seg | 720 Ton/día |
| Capacidad total de zarandeo | | | 2.160 Ton/día |
| | | | 10.800 Ton/Semana |

Fuente: Elaboración propia

El costo de extracción por tonelada procesado en la fase 1 de las terrazas de cada uno de los niveles se presenta en la siguiente tabla teniendo en cuenta mano de obra, aceites y lubricantes y ACPM de los 3 equipos que operan en esta fase, volqueta, cargador y zaranda.

Tabla 16. Costo de Operación de la Fase 1 por Terrazas por Niveles de Cimaco SAS

| Terraza | Nivel | Plataforma | Costo de Zarandeo |
|-----------|-------|-----------------|-------------------|
| | | Semanal | \$ 3.207.294 |
| 1 - 2 - 3 | 1 | Por tonelada | \$ 297,0 |
| | 2 | | |
| | 3 | | |

Fuente: Elaboración propia.

Cantidad de unidades transportadas de las plataformas 1, 2 y 3 a la plataforma 4

El transporte se da con las mismas volquetas usadas en cada una de las plataformas 1, 2 y 3. Inmediatamente la zaranda clasifica, el cargador Volvo carga el material hacia la volqueta y esta se dirige hacia la plataforma 4 con el material a procesar.

Tabla 17. Cantidad de Unidades Transportadas de las Plataformas 1, 2 y 3 a la Plataforma 4 de Cimaco SAS.

| Terraza | Capacidad de transporte | | | Horas trabajadas | Capacidad por día |
|--|-------------------------|-----|-----|------------------|-------------------------|
| 1 | 30 ton | 300 | seg | 1,5 Horas | 540 Ton/día |
| 2 | 30 ton | 300 | seg | 90 Min | 540 Ton/día |
| 3 | 30 ton | 300 | seg | 5400 Seg | 540 Ton/día |
| Capacidad total de transporte desde plataformas 1, 2 y 3 hacia plataforma 4 | | | | | 1.620 Ton/día |
| | | | | | 8.100 Ton/Semana |

Fuente: Elaboración propia

El costo del transporte está relacionado con la mano de obra, ACPM y lubricantes.

Tabla 18. Costo Transporte por Tonelada de las Plataformas 1, 2 y 3 a la Plataforma 4 de Cimaco SAS.

| Plataforma | Hacia | Plataforma | Costo transporte | |
|------------|---|------------|------------------|--------------|
| 1 - 2 - 3 |  | 4 | Semanal | \$ 1.115.625 |
| | | | Por tonelada | \$ 137,7 |

Fuente: Elaboración propia

Capacidad máxima de la línea de producción - Plataformas 4, 5, 6

Una vez el material es transportado este queda a disposición para ingresar a la línea de producción conformada por la plataforma 4, 5 y 6. Cada plataforma tiene una capacidad diferente, sin embargo, como es una línea continua, se tendrá en cuenta el proceso con menor capacidad dentro de la línea de producción.

Tabla 19. Capacidad de la Línea de Producción por Plataforma de Cimaco SAS.

| Plataformas | Procesos | Capacidad | |
|---|-------------------------------|--------------------|----------------------|
| | | Día | Semana |
| 4 | Mandíbula | 1.300 Ton día | 6.500 Ton Sem |
| | Trituradora primaria | 1.300 Ton día | 6.500 Ton Sem |
| 5 | Zaranda 1 | 1.480 Ton día | 7.400 Ton Sem |
| | Cono o trituradora secundaria | 732 Ton día | 3.660 Ton Sem |
| 6 | Zaranda 2 | 1.570 Ton día | 7.850 Ton Sem |
| Capacidad total teniendo en cuenta los procesos en cada una de las plataformas | | Día | Semana |
| | | 960 ton Día | 4.800 Ton Sem |

Fuente: Elaboración propia

Así mismo, el costo de la línea de producción por plataforma se presenta a continuación.

Tabla 20. Costo de la Línea de Producción, Plataforma 4, 5 y 6 de Cimaco SAS

| Plataformas | Procesos | Costo de producción | |
|---|-------------------------------|---------------------|------------------|
| Costo semanal de la línea de producción | | \$ | 3.771.903 |
| Costo por tonelada de la línea de producción | | \$ | 3.929 |
| 4 | Mandíbula | \$ 1.310 | \$ Ton |
| | Trituradora primaria | | |
| 5 | Zaranda 1 | \$ 1.310 | \$ Ton |
| | Cono o trituradora secundaria | | |
| 6 | Zaranda 2 | \$ 1.310 | \$ Ton |

Fuente: Elaboración propia

Factores de recuperación

Para determinar los factores de recuperación, se tuvo en cuenta un estudio de suelos realizado en Cimaco, el cual determinó que los banco de tierra están compuestos por piedra y zahorra, generalmente a mayor altura de la montaña es más rocoso, sin embargo, en la práctica es muy variable puesto que independientemente del nivel, se puede encontrar diferentes clases de material, esto se debe a que la cantera se encuentra ubicada en un sector rocoso llamado sector loma de piedra lo que indica que se encuentra en áreas inclinadas en altura o montañosas y por ende son más rocosas, es decir, los sectores más pedregosos son los niveles más altos de las terrazas, sin embargo, a un nivel más bajo también se encuentran bastantes piedras.

Para tener una información acertada, se tuvieron en cuenta los datos del estudio realizado, donde se tomaron varias muestras de diferentes niveles de las terrazas, y se promediaron los resultados para obtener la media de los porcentajes a utilizar en el modelo.

A continuación, se muestran cada uno de los porcentajes de recuperación por niveles de las terrazas obtenidos del estudio de tierra realizado en Cimaco.

Factor de recuperación de las plataformas 1, 2 y 3

Cuando la zaranda realiza su trabajo de clasificación, esta separa el material más arenoso y suelto el cual no está apto para continuar en la línea de producción pasando a ser producto terminado 4 – Zahorra y el otro material se deja a disposición para continuar en el sistema. La información ha sido promediada por las muestras tomadas del material sacado de los diferentes niveles de las terrazas.

Tabla 21. Factor de Recuperación del Producto 4 en las Plataformas 1, 2 y 3 de Cimaco SAS.

| Terraza | Factor de recuperación |
|---------|------------------------|
| 1 | 82% |
| 2 | 80% |
| 3 | 78% |

Fuente: Elaboración propia

Factor de recuperación de la plataforma 4 de las terrazas y niveles

El proceso en la plataforma 4 inicia con la mandíbula que recibe el material y hace las veces de zaranda clasificando el material que no está apto para continuar en la línea de producción, este material es considerado producto final 4 zahorra el cual proviene del primer proceso de la plataforma 4. Esos valores de recuperación, dependen de los niveles de extracción. . La información ha sido promediada por las muestras tomadas del material sacado de los diferentes niveles de las terrazas.

Tabla 22. Factor de Recuperación del Producto 4 en la Plataforma 4 de Cimaco SAS.

| Terraza | Nivel | Factor de recuperación |
|-----------|-------|------------------------|
| 1 - 2 - 3 | 1 | 82% |
| | 2 | 80% |
| | 3 | 78% |

Fuente: Elaboración propia

Factor de recuperación de la plataforma 5

Cuando el producto ingresa a la plataforma 5, pasa el primer proceso que es la zaranda quien zarandea todo el material con el fin de desprender el material más fino generando un inventario del producto 3 polvillo. La información ha sido promediada por las muestras tomadas del material sacado de los diferentes niveles de las terrazas.

Tabla 23. Factor de Recuperación del Producto 3 en la Plataforma 5 de Cimaco SAS

| Terraza | Nivel | Factor de recuperación |
|-----------|-------|------------------------|
| 1 - 2 - 3 | 1 | 95% |
| | 2 | 94% |
| | 3 | 93% |

Nota: Elaboración propia.

Factor de recuperación de los productos 1, 2 y 3 de la plataforma 6 de la terraza t del nivel n

El proceso de la plataforma 6 se da con la zaranda 2 la cual separa los materiales en sus diferentes tamaños transportándolos por una banda que los almacena automáticamente. Cada nivel de las terrazas maneja un porcentaje diferente para cada producto, estos valores fueron tomados de un estudio de suelo realizado en la empresa. La información ha sido promediada por las muestras tomadas del material sacado de los diferentes niveles de las terrazas.

Tabla 24. Factor de Recuperación de los Productos 1, 2 y 3 Salientes de la Plataforma 6 por Niveles de Terrazas en Cimaco SAS

| Terraza | Nivel | FRP1tn | FRP2tn | FRP3tn |
|-----------|-------|--------|--------|--------|
| 1 - 2 - 3 | 1 | 25% | 40% | 5% |
| | 2 | 27% | 37% | 6% |
| | 3 | 28% | 35% | 7% |

Fuente: Elaboración propia.

Factor de finos por terrazas y por niveles

El material que se extrae, debe tener la menor cantidad de finos posibles. Esto, depende del nivel de la terraza donde se esté extrayendo. La información ha sido promediada por las muestras tomadas del material sacado de los diferentes niveles de las terrazas.

Tabla 25. Factor de Finos por Niveles de las Terrazas de Cimaco SAS.

| Terraza | Nivel | Porcentaje de finos |
|-----------|-------|---------------------|
| 1 - 2 - 3 | 1 | 0,8% |
| | 2 | 1,1% |
| | 3 | 1,2% |

Fuente: Elaboración propia

Precio de venta por tonelada

Relación de los precios de ventas.

Tabla 26. Precios de Venta al Público de cada uno de los Productos Ofrecidos por Cimaco SAS.

| Precio de venta | | Producto | Precio de venta por tonelada |
|-----------------|----|----------------|------------------------------|
| Producto 1 | V1 | Triturado 1" | \$ 22.857 |
| Producto 2 | V2 | Triturado 1/2" | \$ 25.000 |
| Producto 3 | V3 | Polvillo | \$ 5.000 |
| Producto 4 | V4 | Zahorra | \$ 3.571 |

Fuente: Elaboración propia.

Costo de Inventarios

El costo de los inventarios se presenta a continuación.

Tabla 27. Costo de Inventarios de Cimaco SAS.

| Costo Inventario | |
|---|-----------------|
| Costo inventario en la fase 0 por ton | \$ 1.032 |
| Costo inventario en la fase 1 por ton | \$ 3.571 |
| Costo inventario en la plataforma 4 por ton | \$ 1.467 |

Fuente: Elaboración propia

Capítulo 5 Validación del modelo

Para la validación del modelo de Cimaco, se utilizó el software GAMS, Sistema general de modelaje algebraico o en sus siglas en inglés General Algebraic Modeling System, este es un software de alto nivel está diseñado para modelar problemas de optimización y programación matemática útil para problemas grandes y complejos de optimización. Es un paquete estándar que permite resolver diferentes tipos de problemas de optimización de gran escala y complejos en muchos campos de investigación (Naghilooa, Abbaspourb, Mohammadi-Ivatlooc, & Bakhtaria, 2015).

GAMS es un eficiente programador informático para la modelización y resolución de problemas de optimización, lineales, no lineales y enteros mixtos, este software cuenta con un alto nivel de lenguaje de programación y permite que los usuarios se concentren en el problema a modelar haciendo que el planteamiento de este sea simple incorporando su propio lenguaje de programación que generalmente es fácil de aprender y usar. (Salari & Askarzadeh, 2015)

GAMS será utilizado para determinar las cantidades óptimas de producción de manera que se maximicen las utilidades de Cimaco.

Software GAMS en modelo de Cimaco

Una vez establecido el planteamiento del problema en el capítulo 4, donde se diseñó la función objetivo y las restricciones del modelo, se procedió a correrlo con el software GAMS el cual tiene una ventaja al momento de plantear pues usa un lenguaje de modelización que permite escribir en un editor la formulación matemática del problema y aplicarle una serie de solvers.

Dentro del modelo en GAMS se encontraran bloques de variables, donde se definieron las variables que usara el modelo, indicando de que clase son, que tipo de restricciones presenta, etc. Bloques de ecuaciones, donde se definieron y aclararon cuales fueron las ecuaciones que serán usadas en el modelo. Bloque del modelo, donde se definieron las ecuaciones que componen el modelo y por último, se encuentra el bloque de solución, donde se indicó que tipo de algoritmo se desea usar para resolver el modelo. En el anexo A se encuentra el modelo completo planteado en el software GAMS.

5.1. Análisis de datos

A continuación, se realizará un análisis de los resultados arrojados por el modelo de programación lineal por cada una de sus fases, abarcando las variables y restricciones que interactúan en cada una de ellas. Seguidamente, se presentan los resultados obtenidos por medio de la aplicación del software compilado en tablas por variables para un mayor entendimiento y posterior análisis.

5.1.1. Función objetivo FO. La función objetivo de este modelo, plantea la maximización de las utilidades de Cimaco, el modelo de programación lineal encontró una solución óptima con un valor de 3'274.932.743,5 y para hallar este valor, se realizaron 84 iteraciones de las 2'000.000.000 posibles. En promedio el modelo arroja un rendimiento neto aproximado de 110'000.000 (Ciento diez millones de pesos) diarios, este dato considera que se vende la totalidad de productos producidos.

5.1.2. Fase 0 – Extracción. En esta primera fase se manejan las variables relacionadas con la cantidad de material que se debe extraer por terrazas (X_{tnp}) la cual se engrana con la capacidad de extracción, variable de inventario (I_{tnp}) que se genera en esta fase, restricción de capacidad (Cap_t) y de explotación por niveles. A continuación se desglosa cada una:

Variable X_{tnp}

El modelo de programación lineal determinó las cantidades óptimas a extraer por terrazas por niveles en cada periodo en la fase 0. La cantidad de toneladas extraídas en cada una de las terrazas es igual en términos de totales, sin embargo, cada periodo cambia en cada uno de los niveles. Por ejemplo, en el periodo 1, se deben extraer 1.285,7 toneladas de la terraza 1 y 2 en todos los niveles, mientras que de la terraza 3 se debe extraer 2.871,9 toneladas del nivel 1, mientras que el nivel 2 se deben extraer 492,6 y del nivel 3 se deben extraer 492,6 toneladas. Nótese que la extracción es menor o igual en los niveles 3 de las terrazas gracias a la restricción que existe de excavación por niveles. En el caso del periodo 2, en cada terraza se deben extraer 1.928,5 toneladas de los niveles 1 y 2 dejando sin extraer en los niveles 3. En la siguiente tabla se presentan los resultados completos arrojados por el modelo de programación lineal en cada uno de los periodos.

Tabla 28. Resultados Variable X_{tnp} . Cantidad de Toneladas Extraídas De Las Terrazas.

| Fase 0 | | | | | |
|---|---------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Extracción de terrazas | | | | | |
| Variable X | | | | | |
| Cantidad de toneladas que se extraen de las terrazas por niveles en determinado periodo | | | | | |
| TERRAZAS POR NIVELES | | P1 | P2 | P3 | P4 |
| Terraza 1 | T1 N1 | 1.285,7 | 1.928,7 | 1.285,7 | 1.285,7 |
| | T1 N2 | 1.285,7 | 1.928,5 | 1.285,7 | 1.285,7 |
| | T1 N3 | 1.285,7 | | 1.285,7 | 1.285,7 |
| | Total extraído de la terraza 1 | 3.857,0 | 3.857,2 | 3.857,0 | 3.857,0 |
| Terraza 2 | T2 N1 | 1.285,7 | 1.928,5 | 1.285,7 | 1.285,7 |
| | T2 N2 | 1.285,7 | 1.928,5 | 1.285,7 | 1.285,7 |
| | T2 N3 | 1.285,7 | | 1.285,7 | 1.285,7 |
| | Total extraído de la terraza 2 | 3.857,0 | 3.857,0 | 3.857,0 | 3.857,0 |
| Terraza 3 | T3 N1 | 2.871,9 | 1.928,5 | 1.285,7 | 1.285,7 |
| | T3 N2 | 492,6 | 1.928,5 | 1.285,7 | 1.285,7 |
| | T3 N3 | 492,6 | | 1.285,7 | 1.285,7 |
| | Total extraído de la terraza 3 | 3.857,0 | 3.857,0 | 3.857,0 | 3.857,0 |
| Total toneladas extraídas por periodos | | 11.571,0 | 11.571,2 | 11.571,0 | 11.571,0 |

Fuente: Elaboración propia

Variable I_{tnp}

En esta fase, se da un inventario de material extraído, el modelo de programación lineal determinó las cantidades que quedan en inventario de cada una de las terrazas por periodos. Así por ejemplo, en la terraza 1 queda un total de 771,0 toneladas correspondientes a los niveles 2 de cada terraza, es decir, 257 toneladas cada una. Se observa que en el periodo 2 no se manejan inventarios de ninguna índole, en el periodo 3, se maneja un inventario igual que el periodo 1 y en el periodo 4 aumenta a 1.542 toneladas. En la siguiente tabla se observan las cantidades arrojadas por el modelo.

Tabla 29. Resultados Variable Imp. Cantidad De Toneladas En Inventario En La Fase 0

| Fase 0 | | | | | |
|--|---|--------------|----------|--------------|----------------|
| Extracción de terrazas | | | | | |
| Variable I | | | | | |
| Cantidad de toneladas que quedan en inventario en la fase 0 de las terrazas por niveles en determinado periodo | | | | | |
| TERRAZAS POR NIVELES | | P1 | P2 | P3 | P4 |
| Terraza 1 | T1 N1 | | | 257,0 | 514,0 |
| | T1 N2 | 257,0 | | | |
| | T1 N3 | | | | |
| | Total inventario de la terraza 1 | 257,0 | - | 257,0 | 514,0 |
| Terraza 2 | T2 N1 | | | 257,0 | 514,0 |
| | T2 N2 | 257,0 | | | |
| | T2 N3 | | | | |
| | Total inventario de la terraza 2 | 257,0 | - | 257,0 | 514,0 |
| Terraza 3 | T3 N1 | | | 257,0 | 514,0 |
| | T3 N2 | 257,0 | | | |
| | T3 N3 | | | | |
| | Total inventario de la terraza 3 | 257,0 | - | 257,0 | 514,0 |
| Total toneladas en inventario en la fase 0 | | 771,0 | - | 771,0 | 1.542,0 |

Fuente: Elaboración propia

Restricción capacidad de extracción de las terrazas – Fase 0

La capacidad real de extracción de las terrazas en la fase 0 es de 3.857 toneladas por terraza para un total de 11.571,4 toneladas semanales. En la información facilitada por el modelo, se analiza la existencia de las cotas, mínima y máxima igual a 3.857 lo que significa que en la fase 0 la capacidad fue usada al 100%.

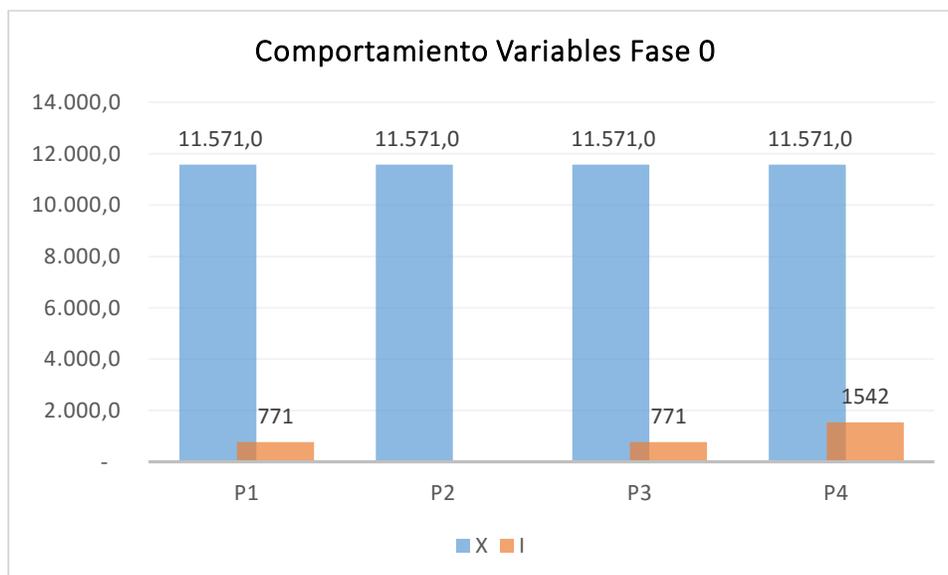
Restricción de los niveles de excavación

Esta restricción se da por normas de seguridad, está relacionada con el orden en que se debe extraer el material por niveles, es decir, cada banco de tierra, se extrae por nivel iniciando en el nivel superior siendo este el nivel 1, luego en el nivel medio o nivel 2 y por último en el nivel inferior o nivel 3, esta restricción se debe efectuar, además de

la seguridad de los trabajadores, para el cumplimiento de las normas ambientales que exige el gobierno.

El modelo de programación, determina que este valor es menor en el nivel 3, en otros casos, este nivel 3 se iguala al nivel medio. De esta manera, el modelo garantiza que esta restricción se cumpla. Esta información se puede corroborar en la tabla 29 donde muestran las cantidades a extraer de las terrazas, demostrando así, que el nivel 3 siempre debe ser menor o por lo mucho igualar los valores del nivel anterior.

Figura 26. Comportamiento de las Variables de la Fase 0



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la gráfica anterior, se puede establecer que la variable $X_{t_{np}}$ determina que la cantidad extraída es constante, es decir, que se utiliza al máximo la capacidad de esta fase. Con respecto a la variable $I_{t_{np}}$ esta es fluctuante y maneja inventarios bajos, esto se debe a que el material pasa hacia la siguiente fase donde se concentra el mayor número de inventarios del sistema.

Fase 1 – Zarandeo

La fase 1 maneja las variables de cantidad de toneladas a procesar (W_{tnp}), restringida por la capacidad de procesamiento de las plataformas ($Caproct$) además, se considera un inventario ($I1_{tnp}$) y la cantidad de material transportado hacia la línea de producción (W_{tnp}). A continuación, se desglosa cada una:

Variable W_{tnp}

Según los resultados obtenidos por el modelo de programación lineal, en el periodo 1, de la terraza 1 y 2 se deben procesar 1.285,7 toneladas de los niveles 1 y 3 mientras que para los niveles 2 se deben procesar 1.028,7. Para el caso de la terraza 3 se deben procesar 2.871,9 del nivel 1, 235,6 del nivel 2 y 492,6 del nivel 3. Para el periodo 2, se deben procesar 3.600 toneladas para cada terraza provenientes de los niveles 3 respectivamente.

A continuación, se pueden observar los resultados completos de cada una de las terrazas por niveles y por periodos.

Tabla 30. Resultados Variable W_{tnp} Cantidad de Toneladas que se Procesan en la Fase 1

| Fase 1 | | | | | |
|---|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Zarandeo | | | | | |
| Variable W | | | | | |
| Cantidad de toneladas que se procesa de la terraza por niveles en determinado periodo | | | | | |
| TERRAZAS POR NIVELES | | P1 | P2 | P3 | P4 |
| Terraza 1 | T1 N1 | 1.285,7 | | 1.028,7 | 1.028,7 |
| | T1 N2 | 1.028,7 | | 1.285,7 | 1.285,7 |
| | T1 N3 | 1.285,7 | 3.600,0 | 1.285,7 | 1.285,7 |
| | Total procesado de la terraza 1 | 3.600,0 | 3.600,0 | 3.600,1 | 3.600,1 |
| Terraza 2 | T2 N1 | 1.285,7 | | 1.028,7 | 1.028,7 |
| | T2 N2 | 1.028,7 | | 1.285,7 | 1.285,7 |
| | T2 N3 | 1.285,7 | 3.600,0 | 1.285,7 | 1.285,7 |
| | Total procesado de la terraza 2 | 3.600,0 | 3.600,0 | 3.600,1 | 3.600,1 |
| Terraza 3 | T3 N1 | 2.871,9 | | 1.028,7 | 1.028,7 |
| | T3 N2 | 235,6 | | 1.285,7 | 1.285,7 |
| | T3 N3 | 492,6 | 3.600,0 | 1.285,7 | 1.285,7 |
| | Total procesado de la terraza 3 | 3.600,0 | 3.600,0 | 3.600,1 | 3.600,1 |
| Total toneladas procesadas por periodos | | 10.800,0 | 10.800,0 | 10.800,3 | 10.800,3 |

Fuente: Elaboración propia

Variable $I1_{tnp}$

En esta fase, se maneja un inventario el cual el modelo de programación lineal determinó que para el periodo 1, en la terraza 1 y 2 es de 822,9 toneladas correspondientes del nivel 2 y 1.002,8 provenientes del nivel 3. Para la terraza 3, el nivel 1 no maneja inventarios mientras que el nivel 2 maneja 188,5 toneladas y el nivel 3 maneja 384,2 toneladas. A continuación, se presenta la tabla con la información completa de cada una de las cantidades que se manejan por periodos y por terrazas.

Tabla 31. Resultados Variable $I1_{tnp}$. Cantidad De Toneladas en Inventario en la Fase 1.

| Fase 1 | | | | | |
|--|---|----------------|----------|----------------|-----------------|
| ZARANDEO | | | | | |
| Variable I1 | | | | | |
| Cantidad de toneladas que quedan en inventario en la fase 1 de las terrazas por niveles en determinado periodo | | | | | |
| TERRAZAS POR NIVELES | | P1 | P2 | P3 | P4 |
| Terraza 1 | T1 N1 | | | 245,9 | |
| | T1 N2 | 822,9 | | 1.028,5 | 2.057,1 |
| | T1 N3 | 1.002,8 | | 1.002,8 | 2.005,6 |
| | Total inventario de la terraza 1 | 1.825,8 | - | 2.277,2 | 4.062,7 |
| Terraza 2 | T2 N1 | | | 843,5 | |
| | T2 N2 | 822,9 | | 1.028,5 | 2.057,1 |
| | T2 N3 | 1.002,8 | | 1.002,8 | 2.005,6 |
| | Total inventario de la terraza 2 | 1.825,8 | - | 2.874,9 | 4.062,7 |
| Terraza 3 | T3 N1 | | | 843,5 | |
| | T3 N2 | 188,5 | | 1.028,5 | 2.057,1 |
| | T3 N3 | 384,2 | | 1.002,8 | 2.005,6 |
| | Total inventario de la terraza 3 | 572,7 | - | 2.874,9 | 4.062,7 |
| Total toneladas extraídas por periodos | | 4.224,2 | - | 8.027,0 | 12.188,1 |

Fuente: Elaboración propia

Variable Y_{tnp}

La variable Y_{tnp} determina la cantidad de toneladas transportadas desde la fase 1 hacia la línea de producción iniciando en la plataforma 4. El modelo determinó los siguientes valores, para el periodo 1, se deben transportar 1.054,2 toneladas desde la terraza 1 y 2 mientras que desde la terraza 3 se deben transportar 2.354,9 para un total de 4.463,4 toneladas transportadas hacia la línea de producción. En la siguiente tabla, se puede observar la información completa de cada una de las unidades transportadas por periodo.

Tabla 32. Resultados Variable Y_{tmp} . Cantidad de Toneladas Transportadas de la Fase 1 Hacia la Plataforma 4.

| TRANSPORTE | | | | | |
|---|---|----------------|----------|--------------|----------------|
| Variable Y | | | | | |
| Cantidad de toneladas transportadas de las terrazas por niveles en la fase 1 a la plataforma 4 en determinado periodo | | | | | |
| TERRAZAS POR NIVELES | | P1 | P2 | P3 | P4 |
| Terraza 1 | T1 N1 | 1.054,2 | | 597,6 | 1.089,4 |
| | T1 N2 | | | | |
| | T1 N3 | | | | |
| | Total transportado de la terraza 1 | 1.054,2 | - | 597,6 | 1.089,4 |
| Terraza 2 | T2 N1 | 1.054,2 | | | 1.687,0 |
| | T2 N2 | | | | |
| | T2 N3 | | | | |
| | Total transportado de la terraza 2 | 1.054,2 | - | - | 1.687,0 |
| Terraza 3 | T3 N1 | 2.354,9 | | | 1.687,0 |
| | T3 N2 | | | | |
| | T3 N3 | | | | |
| | Total transportado de la terraza 3 | 2.354,9 | - | - | 1.687,0 |
| Total toneladas procesadas por periodos | | 4.463,4 | - | 597,6 | 4.463,4 |

Fuente: Elaboración propia

Restricción capacidad de zarandeo – Fase 1

La capacidad real de procesamiento en la fase 1 es 3.600 toneladas por terrazas para un total de 10.800 toneladas semanales. El modelo muestra que la capacidad de este proceso está siendo explotada al 100% al tener como cota mínima y máxima la capacidad total de procesamiento, es decir que la utiliza a su tope.

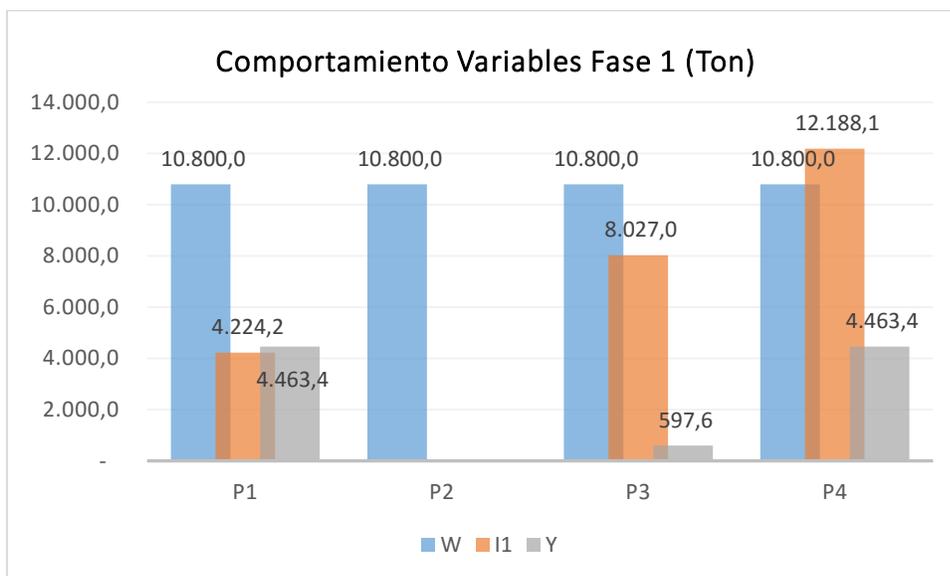
El programa arroja costos marginales para todas las terrazas y para todos los periodos, es decir, este valor indica por ejemplo, que en la terraza 1, periodo 1 el valor variará en 7.928,3. Esta información, se puede corroborar en el anexo B donde se muestran los resultados del modelo de programación.

Restricción capacidad de transporte

Para transportar las toneladas disponibles para la línea de producción se usan volquetas las cuales tienen una capacidad de 2.700 toneladas por terraza para un total de 8.100 toneladas. Los datos suministrados por el modelo muestra que la capacidad de transporte no está siendo usada en su máximo, puesto que para el periodo 1 se utilizó 4.463,4 toneladas que corresponde a un 55% de su capacidad total, en el periodo 2 no se utilizó transporte, es decir, la capacidad quedo subutilizada, en el periodo 3, se utilizó 597,6 que equivale al 7,31% de su capacidad.

Cabe anotar, que la capacidad de los procesos de las fases 0 y 1 es muy superior a la capacidad de la línea de producción, por lo tanto, el modelo considera que no es necesario transportar al 100% de su capacidad, esto se puede corroborar con el inventario que se da al inicio de la plataforma 4 el cual para el periodo 2 es de 3865,8 es por esto que no se trasladó material de la fase 1 a la línea de producción en el periodo 2. Esta información, se corrobora en la restricción de transporte donde los valores arrojados no llegan a la cota máxima así como tampoco genera un costo marginal.

Figura 27. Comportamientos Variables Fase 1



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la gráfica anterior se puede analizar el comportamiento de las variables por periodos. En el caso de la variable W_{tnp} muestra que es utilizada su

capacidad máxima en todos los periodos, por lo tanto es lineal, esto se ve reflejado en la variable de inventarios de la fase 0 (I_{tnp}) la cual es creciente a medida que van pasando los periodos, esto se debe porque la capacidad de (W_{tnp}) está siendo utilizada al máximo y no se transportan (Y_{tnp}) todas estas unidades hacia la línea de producción pues no se hace necesario debido a la capacidad de las siguientes plataformas. Por lo tanto, la variable de transporte (Y_{tnp}) es fluctuante.

Fase de producción – plataforma 4

En esta primera plataforma de la fase de producción, se manejan las cantidades procesadas en ella (Z_{tnp}) restringida por la capacidad de procesamiento ($Capplat4$). Adicionalmente, se tiene en cuenta la variable de inventario que se presenta al inicio de esta plataforma ($I2_{tnp}$).

Variable Z_{tnp}

Con respecto a la variable relacionada con el proceso que se da en la plataforma 4, el modelo determinó que para el periodo 1 se procesan 1.054,2 toneladas correspondientes a las plataformas 1 y 2, mientras que la plataforma 3 se procesan 2.354,9 toneladas para un total de 4.463,4 toneladas procesadas. En la siguiente tabla, se observan los resultados obtenidos para cada periodo.

Tabla 33. Resultados Variable Z_{tnp} . Cantidad de Toneladas Procesadas en la Plataforma 4

| FASE DE PRODUCCIÓN | | | | | |
|---|--|----------------|----------------|----------------|----------------|
| PLATAFORMA 4 | | | | | |
| Variable Z | | | | | |
| Cantidad de toneladas que se procesan en la plataforma 4 de las terrazas por niveles en determinado periodo | | | | | |
| TERRAZAS POR NIVELES | | P1 | P2 | P3 | P4 |
| Terraza 1 | T1 N1 | 1.054,2 | 4.463,4 | 4.463,4 | 1.089,4 |
| | T1 N2 | | | | |
| | T1 N3 | | | | |
| | Total procesado de la terraza 1 | 1.054,2 | 4.463,4 | 4.463,4 | 1.089,4 |
| Terraza 2 | T2 N1 | 1.054,2 | | | 1.687,0 |
| | T2 N2 | | | | |
| | T2 N3 | | | | |
| | Total procesado de la terraza 2 | 1.054,2 | | - | 1.687,0 |
| Terraza 3 | T3 N1 | 2.354,9 | | | 1.687,0 |
| | T3 N2 | | | | |
| | T3 N3 | | | | |
| | Total procesado de la terraza 3 | 2.354,9 | - | - | 1.687,0 |
| Total toneladas procesadas por periodos | | 4.463,4 | 4.463,4 | 4.463,4 | 4.463,4 |

Fuente: Elaboración propia

Variable $I2_{tnp}$

Al inicio de la plataforma 4 se da un inventario para el cual el modelo calculo que solo en el periodo 2 se presenta por una cantidad de 3.865,8 toneladas provenientes de la terraza 1 nivel 1.

En la siguiente tabla se observan los resultados arrojados.

Tabla 34. Resultados Variable I2_{mp}. Cantidad de Toneladas en Inventario al Inicio de la Plataforma 4

| FASE DE PRODUCCIÓN | | | | | |
|--|---|----|----------------|----|----|
| PLATAFORMA 4 | | | | | |
| Variable I2 | | | | | |
| Cantidad de toneladas que quedan en inventario en la plataforma 4 de las terrazas por niveles en determinado periodo | | | | | |
| TERRAZAS POR NIVELES | | P1 | P2 | P3 | P4 |
| Terraza 1 | T1 N1 | | 3.865,8 | | |
| | T1 N2 | | | | |
| | T1 N3 | | | | |
| | Total inventario de la terraza 1 | - | 3.865,8 | - | - |
| Terraza 2 | T2 N1 | | | | |
| | T2 N2 | | | | |
| | T2 N3 | | | | |
| | Total inventario de la terraza 2 | - | - | - | - |
| Terraza 3 | T3 N1 | | | | |
| | T3 N2 | | | | |
| | T3 N3 | | | | |
| | Total inventario de la terraza 3 | - | - | - | - |
| Total toneladas en inventario plataforma 4 | | - | 3.865,8 | - | - |

Fuente: Elaboración propia

Restricción de capacidad de procesamiento de la plataforma 4

Las toneladas que son transportadas hacia la línea de producción ingresan primeramente a la plataforma 4 la cual tiene una capacidad máxima de 6.500 toneladas semanales, de las cuales se están utilizando 4.463,4 lo que corresponde a un 69% de su capacidad máxima, esta plataforma no puede utilizar su capacidad máxima puesto que la capacidad de una de las máquinas de la plataforma 5 es inferior a esta, por lo que, si se utilizara al máximo, ocurriría un derrame de material en esta plataforma. Esta información se confirma en los resultados de dicha restricción en el modelo donde el valor tomado no iguala la cota máxima así como tampoco arroja valores marginales.

Fase de producción – Plataforma 5

La siguiente plataforma dentro de la línea de producción, maneja la variable relacionadas con la cantidad de producto procesado (O_{tnp}), restringida por su capacidad (Capplat5).

Variable O_{tnp}

A través del modelo de programación lineal se determinó que la cantidad de toneladas a procesar de la plataforma 5 es de 3.660 en el periodo 1, de las cuales 864,5 provienen de la terraza 1 nivel 1, mientras que de la terraza 2 nivel 2 proviene la misma cantidad, por otro lado, de la terraza 3 nivel 1 provienen 1.931 toneladas. En la siguiente tabla se puede observar la información arrojada en cada uno de los periodos.

Tabla 35. Resultados Variable O_{tnp} . Cantidad de Toneladas Procesadas en la Plataforma 5

| FASE DE PRODUCCIÓN | | | | | |
|---|--|----------------|----------------|----------------|----------------|
| PLATAFORMA 5 | | | | | |
| Variable O | | | | | |
| Cantidad de toneladas que se procesan en la plataforma 5 de las terrazas por niveles en determinado periodo | | | | | |
| TERRAZAS POR NIVELES | | P1 | P2 | P3 | P4 |
| Terraza 1 | T1 N1 | 864,5 | 3.660,0 | 3.660,0 | 893,3 |
| | T1 N2 | | | | |
| | T1 N3 | | | | |
| | Total procesado de la terraza 1 | 864,5 | 3.660,0 | 3.660,0 | 893,3 |
| Terraza 2 | T2 N1 | | | | 1.383,4 |
| | T2 N2 | 864,5 | | | |
| | T2 N3 | | | | |
| | Total procesado de la terraza 2 | 864,5 | | - | 1.383,4 |
| Terraza 3 | T3 N1 | 1.931,0 | | | 1.383,4 |
| | T3 N2 | | | | |
| | T3 N3 | | | | |
| | Total procesado de la terraza 3 | 1.931,0 | - | - | 1.383,4 |
| Total toneladas procesadas en la plataforma 5 por periodos | | 3.660,0 | 3.660,0 | 3.660,0 | 3.660,0 |

Fuente: Elaboración propia.

Restricción de capacidad de procesamiento de la Plataforma 5

La mayor parte de las toneladas que se procesan en la plataforma 4 pasan a la plataforma 5, esta plataforma tiene una capacidad de 3.660 toneladas semanales de las cuales se está utilizando el 100%. El modelo muestra que esta capacidad se está explotando al 100% pues iguala los valores utilizados a su cota máxima. Además, según los rendimientos marginales, el recurso es escaso dado que se tendría que pagar dinero adicional para aumentar la capacidad en esta plataforma como se verá en futuros análisis.

Este recurso es considerado el cuello de botella del sistema debido a que su capacidad es muy inferior a los de los demás recursos, por lo que, utilizándose al 100% no alivia los flujos de producción generando los inventarios en las plataformas anteriores.

Fase de producción – Plataforma 6

La siguiente plataforma dentro de la fase de producción maneja las variables relacionadas con la cantidad de material procesado en ella (K_{tnp}) restringida por la capacidad de la plataforma (Cap_{plat6}). Además, esta plataforma ya maneja los productos terminados, listos y disponibles para su venta.

Variable K_{tnp}

Para esta variable, el modelo consideró que se procesan de las plataformas 1 y 2 cada una 1.173,2 toneladas provenientes de los niveles 1 respectivamente y 2.620,7 de la plataforma 3 nivel 1 para un total de 4.967,1 toneladas en el periodo 1. En la siguiente tabla se observan los resultados arrojados en cada uno de los periodos.

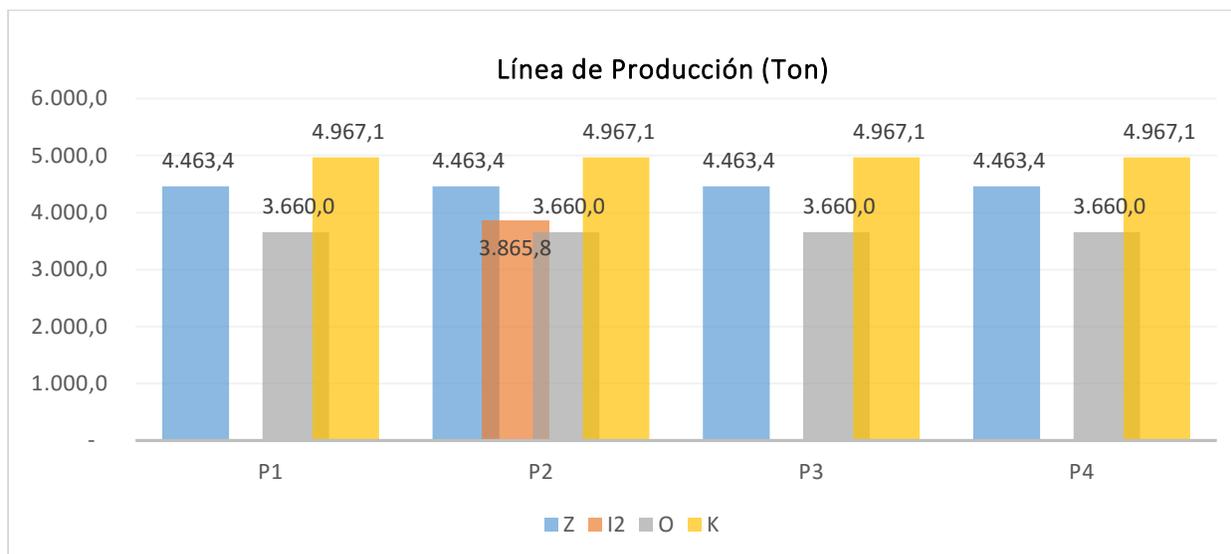
Tabla 36. Resultados Variable K_{tmp} . Cantidad de Toneladas Procesadas en la Plataforma 6.

| FASE DE PRODUCCIÓN | | | | | |
|---|--|----------------|----------------|----------------|----------------|
| PLATAFORMA 6 | | | | | |
| Variable K | | | | | |
| Cantidad de toneladas que se procesan en la plataforma 6 de las terrazas por niveles en determinado periodo | | | | | |
| TERRAZAS POR NIVELES | | P1 | P2 | P3 | P4 |
| Terraza 1 | T1 N1 | 1.173,2 | 4.967,1 | 4.967,1 | 1.212,3 |
| | T1 N2 | | | | |
| | T1 N3 | | | | |
| | Total procesado de la terraza 1 | 1.173,2 | 4.967,1 | 4.967,1 | 1.212,3 |
| Terraza 2 | T2 N1 | 1.173,2 | | | 1.877,4 |
| | T2 N2 | | | | |
| | T2 N3 | | | | |
| | Total procesado de la terraza 2 | 1.173,2 | | - | 1.877,4 |
| Terraza 3 | T3 N1 | 2.620,7 | | | 1.877,4 |
| | T3 N2 | | | | |
| | T3 N3 | | | | |
| | Total procesado de la terraza 3 | 2.620,7 | - | - | 1.877,4 |
| Total toneladas procesadas por | | 4.967,1 | 4.967,1 | 4.967,1 | 4.967,1 |

Fuente: Elaboración propia.

Restricción de capacidad de procesamiento de la Plataforma 6

La plataforma 6 tiene una capacidad de 7.850 toneladas semanales de las cuales se utilizan 4.967,1 lo que equivale al 63% de su capacidad total. Información que se soporta en los resultados del modelo donde evidencia que el valor tomado no iguala la cota máxima, además, no maneja costos marginales.

Figura 28. Comportamiento variables Plataformas 4, 5 y 6.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la figura 28 se determina que las variables Z y K, asociadas a la cantidad de producto procesado en la plataforma 4 y 6 respectivamente, son constantes, pues estas variables se ajustan a la capacidad de la plataforma 5 donde se encuentra el cuello de botella. La variable O, que determina la cantidad procesada en la plataforma 5 igualmente se mantiene constante en todos los periodos siendo usada la capacidad al 100%. Con respecto a la variable K, también se mantiene constante, puesto que depende de la capacidad de la plataforma anterior donde se encuentra el cuello de botella.

Se evidencia que el cuello de botella se encuentra en la plataforma 5 donde los recursos están siendo utilizados al 100% mientras que las demás plataformas, se utilizan entre el 63% y 69%.

Productos finales FPF1, FPF2, FPF3 y FPF4

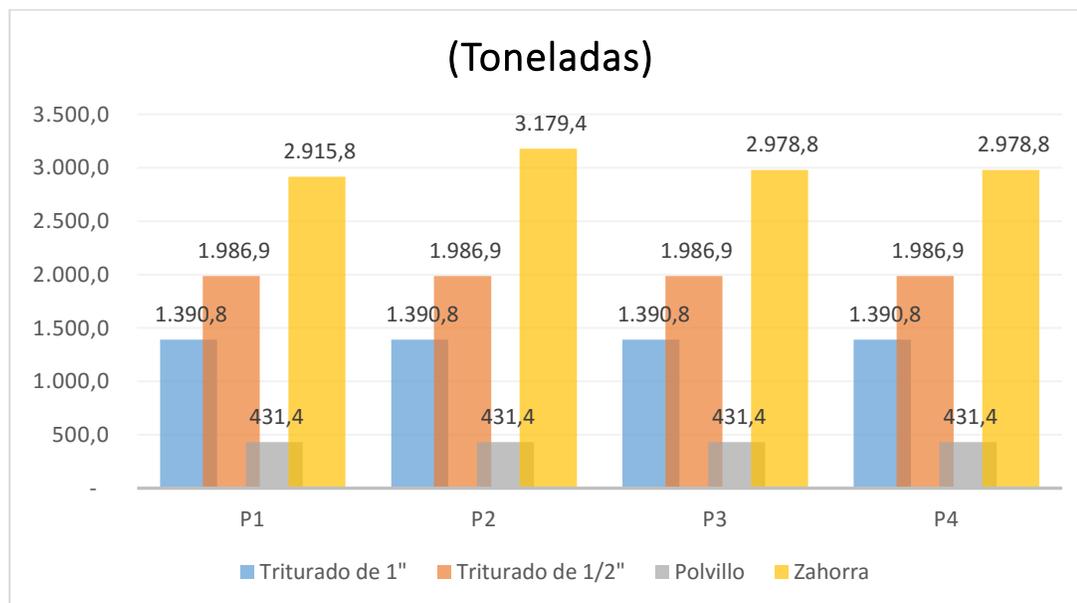
Después de analizar las variables involucradas con los procesos, a continuación, se presenta una tabla donde muestran las cantidades obtenidas por el modelo de programación lineal planteado para la programación de la producción de cada uno de los productos por periodos. Se observa que para el periodo 1, se obtuvieron 1.390,8 toneladas de triturado de 1", 1.896,9 toneladas de triturado de ½", 431,4 toneladas de polvillo y 2.961,7 toneladas de zahorra. Los siguientes periodos se presentan a continuación.

Tabla 37. Cantidades de productos finales de Cimaco.

| FASE DE PRODUCCIÓN | | | | | |
|--|-------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| PLATAFORMA 5 | | | | | |
| Variables FPF1, FPF2, FPF3 y FPF4 | | | | | |
| Productos finales | | | | | |
| Productos | | P1 | P2 | P3 | P4 |
| FPF1 | Triturado de 1" | 1.390,8 | 1.390,8 | 1.390,8 | 1.390,8 |
| FPF2 | Triturado de 1/2" | 1.986,9 | 1.986,9 | 1.986,9 | 1.986,9 |
| FPF3 | Polvillo | 431,4 | 431,4 | 431,4 | 431,4 |
| FPF4 | Zahorra | 2.915,8 | 3.179,4 | 2.978,8 | 2.978,8 |
| Total toneladas de productos por periodos | | 6.724,8 | 6.988,4 | 6.787,8 | 6.787,8 |

Fuente: Elaboracion propia

Figura 29. Cantidades de productos finales de Cimaco



Fuente: Elaboracion propia

En la figura anterior, se puede observar que las cantidades de los productos para todos los periodos es constante, a excepción de la zahorra la cual fluctúa dependiendo de las cantidades procesadas en las fases 0 y 1 las cuales se explotan al 100% lo que significa que los inventarios son altos y por ende se tendrá una cantidad alta de este producto.

Gracias al modelo de programación lineal, se logró generar las cantidades óptimas de cada una de las plataformas en Cimaco. Este decidiría, de acuerdo a las restricciones ingresadas, cual es el plan óptimo de producción de manera que se convierta en una estrategia que permita generar mayores ingresos y mejore la productividad de la empresa. Así mismo, se obtuvieron resultados palpables los cuales servirán como referencia para una implementación por parte de la empresa en estudio.

Cabe resaltar, que el producto Zahorra es el que mayor se genera, debido a que este emerge en dos partes diferentes, en la fase de Zarandeo y en la plataforma 4. Es importante aclarar, que este producto, al igual que el polvillo, son desperdicios que se generan del proceso productivo y estos son usados para comercializarse por las grandes ventajas que poseen, en el caso de la zahorra, se utiliza como material de relleno y el polvillo, se utiliza como base para cemento y elaboración de ladrillos. Teniendo en cuenta esta situación, se puede determinar, que estos productos hacen parte de un proceso de logística inversa debido a que se recuperan los residuos del proceso de fabricación y como desperdicio, la empresa busca comercializarlos con el fin de buscar un beneficio económico.

Estos dos productos tienen una proporción en precios con el triturado de la siguiente manera

Tabla 38. Proporción de los Productos Principales con los Productos Desperdicios.

| | Triturado de 1" | Triturado de 1/2" |
|----------|-----------------|-------------------|
| Zahorra | 6 a 1 | 7 a 1 |
| Polvillo | 4,6 a 1 | 5 a 1 |

Fuente: Elaboracion propia

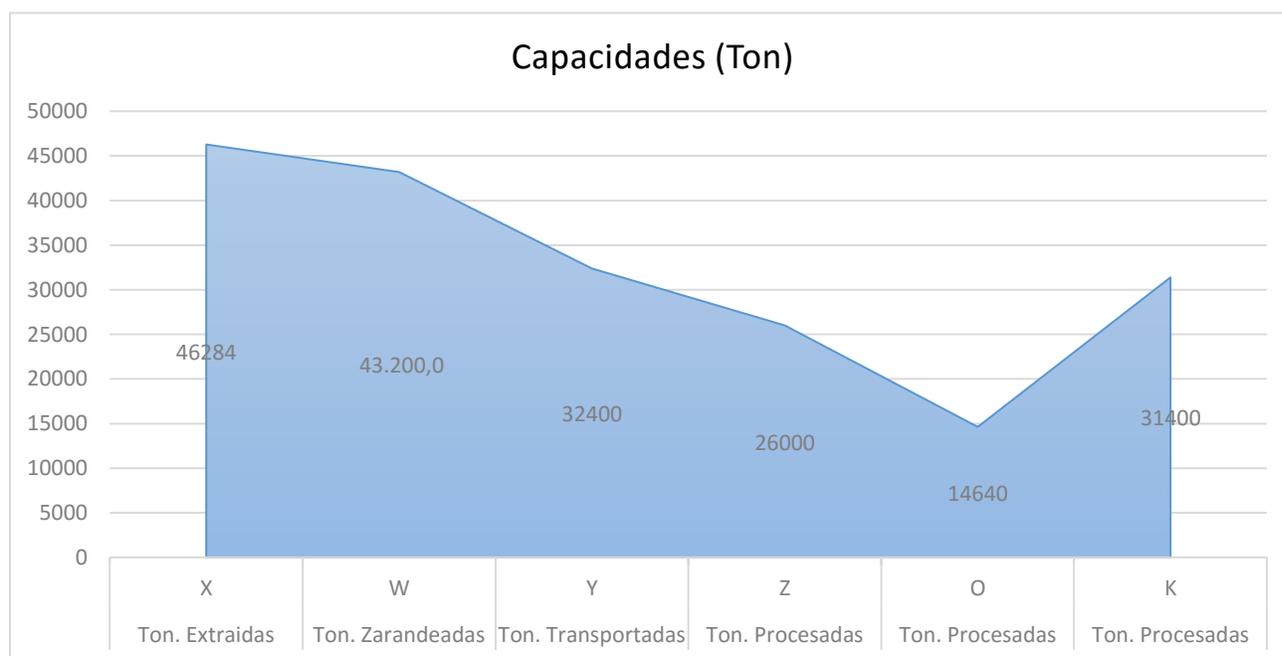
La tabla anterior explica la relación en términos de precios que existen entre los productos, para el caso de la zahorra y el triturado de 1", se determina que por la compra de una toneladas de triturado de 1" se podrían comprar 6 de Zahorra.

Los productos principales de Cimaco son los triturados y el modelo estimula la fabricación de estos dos productos que son los que se venden a un precio mayor y generan mayor utilidad, sin embargo, la fabricación de estos generan dos productos secundarios, zahorra y polvillo, su producción está relacionada a la de triturados, es decir, al fabricar los productos principales, automáticamente se generan los secundarios siendo estos una consecuencia del proceso que no se puede controlar.

5.2. Combinación análisis TOC + PL

Como complemento en la búsqueda de establecer conclusiones más acertadas, se analizan los resultados de la aplicación de la teoría de las restricciones combinado con los que arrojo el modelo de optimización con el fin de determinar si el cuello de botella es el mismo para luego ofrecer recomendaciones a la gerencia de Cimaco para su explotación máxima.

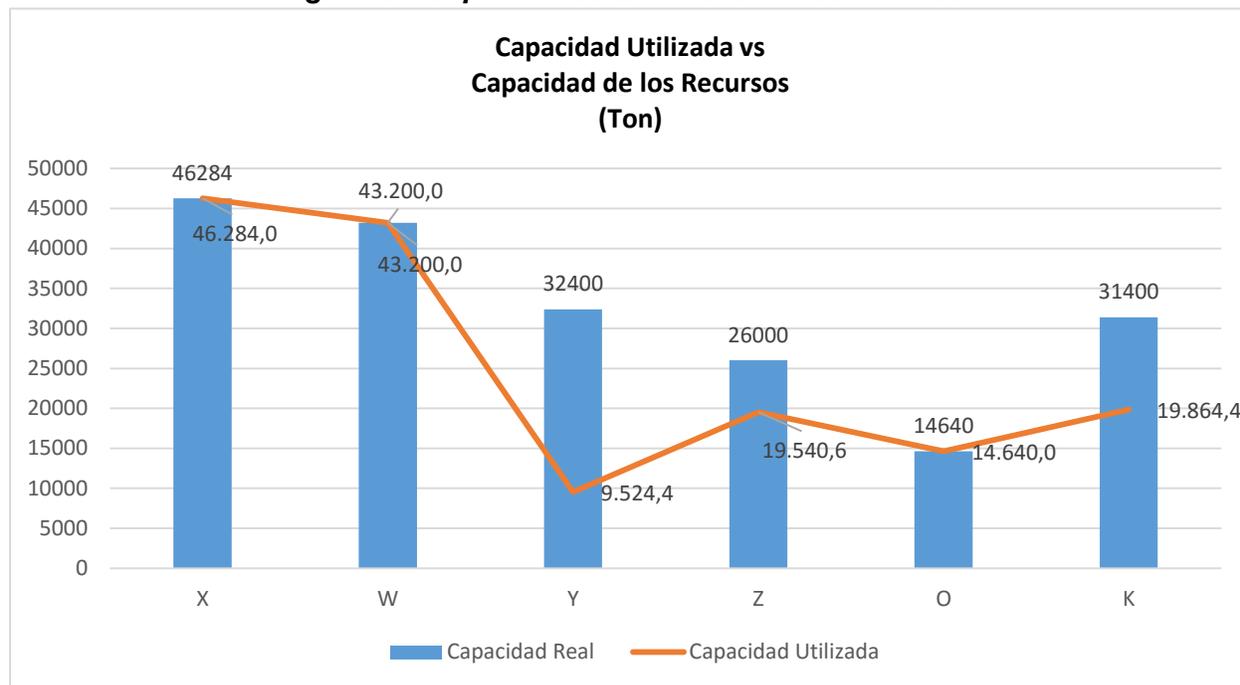
Figura 30. Capacidades de los Recursos



Fuente: Elaboracion propia

En la figura anterior, se observan las capacidades de todos los recursos que hacen parte del proceso productivo de Cimaco. Se evidencia que la capacidad del Recurso O, asociado a la plataforma 5 de la línea de producción, es muy inferior a la de los demás recursos, teniendo así un cuello de botella que se debe explotar.

Figura 31. Capacidades Utilizadas de los Recursos



Fuente: Elaboración propia

En la figura 31 se observa la utilización de los recursos que hacen parte del proceso productivo de Cimaco, soportando así que el cuello de botella se encuentra en la plataforma 5, representado por la capacidad de procesamiento del cono o trituradora secundaria de la plataforma 5 (variable O) del modelo de programación lineal.

Uno de los objetivos de este trabajo, se soporta en ofrecerle a Cimaco alternativas que combine sus recursos de manera que aumente su productividad y por ende su utilidad al aplicar un modelo que mejore significativamente la planificación de la producción y al tiempo balancearla sus productos, es decir, que estos estén alineados a la fase de producción.

A continuación, se presentan las ventajas de los modelos aplicados en Cimaco ratificando lo beneficioso y la ventaja que es para cualquier empresa planificar su producción de una manera coherente aplicando conceptos de mejora continua dentro de ella.

Tabla 39. Comparación Modelos Aplicados en Cimaco.

| | CONOCER | | EXPLOTAR | | MEJORAR | |
|--|--|--|--|---|--|--|
| | TOC | PL | TOC | PL | TOC | PL |
| CAPACIDAD | Ambos modelos permitieron conocer la capacidad máxima del sistema de producción identificando el cuello de botella. | | Los dos modelos establecen que el recurso restrictivo, debe producir el 100% de la capacidad disponible. De esta manera, se garantiza la explotación completa de este recurso de manera que no pare. | | | |
| | Los dos modelos permitieron conocer el Throughput (TOC) y beneficios máximos (FO) del sistema de producción. | | La TOC sugiere no explotar los demás recursos al 100% y manejar solo el inventario necesario para garantizar que la restricción no pare y esta si se explote a su capacidad máxima. | El modelo de PL sugiere explotar algunos recursos al 100% y manejar un inventario que estaría disponible en caso de situaciones fortuitas de mantenimiento o reparaciones inesperadas, además, el modelo permitió observar el comportamiento de cada una de las variables que intervienen en el proceso productivo de Cimaco. | | Ambos modelos sugieren mejorar la capacidad del recurso restrictivo. |
| | Ambos modelos orientan que las decisiones que se tomen estén encaminadas a los objetivos de producción. | | | | | |
| CONOCER | | EXPLOTAR | | MEJORAR | | |
| TIEMPO | Ambos modelos permiten conocer el tiempo que puede tomar la línea de producción en entregar un pedido. | | Ambos modelos buscan el cumplimiento de las fechas de entregas pactadas con los clientes. | | | |
| | La TOC suministra fecha de entrega a clientes por pedidos. | El modelo de PL suministra las cantidades totales de producción lo que sirve como herramienta para conocer las fechas de entregas. | | | | |
| INVENTARIOS | CONOCER | | EXPLOTAR | | MEJORAR | |
| | TOC | | PL | | | |
| El modelo TOC busca una correcta gestión de inventario por medio de un dimensionamiento óptimo de sus cantidades. | | El modelo de PL busca mantener inventarios como colchón para su línea de producción. | | | | |
| PROCESOS | CONOCER | | EXPLOTAR | | MEJORAR | |
| | TOC | | PL | | | |
| | El modelo TOC focaliza sus esfuerzos de mejora de procesos hacia aquellos que más benefician el sistema de producción. | | El modelo de PL focaliza sus esfuerzos de mejora de procesos hacia aquellos que más benefician el sistema de producción, además, aquellos que se pueden explotar al máximo. | | | |
| Ambos modelos optimizan la explotación a través de la mejora del sistema al aumentar la capacidad del recurso restrictivo y evitando reprocesos. | | | | | | |
| Ambos modelos, sugieren mejorar el proceso que afecta los cumplimiento. | | | | | | |
| COMUNICACIÓN | CONOCER | | EXPLOTAR | | MEJORAR | |
| | TOC | | PL | | | |
| | Los dos modelos, permiten que se reduzcan los conflictos y que mejore el trabajo en equipo entre áreas engranadas, gracias a la organización de las actividades que hacen parte del proceso de producción de Cimaco. | | | | El modelo TOC alinea los óptimos locales de producción con el óptimo global. | |
| El modelo TOC alinea los óptimos locales de producción con el óptimo global. | | El modelo de PL alinea el óptimo global, sin embargo, considera explotar al 100% algunos recursos locales. | | | | |

Fuente: Elaboración propia basado en la información de Teoceconsultors. (2007).

Los resultados de las dos aplicaciones claramente muestran que el cuello de botella está ubicado en la plataforma 5, en la capacidad de procesamiento de la segunda trituradora o cono. Ambos modelos, sustentan que este debe usarse al 100% para su explotación máxima.

Se conoce que el producto que genera mayor Throughput es el producto 2 triturado de ½", sin embargo, el sistema productivo de Cimaco no permite producir este de manera exclusiva, puesto que la línea de producción realiza todas las operaciones correspondientes para el proceso de la materia prima y este va concatenado, es decir, si aumenta la producción de los Triturados, igualmente aumentara la producción del Polvillo y Zahorra de acuerdo a los factores de recuperación ya establecidos por el sistema en las diferentes plataformas.

Una de las diferencias marcadas de los dos modelos, está determinada por la cantidad que se debe extraer en la fase 0 y la que se debería procesar en la fase 1, según el modelo de PL, este recurso debe explotarse al 100% gracias al espacio que tiene para inventario, puesto que no se limita, esto significa que la maquinaria estaría operando todas sus horas laborales obteniendo un inventario cuantioso. Por el lado de la TOC, esta considera no operar el 100% la maquinaria sino dependiendo de sus pedidos y del pronóstico de ventas tal como lo define la metodología DBR, esto a su vez presenta una ventaja amplia debido a las grandes pérdidas que se tienen por obsolescencia de material. Este fenómeno, se da dentro de Cimaco muy seguido puesto que se opera a cielo abierto y esto expone a condiciones climáticas inciertas al material que se encuentra en inventario, el cual, una vez húmedo, se tiene que esperar que la humedad desaparezca para ser procesado lo cual puede tomar un tiempo considerable, esto, depende de las condiciones climáticas de los siguientes periodos. Cimaco ha estimado pérdidas aproximadas de \$65'000.000 trimestrales por obsolescencia de material.

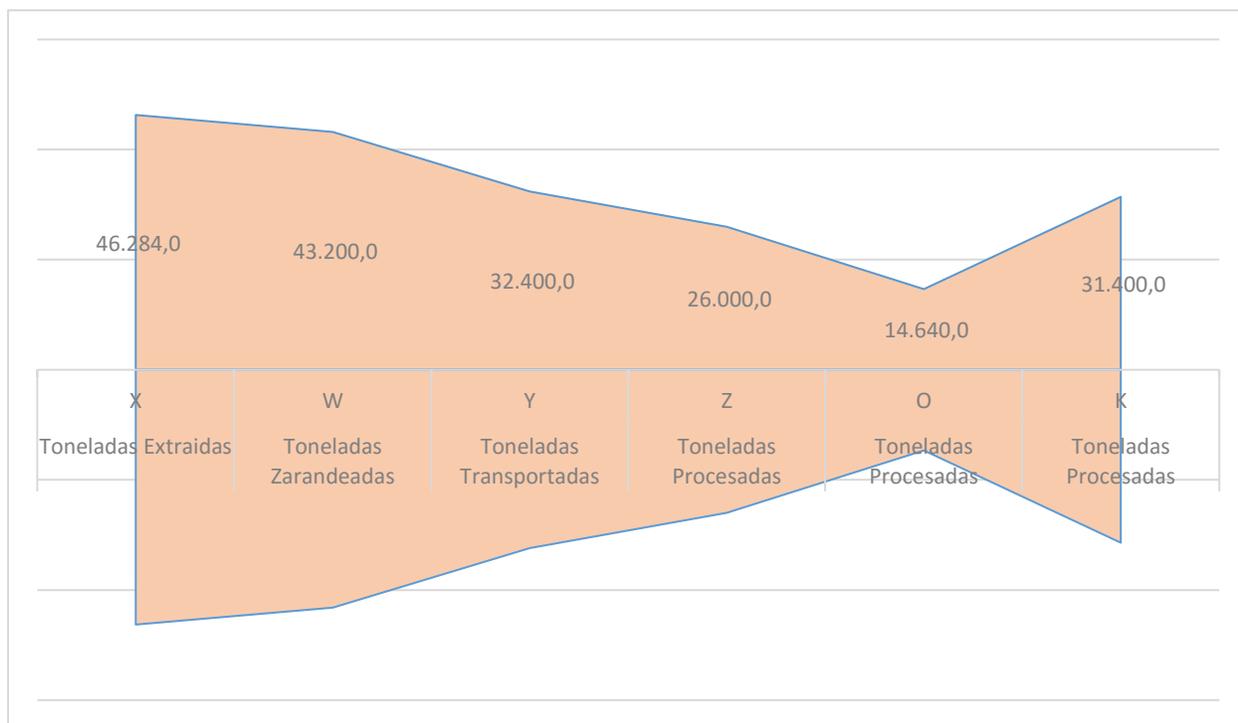
La metodología DBR, propone mantener solo el material en inventario necesario para garantizar la operación del cuello de botella, esto no permite que hayan grandes gastos energéticos, de mano de obra, insumos, entre otro que podrían estar expuestos a perderse gracias a la posible pérdida del inventario.

EL modelo de programación lineal es un modelo que posee un soporte matemático robusto para la aplicación dentro de Cimaco lo que genera una confianza en su aplicación.

El modelo de programación lineal, está explotando al máximo su capacidad puesto que este considera las ventas del 100% de sus productos, esto gracias al auge en que se encuentra la construcción en el departamento de Bolívar, cada vez más, hay muchos proyectos de toda índole que aumenta significativamente la demanda de agregados. Es por esto, que se convierte en una necesidad inminente que Cimaco se organice y que

pueda planificar correctamente su producción para así poder cubrir la demanda y satisfacer a sus clientes.

Figura 32. Análisis de las Capacidades para Identificación del Cuello de Botella.



Fuente: Elaboración propia

La figura 32 muestra de una manera más clara el cuello de botella del sistema productivo de Cimaco el cual se gestionó con la metodología TOC y se explotó en la metodología DBR al igual que en el modelo de PL.

5.3. Análisis de sensibilidad

Después de analizar los resultados arrojados por el modelo de programación lineal se evidenció claramente que el cuello de botella se encuentra en la plataforma 5 debido a la capacidad de la trituradora cono o trituradora secundaria, la cual es muy inferior a las capacidades de las demás máquinas que componen la línea de producción. Teniendo en cuenta esta información, a continuación, se presentarán diferentes escenarios para analizar el comportamiento del modelo.

5.3.1. Escenario 1: Aumento de la capacidad del cuello de botella. Actualmente, la capacidad de la plataforma 5 es igual a 3.660 toneladas por semana, la cual está determinada por la capacidad de la trituradora Cono que tiene un motor de 200 caballos de fuerza, para el análisis de sensibilidad, en este escenario se varió la capacidad de esta plataforma aumentándola al 35%, 70% y 100% de manera que permita ver cómo se comporta el modelo y cuáles son los cambios de las variables que se dan en cada fase. Así mismo, se analizarán los cambios que tuvieron las funciones objetivos y los productos finales considerando la demanda de la empresa.

Las modificaciones se realizaron sobre el modelo de PL para encontrar la combinación óptima de manera que se pueda entender cuál es la adecuada y ofrecerle una solución a Cimaco.

A continuación, se presentan los resultados de análisis de sensibilidad para los periodos mensuales.

Tabla 40. Análisis de Sensibilidad. Variación de la Capacidad del Recurso Restricción

| Toneladas / mes | | FASE 0 | | FASE 1 | | | FASE DE PRODUCCIÓN | | | |
|------------------------------------|----------|---------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | Extracción | Inventario Fase 0 | Zarandeo | Inventario | Transporte | Inventario | Plataforma 4 | Plataforma 5 | Plataforma 6 |
| | | Toneladas Extraídas | Toneladas Inventario Fase 0 | Toneladas Zarandeadas | Toneladas Inventario Fase 1 | Toneladas Transportadas | Toneladas Inventario Plat 4 | Toneladas Procesadas | Toneladas Procesadas | Toneladas Procesadas |
| | | X | I | W | I1 | Y | I2 | Z | O | K |
| Capacidad Real | 14.640,0 | 46.284,0 | 3.084,0 | 43.200,0 | 24.439,3 | 9.524,4 | 3.865,8 | 19.540,6 | 14.640,0 | 19.864,4 |
| Capacidad aumentada al 35% | 19.764,0 | 46.284,0 | 3.084,0 | 43.200,0 | 23.184,0 | 12.051,2 | 6.025,6 | 24.102,4 | 19.764,0 | 26.822,5 |
| Capacidad aumentada al 75% | 25.620,0 | 46.284,2 | 3.084,0 | 43.200,3 | 21.841,2 | 12.825,5 | 6.849,0 | 26.000,0 | 22.079,0 | 28.934,3 |
| Capacidad aumentada al 100% | 29.280,0 | 46.284,2 | 3.084,0 | 43.200,3 | 21.841,2 | 12.825,5 | 6.849,0 | 26.000,0 | 22.079,0 | 28.934,3 |

Fuente: Elaboración propia.

La tabla anterior permite analizar el comportamiento de cada una de las variables al experimentar cambios en la capacidad del recurso restrictivo, bajo la presencia de las demás variables sin modificaciones. Lo anterior condujo a realizar un análisis de sensibilidad el cual presenta los resultados en la tabla 40 (arriba) de lo cual se infiere que a medida que el valor de la restricción aumenta, las demás variables aumentan hasta convertir otro recurso en el nuevo cuello de botella.

La variable X que indica la cantidad de toneladas extraídas en la fase 0 se explota al 100% en todos los escenarios, esto se debe a que posee un gran espacio para inventario el cual es ilimitado en este caso.

Con respecto a la variable I, la cantidad de inventario que se da en la fase 0, este se mantiene igual para todos los escenarios puesto que el material extraído pasa a la siguiente fase donde se encuentra la variable W que indica la cantidad de material procesado en la fase 1 – Zarandeo, el cual se comporta de la misma manera en todos los escenarios, es decir, utiliza su capacidad al 100% por su parte, el inventario que se da en esta fase, I1, disminuye a medida que la capacidad del recurso restrictivo va aumentando, es decir, en esta fase se concentra el mayor número de inventarios que, al igual que la fase 0, no se limita su capacidad para mantenerlo.

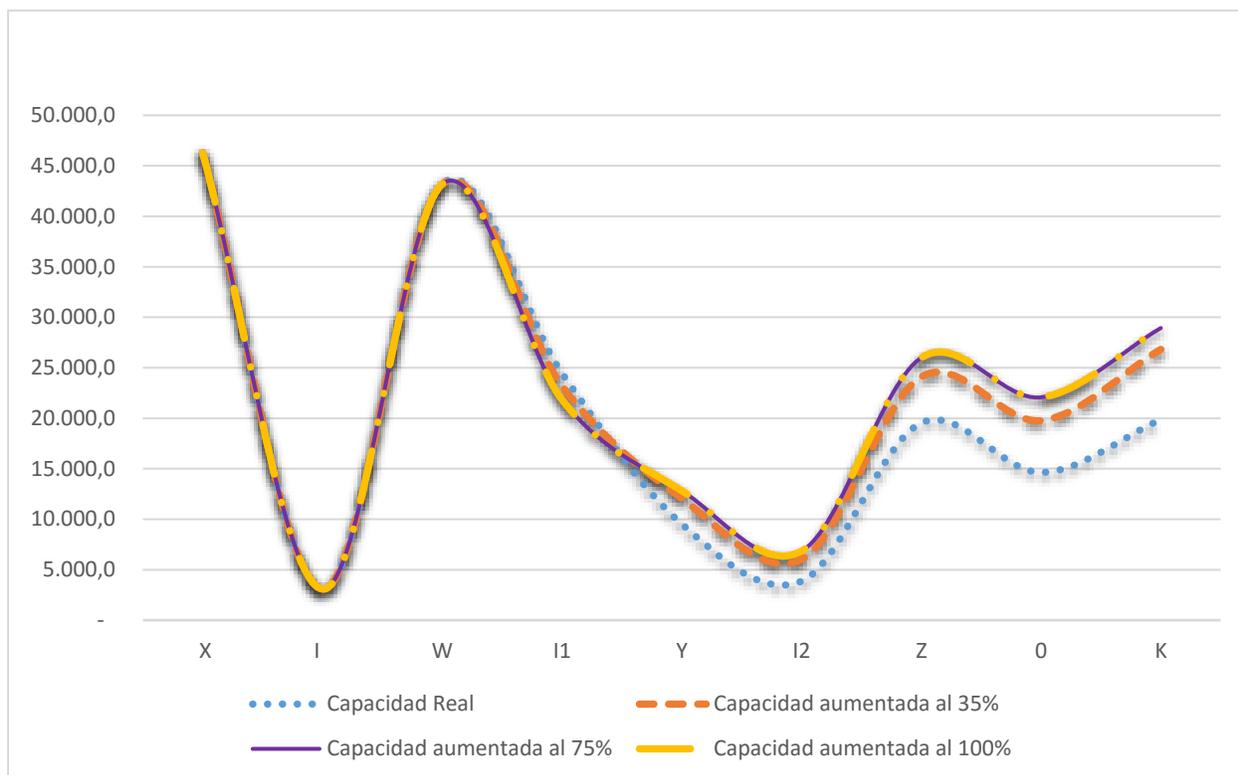
Con respecto a la variable de transporte Y, este aumenta a medida que la capacidad aumenta, al igual que el inventario que se da al inicio de la plataforma 4, I2, aumenta paulatinamente con la capacidad del recurso restricción.

Con respecto a las variables que interactúan en la fase de producción, la variable Z también aumenta, sin embargo, se puede notar que en el aumento de la capacidad del 100% queda igual que el escenario donde se aumentó el 75%, esto quiere decir que estando en el 75%, este recurso llegó a su capacidad máxima convirtiéndose así en el nuevo cuello de botella del sistema.

La variable O, la cual es el recurso restrictivo, al aumentar su capacidad, aumenta la cantidad de toneladas procesadas, en el escenario del aumento del 100% se limita debido a que en este caso, el recurso Z pasa a ser el nuevo recurso restrictivo por lo tanto está limitado por este. El mismo caso sucede con la variable K la cual aumenta para los escenarios del 35% y 70% pero queda igual en el escenario del 100% debido al nuevo cuello de botella.

En la siguiente imagen, podemos observar el comportamiento de las variables en los diferentes escenarios presentados.

Figura 33. Aumento de la Capacidad del Recurso Restricción

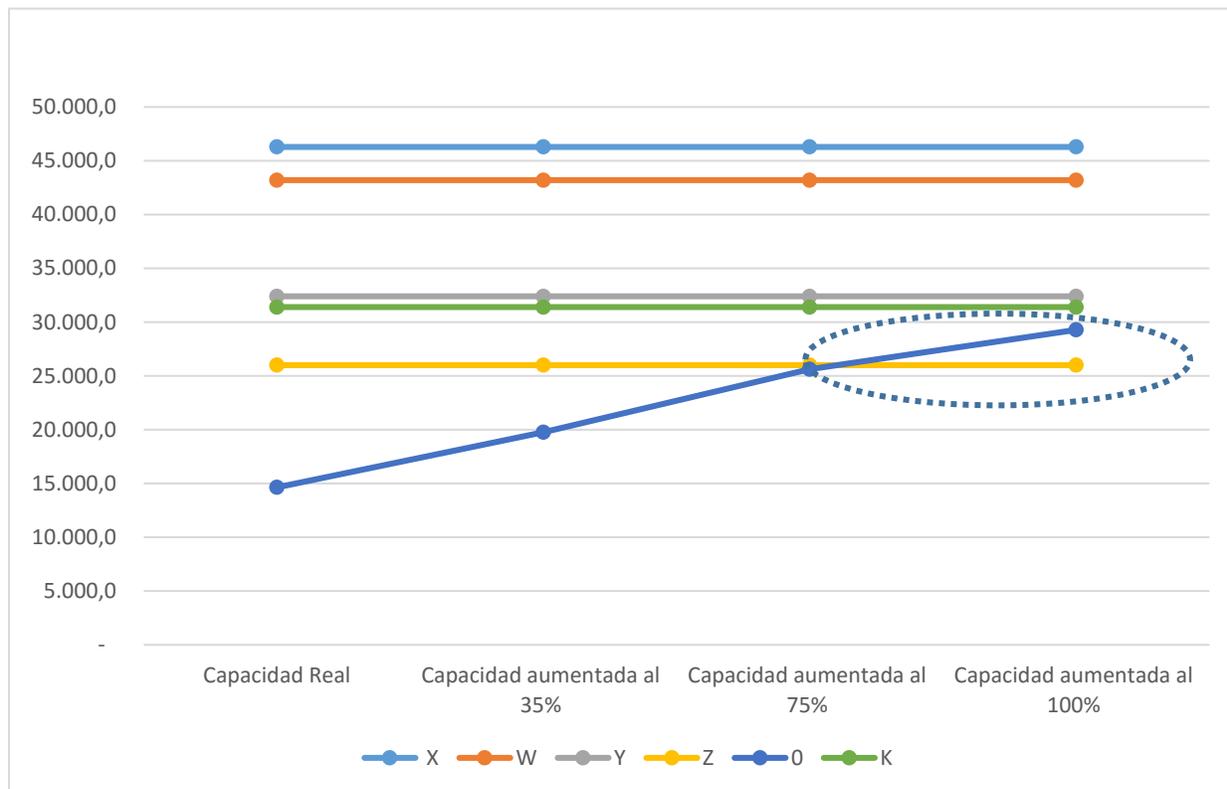


Fuente: elaboración propia

En la figura 33 se puede observar que hubo cambios significativos en cada una de las variables a las cuales se les asocia la cantidad de toneladas procesadas en cada fase al aumentar la capacidad al 35% y 70%, sin embargo, al aumentar la capacidad al 100% se mantiene igual que si se aumentara al 75% puesto que en este escenario, ahora hay un nuevo recurso restrictivo que sería la variable Z el cual llega a su capacidad máxima.

En la figura 34 se puede observar de una manera más clara como la variable Z, Plataforma 4, se convierte en el nuevo recurso restrictivo al llegar a su tope máximo de utilización en el escenario del 75% lo que significa que en el escenario del 100% a pesar que la capacidad de O aumenta, la producción se mantiene limitada a Z, nuevo cuello de botella.

Figura 34. Comportamiento de las Variables al Modificar la Capacidad del Recurso Restrictivo



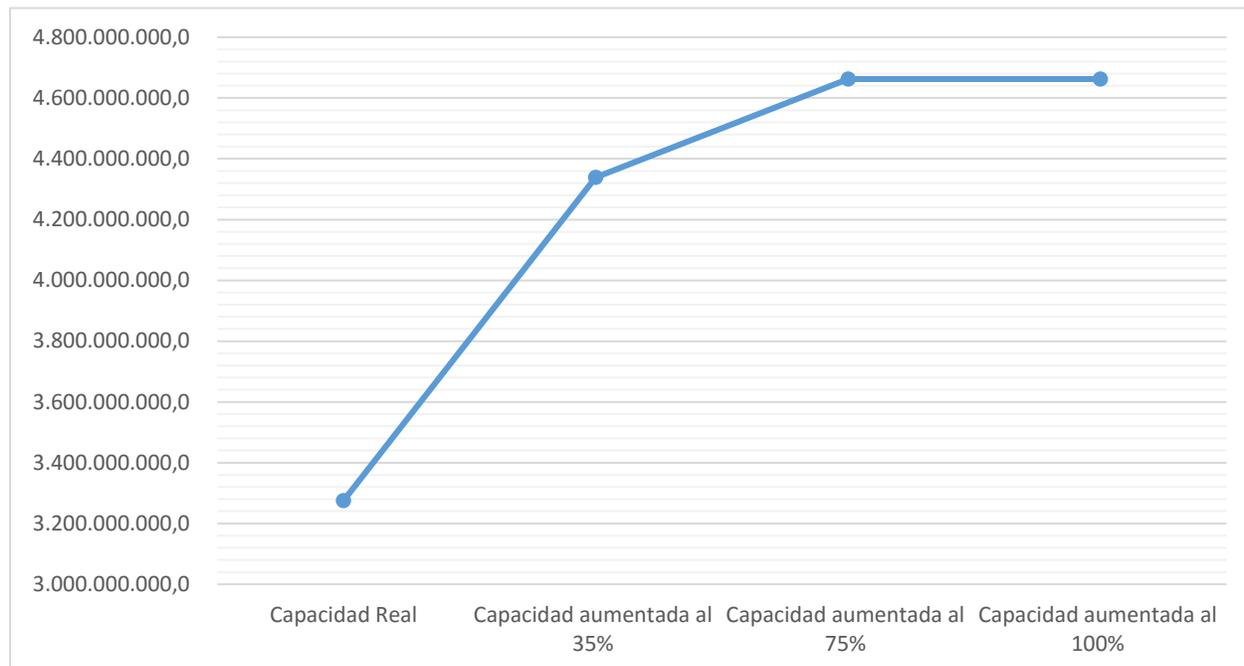
Fuente: elaboración propia

Con respecto a la función objetivo, esta tuvo una variación positiva al aumentar la capacidad, manteniéndose en los dos últimos escenarios

Tabla 41. Comportamiento de la Función Objetivo

| capacidad | FUNCION OBJETIVO |
|-----------------------------|--------------------|
| | FO |
| Capacidad Real | \$ 3.274.932.743,5 |
| Capacidad aumentada al 35% | \$ 4.339.200.222,4 |
| Capacidad aumentada al 75% | \$ 4.662.375.851,5 |
| Capacidad aumentada al 100% | \$ 4.662.375.851,5 |

Fuente: elaboración propia

Figura 35. Comportamiento la Función Objetivo

Fuente: elaboración propia

Las ganancias de la empresa aumentan con la variación de la capacidad pasando de 3'274.932.743,5 a 4'339.200.222 siendo este un 32,5% adicional a los datos actuales del modelo, para el escenario 2, la función objetivo aumenta un 42,3% y en el escenario 3 se mantiene igual que el escenario 2.

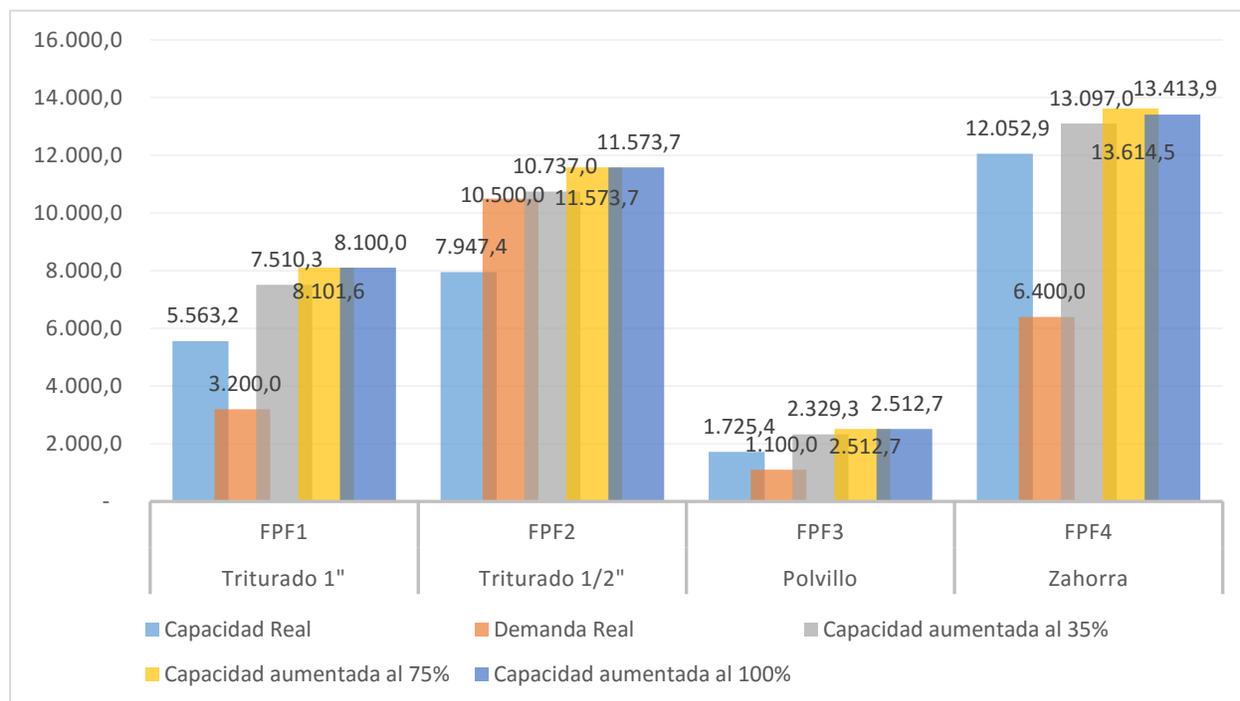
Tabla 42. Comportamiento de los Productos Finales

| | Triturado 1" | Triturado 1/2" | Polvillo | Zahorra |
|------------------------------------|--------------|----------------|----------|----------|
| | FPF1 | FPF2 | FPF3 | FPF4 |
| Capacidad Real | 5.563,2 | 7.947,4 | 1.725,4 | 12.052,9 |
| Demanda Real | 3.200,0 | 10.500,0 | 1.100,0 | 6.400,0 |
| Capacidad aumentada al 35% | 7.510,3 | 10.737,0 | 2.329,3 | 13.097,0 |
| Capacidad aumentada al 75% | 8.101,6 | 11.573,7 | 2.512,7 | 13.614,5 |
| Capacidad aumentada al 100% | 8.100,0 | 11.573,7 | 2.512,7 | 13.413,9 |

Fuente: elaboración propia

Con respecto a los productos, en la figura 36 se observa que en todos los escenarios, la demanda de los productos, 1, 3 y 4 se cubren sin inconvenientes, de hecho, queda en inventario una cantidad considerable, sin embargo, en el producto 2, con la capacidad real no se cubre la demanda, en el escenario de la capacidad aumentada al 35%, esta se logra cubrir la demanda del Triturado de 1/2" quedando un inventario inferior al de los demás productos. Para los siguientes escenarios, 70% y 100%, la producción del producto 2 aumenta, sin embargo, se debe tener en cuenta que ya con el aumento del 35% se está cubriendo la demanda.

Figura 36. Comportamiento de los Productos Variando la Capacidad del Recurso Restricción



Fuente: elaboración propia

Los costos que acarrearían el aumento de la capacidad del recurso restrictivo se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 43. Costos Aumento de la Capacidad del Recurso Restricitivo

| Capacidad | Costo Aumento de la Capacidad US |
|-----------------------------|----------------------------------|
| Capacidad aumentada al 35% | \$ 140.000 |
| Capacidad aumentada al 75% | \$ 300.000 |
| Capacidad aumentada al 100% | \$ 400.000 |

Fuente: elaboración propia

Teniendo en cuenta los datos de costos, se considera aumentar la capacidad del recurso restricción en un 35% pues de esta manera se cubre la demanda y no se hace necesario incurrir en inversiones mayores pues aumentaría el inventario de producto terminado.

Se calcula el retorno a la inversión ROI

$$ROI = \frac{3'274.932743,6 - 420'000.000}{420.000.000}$$

$$ROI = 6,8$$

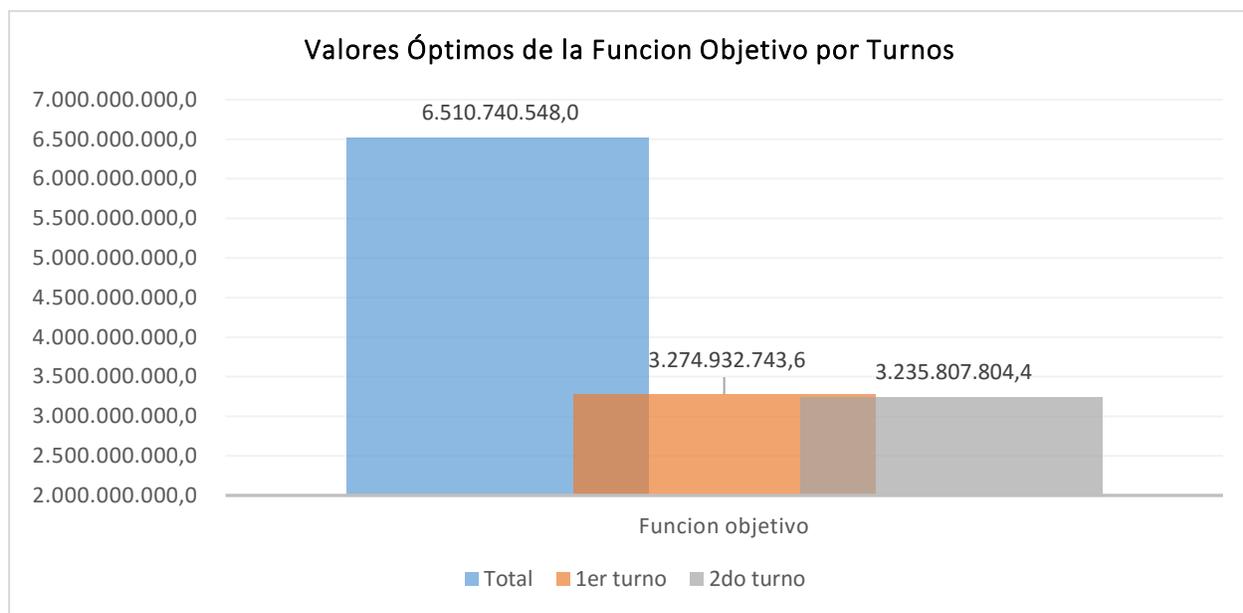
Este valor indica la efectividad de una inversión, en este caso, el valor revela que por cada peso que se invierte en esta opción, se obtuvieron 6,8 de regreso.

Con base en esta información, se determina que esta medida de rendimiento valora la eficacia de una inversión en el caso de este escenario, se considera una opción muy viable para Cimaco gracias al alto beneficio que tendría si se invierte en el aumento de la capacidad del recurso restrictivo.

5.3.2. Escenario 2. Incremento de 1 turno. Como se ha mencionado en capítulos anteriores, Cimaco maneja un solo turno al día de 8 horas. En este segundo escenario, se aumentarían los turnos diarios en Cimaco, pasar de 1 solo turno a 2 de 8 horas cada uno, lo que significa que en total se trabajarían 16 horas diarias. Para el desarrollo de este modelo, se tiene en cuenta que los costos de producción del segundo turno aumentan un 30% debido a las horas nocturnas laboradas por trabajadores.

Manejando el supuesto de que todos los productos se venden, la función objetivo encuentra un valor óptimo de 6'510.740.548,0 de los cuales 3'274.932.743,6 corresponden al primer turno, valor arrojado en el análisis del modelo principal, y 3'235.807.804,4 al segundo turno. A continuación, se presentan los valores óptimos de la función objetivo por cada turno y el total.

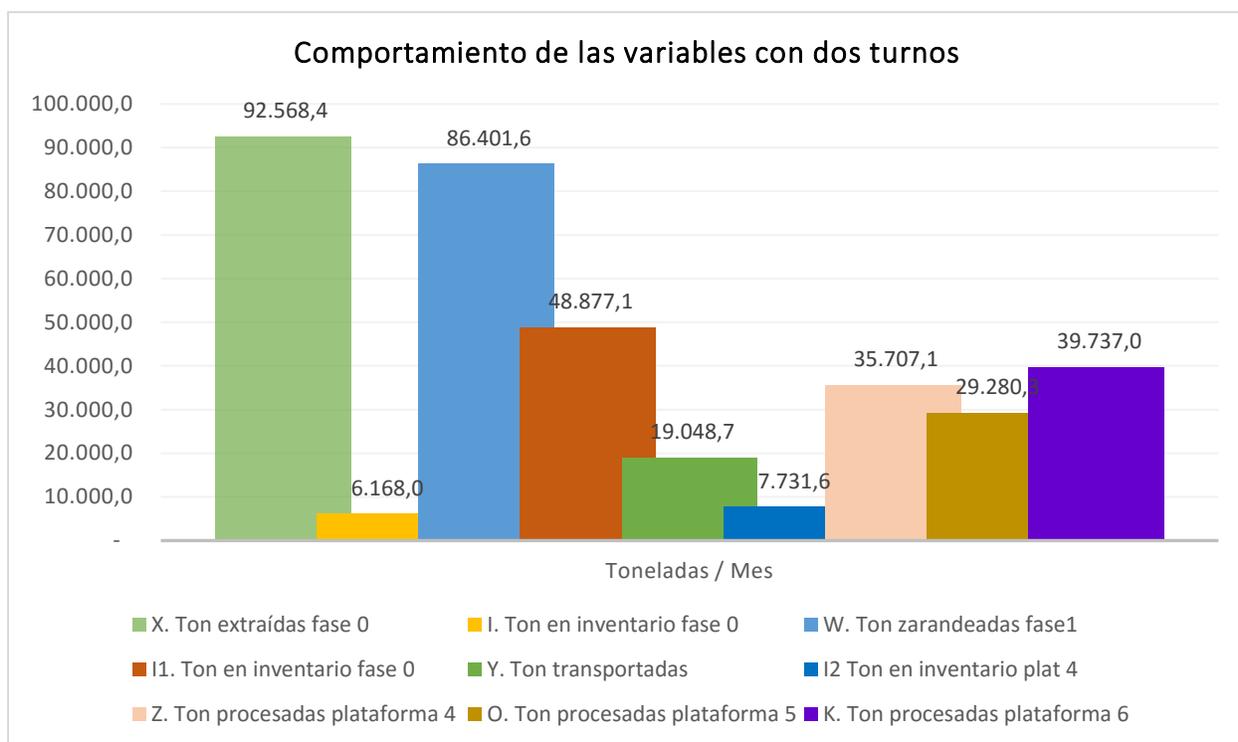
Figura 37. Óptimos Arrojados por el Modelo



Fuente: elaboración propia

Con relación a las variables que hacen parte del proceso productivo de Cimaco, estas adoptan los mismos valores del primer turno, es decir, se maneja la misma cantidad de material procesados por fases, la figura 38 presenta el comportamiento en el modelo total.

Figura 38. Valores Óptimos de las Variables con Dos Turnos

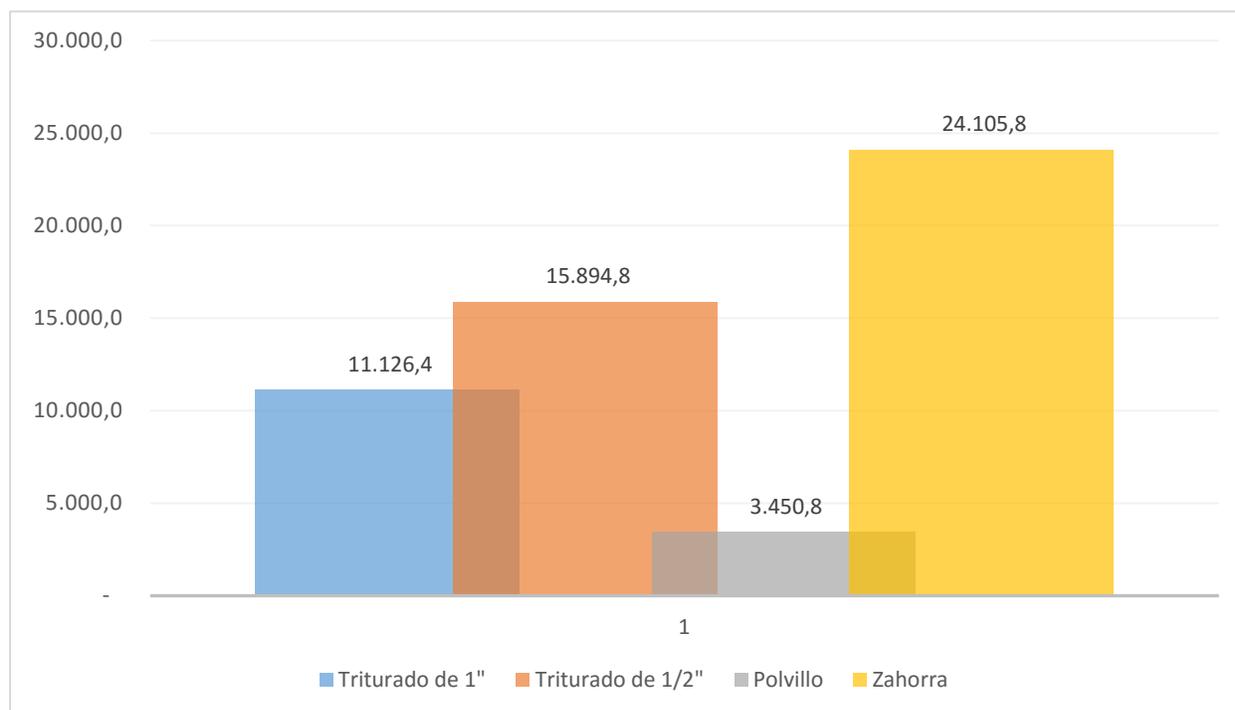


Fuente: elaboración propia

Las variables X y W, cantidades extraídas en la fase 0 y cantidad de material zarandeado respectivamente, utilizan su capacidad al 100% gracias a la disponibilidad para mantener inventario en las plataformas lo que significa que en estas dos fases se maneja una cantidad lista y disponible para la siguiente.

Las variables Z y K, cantidades procesadas en las plataformas 4 y 6 respectivamente, utilizan su capacidad sujeta a la variable O, cantidad procesada en la plataforma 5, que continua siendo el recurso con menor capacidad dentro de la línea de producción, sin embargo, como la capacidad aumenta, se fabrican un mayor número de productos. En la figura 39 se presentan la cantidad de productos terminados que se manejan en los dos turnos.

Figura 39. Cantidad total de Productos Fabricadas con Dos Turnos

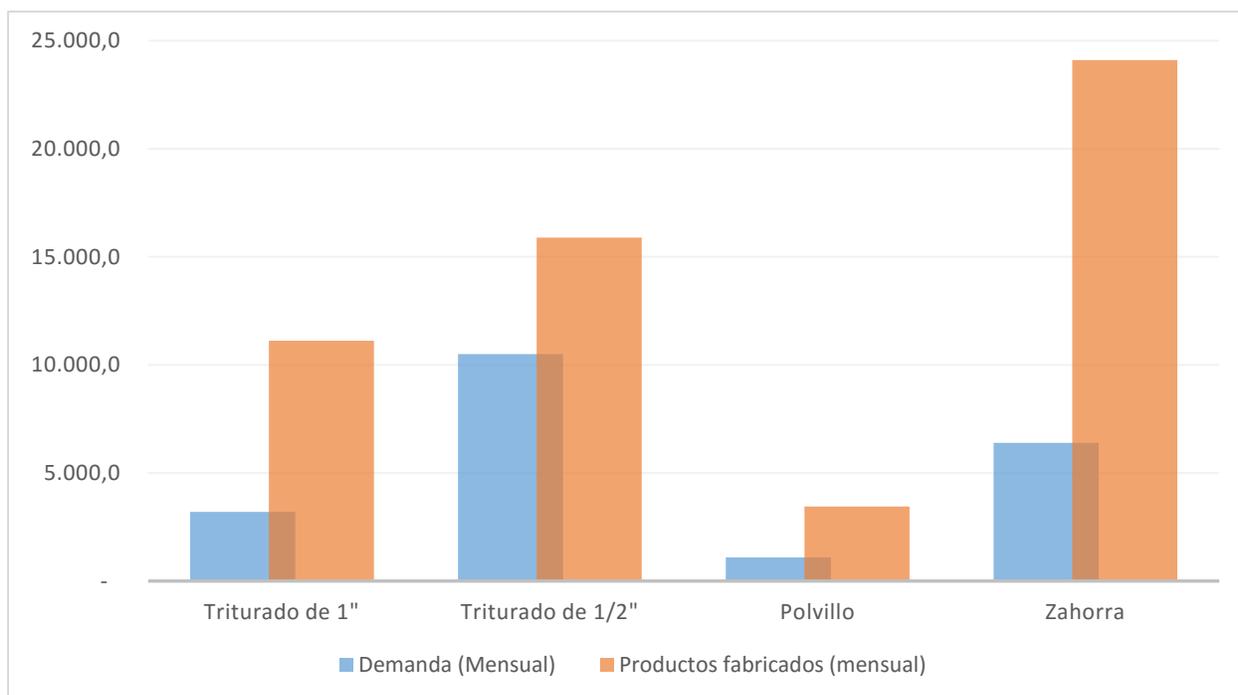


Fuente: elaboración propia

Con respecto a los productos terminados, para el caso del Triturado de 1" se maneja un total producido de 11.126,4 toneladas, el Triturado de 1/2" maneja un total de 15.895 toneladas, el polvillo, 3.451 toneladas y Zahorra 24.106 toneladas mensuales.

En la siguiente gráfica, se observa la relación que se tiene con respecto a la demanda de cada producto vs la cantidad producida con el aumento de turno.

Figura 40. Comportamiento de la Demanda y la Producción con Aumento de Turnos.



Fuente: elaboración propia

Si se aumenta a 2 turnos, Cimaco tendría la capacidad de cubrir la demanda y manejar un inventario del triturado de 1/2" que normalmente, mantiene una alta demanda y Cimaco no puede cubrirla. Con respecto a los demás productos, aumentaría el inventario de productos terminados, lo que significa que, aumenta el riesgo de pérdidas por obsolescencia de material.

5.3.3. Escenario 3: Cambio de la configuración de la línea de producción. Una de las opciones que ofrece la cantera es realizar un cambio en la configuración para obtener un poco más de un producto que de otro, en este caso el triturado de 1/2" que es el más comercial. La línea de producción de Cimaco, solo ofrece dos escenarios para el cambio de configuración, el que normalmente se encuentra operando y uno adicional que supone es más efectivo para obtener más del producto 2.

El cambio de configuración, considera una alteración de las mallas de la línea de producción de manera que pueda clasificar un producto más que de otro.

Se realizó el cambio en el modelo de programación lineal con respecto a los porcentajes de recuperación que ofrece el cambio de mallas y los resultados del primer periodo se presentan en la tabla a continuación.

Tabla 44 . Resultados Escenario 2. Cambio en la Configuración de la Línea de Producción.

| Escenarios | FASE 0 | | FASE 1 | | | FASE DE PRODUCCIÓN | | | |
|------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | Extracción | Inventario Fase 0 | Zarandeo | Inventario | Transporte | Inventario | Plataforma 4 | Plataforma 5 | Plataforma 6 |
| | Toneladas Extraídas | Toneladas Inventario Fase 0 | Toneladas Zarandeadas | Toneladas Inventario Fase 1 | Toneladas Transportadas | Toneladas Inventario Plat 4 | Toneladas Procesadas | Toneladas Procesadas | Toneladas Procesadas |
| | X | I | W | I1 | Y | I2 | Z | O | K |
| Nuevo | 46.284,00 | 3.084,00 | 43.200,00 | 2.350,40 | 24.299,70 | 14.546,40 | 17.853,50 | 14.639,70 | 19.868,50 |
| Actual | 46.284,00 | 3.084,00 | 43.200,00 | 24.439,30 | 9523,6 | 3865,8 | 17.853,50 | 14.640 | 19.868,50 |

Fuente: Elaboración propia

Lo primero que se identifica en este escenario es la disminución de la función objetivo la cual disminuye de 3'274.932.743,5 a 2'350.887.641,6 es decir 924.045.101,9 lo que se considera un cambio muy marcado. Inmediatamente podemos decir que este escenario no se considera como una opción puesto que el objetivo de la empresa es maximizar su utilidad y si esta baja, por ende queda descartado. Sin embargo, se analizará el comportamiento de las variables y de los productos finales.

Con respecto a la variable de la cantidad de material extraído de las terrazas permanece igual siendo explotada en un 100%.

La variable que tiene en cuenta la cantidad de material procesado en la fase 1, varían las cantidades de los niveles, sin embargo, permanece siendo explotado un 100%.

La variable relacionada con el transporte aumenta utilizando más porcentaje de su capacidad pasando a transportar 14,300 desde la fase 1 a la plataforma 4 lo que equivale a un 75% de utilización de su capacidad. Las plataformas 4, 5 y 6 permanecen iguales en cantidad de unidades procesadas en cada una, variando el nivel de donde proviene el material.

Con respecto a los productos finales, se tiene que el triturado de ½" aumentó lo que se considera satisfactorio, sin embargo, no se considera conveniente puesto que así como aumenta el producto 2, disminuye el producto 1 y este es el segundo producto que mayor valor le genera a la empresa, además, los productos 3 y 4 aumentan incrementando así su inventario. Por los precios de ventas que se manejan en el mercado y la demanda que se da para los productos se considera que no es conveniente llevar a

cabo la configuración de la línea de producción puesto que esto, llevaría a pérdidas por obsolescencia de material.

Tabla 45. Cantidades de Productos Finales de Cimaco en el Escenario 2.

| FASE DE PRODUCCIÓN | | |
|---|-------------------|-----------------|
| PLATAFORMA 5 | | |
| VARIABLES FPF1, FPF2, FPF3 Y FPF4 | | |
| Productos finales | | |
| | Productos | Totales |
| FPF1 | Triturado de 1" | 3.576,4 |
| FPF2 | Triturado de 1/2" | 8.941,0 |
| FPF3 | Polvillo | 2.718,8 |
| FPF4 | Zahorra | 11.926,8 |
| Total toneladas de productos por mes | | 27.163,0 |

Fuente: Elaboración propia

5.4. Análisis del modelo incluyendo demanda

En el modelo original, se tiene como supuesto que todos los productos se venden gracias al auge que está teniendo la construcción en el departamento de bolívar.

Este escenario, abarcará un cambio en el modelo, adicionándole demanda, costos por mantener los inventarios de productos finales lo que daría respuesta a uno de los problemas marcados de Cimaco, las pérdidas por obsolescencia de material.

El modelo considera los faltantes que suponen una venta perdida, este valor no genera un impacto en la FO pero si en el mercado siendo un costo difícil de calcular pero se ve reflejado en pérdidas de clientes, falta de credibilidad, afectando el buen nombre de la empresa. Así mismo, el modelo manejará los costos de inventarios de productos finales teniendo en cuenta las pérdidas por obsolescencia de material.

A continuación, se presentan las variables incluidas en el modelo.

Variables

$IFPF1_p =$ *Inventario final del producto 1 – Triturado de 1” en el periodo p*

$IFPF2_p =$ *Inventario final del producto 2 – Triturado de ½” en el periodo p*

$IFPF3_p =$ *Inventario final del producto 3 – Polvillo en el periodo p*

$IFPF4_p =$ *Inventario final del producto 4 – Zahorra en el periodo p*

$FAL1_p =$ *Faltantes de producto 1 – Triturado de 1” en el periodo p*

$FAL2_p =$ *Faltantes de producto 2 – Triturado de ½” en el periodo p*

$FAL3_p =$ *Faltantes de producto 3 – Polvillo en el periodo p*

$FAL4_p =$ *Faltantes de producto 4 – Zahorra en el periodo p*

Adicionalmente, los siguientes parámetros:

$Demp1_p =$ *Demanda del producto 1 – Triturado de 1” en el periodo p*

$Demp2_p =$ *Demanda del producto 2 – Triturado de ½” en el periodo p*

$Demp3_p =$ *Demanda del producto 3 – Polvillo en el periodo p*

$Demp4_p =$ *Demanda del producto 4 – Zahorra en el periodo p*

Se le incluyeron las siguientes restricciones:

Inventario de producto final 1 – Triturado de 1”

Esta restricción indica que el inventario del producto final 1 está determinada por el inventario inicial del producto 1 más lo que se produce en el periodo más el faltante de ese producto menos la demanda.

$$IFPF1_p = IFPF1ZERO + FPF1_p + FAL1_p - Demp1_p$$

Inventario de producto final 1 – Triturado de ½”

Esta restricción indica que el inventario del producto final 2 está determinada por el inventario inicial del producto 2 más lo que se produce en el periodo más el faltante de ese producto menos la demanda.

$$IFPF2_p = IFPF2ZERO + FPF2_p + FAL2_p - Demp2_p$$

Inventario de producto final 1 – Polvillo

Esta restricción indica que el inventario del producto final 3 está determinada por el inventario inicial del producto 3 más lo que se produce en el periodo más el faltante de ese producto menos la demanda.

$$IFPF3_p = IFPF3ZERO + FPF3_p + FAL3_p - Demp3_p$$

Inventario de producto final 1 – Zahorra

Esta restricción indica que el inventario del producto final 4 está determinada por el inventario inicial del producto 4 más lo que se produce en el periodo más el faltante de ese producto menos la demanda.

$$IFPF4_p = IFPF4ZERO + FPF4_p + FAL4_p - Demp4_p$$

Demandas

Los valores de la demanda que se utilizaron se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 46. Demanda Semanal Productos de Cimaco

| | Demanda (Toneladas / Semana) |
|--------------------------|---|
| Triturado de 1" | 750 |
| Triturado de 1/2" | 2.500 |
| Polvillo | 250 |
| Zahorra | 1.500 |

Fuente: Elaboración propia. Tomada de la demanda del Mercado.

Los resultados obtenidos por el modelo se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 47. Resultados del Modelo Incluyéndole Demanda e Inventarios de Productos Finales

| Producto | Demanda x semana | Productos fabricados | | | | Faltantes de Productos | | | | Inventarios de Productos | | | |
|-------------------|---------------------|----------------------|---------|---------|---------|------------------------|---------|---------|-------|--------------------------|----|----|---------|
| | | P1 | P2 | P3 | P4 | P1 | P2 | P3 | P4 | P1 | P2 | P3 | P4 |
| Triturado de 1" | 750,0 | 1.390,8 | 750,0 | 750,0 | 1.299,2 | - | - | - | - | 640,8 | - | - | 549,2 |
| Triturado de 1/2" | 2.500,0 | 1.986,9 | 1.071,4 | 1.071,4 | 1.846,2 | 513,1 | 1.428,6 | 1.428,6 | 663,8 | - | - | - | - |
| Polvillo | 250,0 | 431,4 | 232,6 | 232,6 | 5.188,3 | - | 17,4 | 17,4 | - | 181,4 | - | - | 268,3 |
| Zahorra | 1.500,0 | 2.231,0 | 1.500,0 | 1.500,0 | 3.089,1 | - | - | - | - | 731,0 | - | - | 1.589,1 |

Fuente: Elaboración propia.

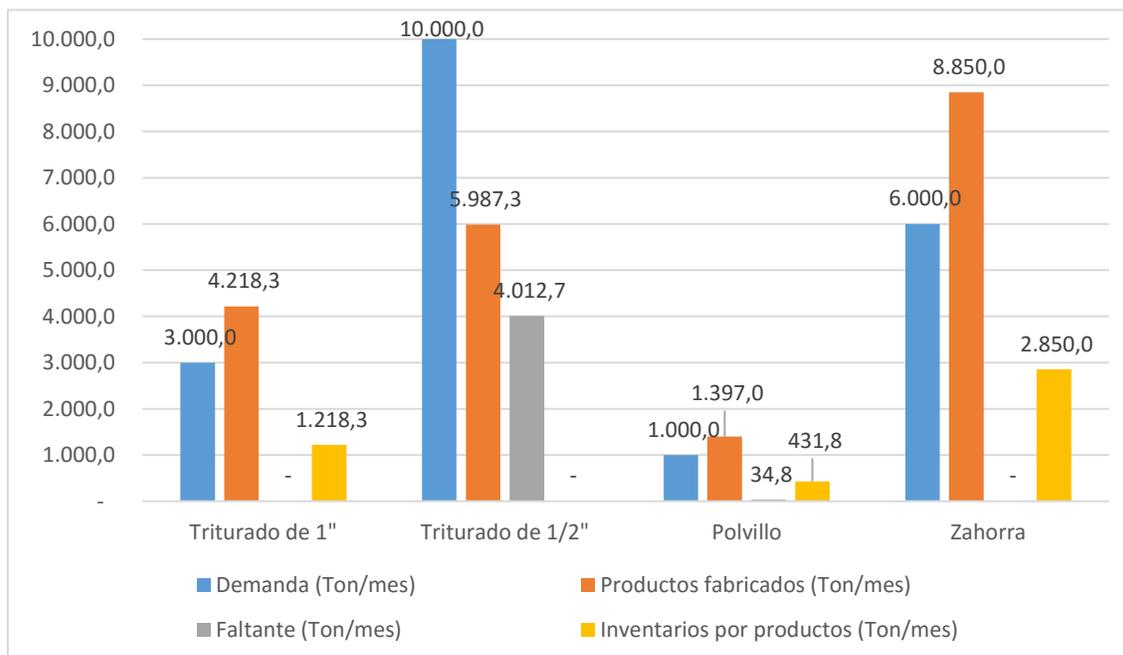
El modelo de programación lineal con demanda arroja un valor óptimo para la función objetivo de 1'524.059.405,9 puesto que este considera no vender todo lo que se produce sino cubrir la demanda de sus productos manejando un inventario de productos terminados.

El nuevo modelo de programación lineal determina, al igual que el anterior, la cantidad de productos fabricados de la gama con la que cuenta Cimaco, con esta información, se puede determinar que Cimaco no cumple con la demanda de su producto principal que es el triturado de 1/2" y por lo tanto, genera una cantidad de faltantes en cada periodo lo que a su vez, conlleva a que no se tengan productos terminados de esta clase en inventarios.

Adicionalmente, el producto final 3, polvillo, cumple con la demanda el primer periodo, sin embargo, el modelo muestra que no lo hace para los periodos 2 y 3 pues su producción no llega a la cantidad requerida. Se debe tener en cuenta, que las a pesar que muestra faltante de unas pocas toneladas, hay que tener en cuenta las que quedan en inventario en el periodo anterior pues con esta cantidad disponible, se puede completar la demanda de este producto para los periodos mencionados.

Para el caso de los productos 1 y 4, triturado de 1" y zahorra, por el contrario, no genera ningún faltante y si inventarios. En la siguiente gráfica, se observa el comportamiento global del modelo en términos de demanda, productos fabricados, faltantes e inventarios de productos finales.

Figura 41. Comportamiento de los Productos Finales en el Nuevo Modelo con Demanda



Fuente: Elaboración propia

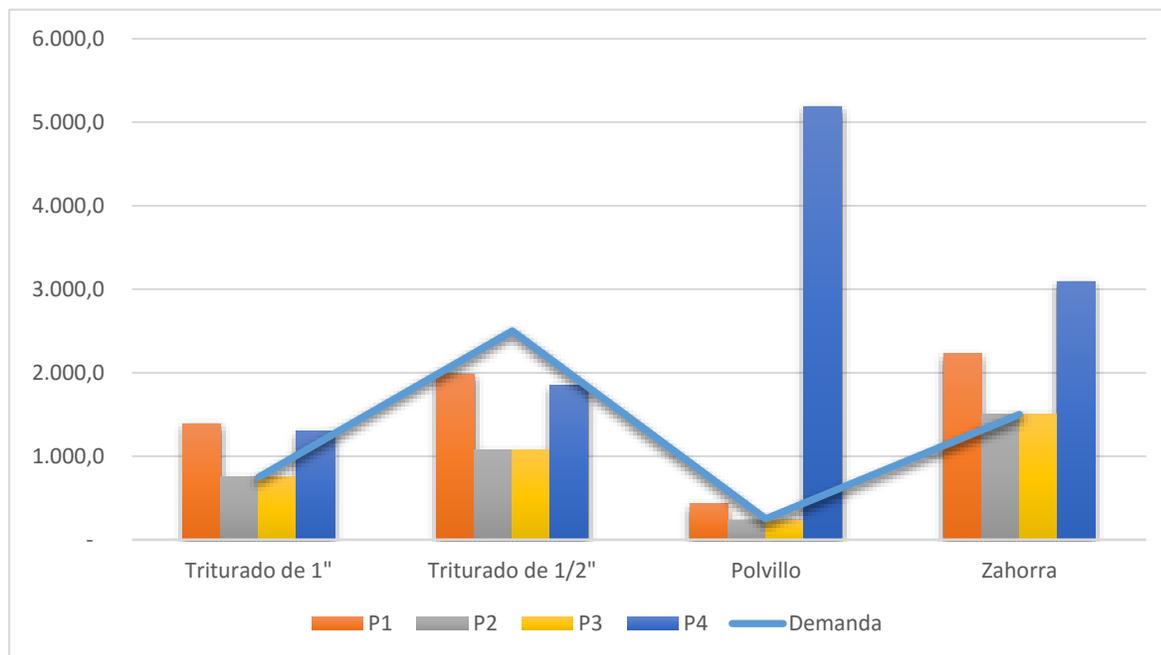
Actualmente, Cimaco no cubre la demanda total del producto que genera mayor valor en el negocio que es el mismo que genera mayor Throughput, triturado de 1/2". Por lo general los clientes que desean adquirir grandes cantidades de este producto deben pedirlo con mucho tiempo de anticipación de manera que en la medida que se produzca en mayor cantidad de días, estas clases de pedidos se puedan cumplir, sin embargo, esta condición es incierta pues muchas veces se tienen paradas inesperadas por mantenimiento y reparaciones lo que conlleva a no cumplir lo pactado con el cliente.

En la figura 41, se puede ver que la demanda de triturado es superior a la de las demás productos y la capacidad de producción está limitada por lo tanto no se cubre la demanda mensual lo que conlleva a que se genere un faltante de este productos. Con respecto a los demás productos, la demanda es inferior a la capacidad de la empresa.

Para profundizar un poco y analizar bien el comportamiento de la demanda con la producción actual de Cimaco, se generó la figura 42 donde muestra a través de las barras la cantidad producida de los productos de Cimaco, mientras que la línea, muestra cual es la demanda de estos. Esta figura, corrobora que la demanda del producto 2 no se cubre, mientras que la demanda de los productos restantes se cubre y se genera un inventario considerable.

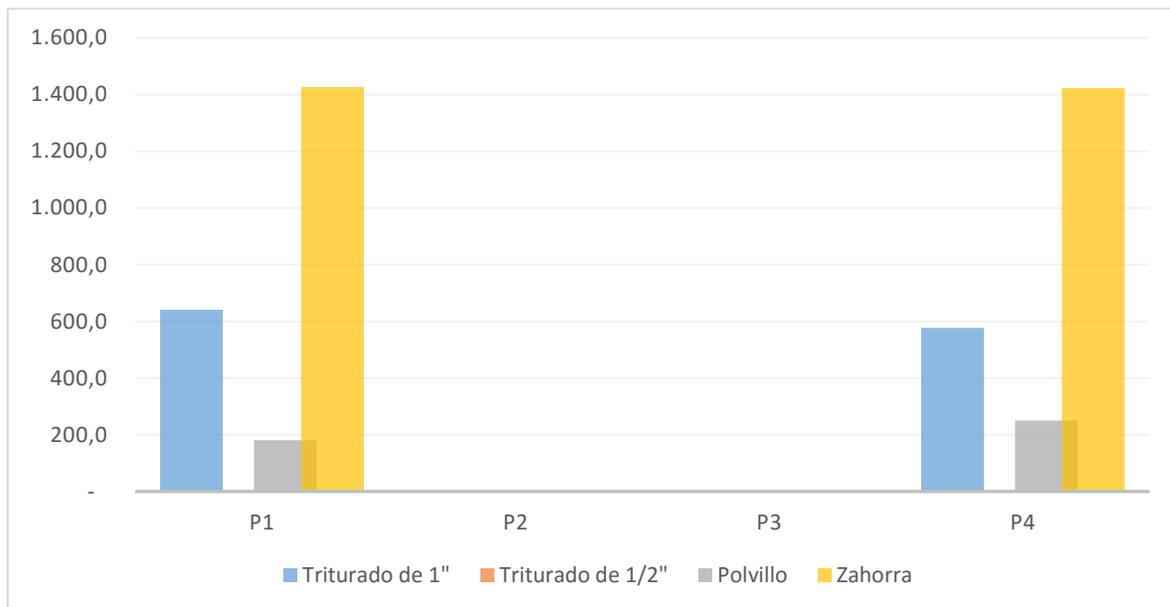
Actualmente Cimaco está teniendo pérdidas aproximadas por más de \$50.000.000 por los inventarios de productos, los cuales, al estar en un espacio a cielo abierto, se encuentran en una situación climática incierta enfrentándose a posibles pérdidas por obsolescencia de material, tal como se había mencionado antes, es decir, por lluvias y/o fuertes vientos.

Figura 42. Comportamiento de la Demanda vs Producción

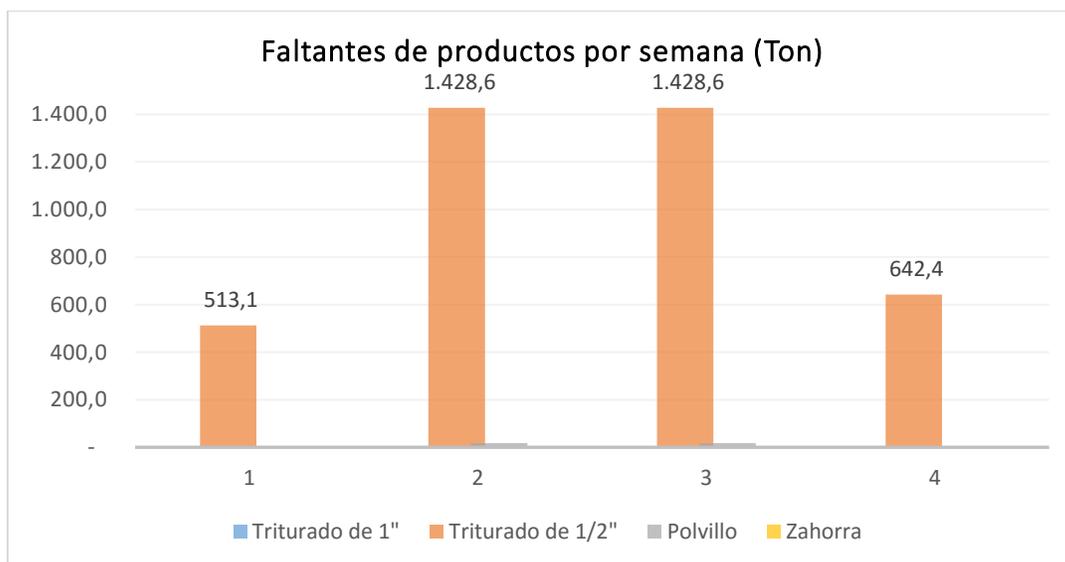


Fuente: Elaboración propia

En las figuras 43 y 44 se observan los resultados del modelo con respecto a los inventarios que se manejan y los faltantes, como estrategia para manejar los inventarios, se propone disponer de un plan de mercadeo que permita llegar a los clientes potenciales y se logre vender los productos donde queda mayor inventario. Otra opción para evitar estas pérdidas sería la construcción de SILOS para evitar pérdidas de productos terminados.

Figura 43. Inventarios de Productos Semanal

Fuente: Elaboración propia

Figura 44. Faltantes de Productos

Fuente: Elaboración propia

Luego de la identificación del cuello de botella del sistema productivo de Cimaco y después de realizar los cambios necesarios para generar los diferentes escenarios, es importante resaltar que su explotación se hace obligatoria para encontrar alternativas que permitan cubrir la demanda y generar un valor agregado en el cumplimiento de la meta de Cimaco. Para esto, este trabajo de grado, le ofrece a la empresa en estudio, una serie de posibilidades las cuales deben ser estudiadas por la gerencia de manera que las evalúe y escoja la más conveniente para su caso.

Al realizar el análisis de los escenarios, se puede identificar como el más conveniente el contexto donde se aumente la capacidad del recurso restrictivo en un 35% en el que el modelo encuentra óptimos los valores de cada una de las variables y maximiza su función objetivo pasando de 3'274.932.743,5 a 4'339.200.222 como ganancia para la empresa lo que equivale a un 33% aproximadamente en aumento de sus utilidades.

Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

El diseño de un modelo que permitiera planificar la producción de Cimaco, era una necesidad inminente, debido a que actualmente, se encuentra pasando por dificultades que no le permiten establecerse como una empresa más rentable teniendo la posibilidad de serlo. La falta de organización y de planeación, limitan el alcance de la meta de cualquier compañía, producir dinero ahora y en el futuro.

En la indagación de las diferentes metodologías y enfoques que nos presenta la administración y gestión de la producción y operaciones, se escogió la teoría de las restricciones gracias a su enfoque de lógica de la causa y efecto proponiendo encontrar soluciones a través de herramienta de pensamientos lo cual permite de una manera particular, eliminar conflictos que se presentan en los ambientes de manufactura para la obtención de beneficios paralelos y de forma global entendiendo así que un óptimo local no garantiza el óptimo global.

Debido a que la teoría de las restricciones tiene muchos detractores por la falta de soporte matemático, se tomó la programación lineal como base para poder realizar una comparación de los modelos, siendo este último el modelo cuantitativo de programación lineal desarrollado por el software GAMS y el modelo cualitativo, desarrollado a través de la teoría de las restricciones. Además, la Programación Lineal se usó como herramienta para un análisis de sensibilidad donde permitió realizar cambios al modelo principal con el fin de crear escenarios para su posterior análisis.

La aplicación de estas dos metodologías, permite la detección de ineficiencias a la hora de gestionar los recursos restrictivos que se encuentran en los sistemas de producción lo que permite garantizar una efectiva toma de decisiones adoptando practicas adecuadas en el manejo de las operaciones de una empresa, razón por la cual muchas compañías ve disminuidas sus utilidades y aumento de sus cotos operacionales.

Este trabajo de grado, explora como la empresa Cimaco, logra el diseño de estrategias de optimización por medio de los resultados de la gestión de la restricción y el análisis de sensibilidad lo que a su vez, arrojaron beneficios financieros para la empresa tal como muestran los resultados del modelo de PL, pasando por la caracterización de sus procesos como primera medida para conocer el desarrollo óptimo de ellos mediante la herramienta Value Stream Map lo que permitió tener más claro el desarrollo de su proceso actual.

Como aporte investigativo, se demostró que la Programación Lineal y la Teoría de las Restricciones tienen un objetivo planteado muy similar, dada su naturaleza de optimización, por lo que siempre buscaran las condiciones necesarias para que el recurso restrictivo logre su pico máximo en producción y por ende, la generación de dinero para las empresas.

Al realizar los análisis de los diferentes escenarios y las dos metodologías se evidencia el impacto positivo en el proceso productivo de Cimaco mediante la aplicación de los modelos, permitiendo establecer 3 contextos diferentes los cuales fueron analizados. El primero, permitió realizar diferentes cambios en la capacidad del recurso restrictivo obteniendo resultados evidentemente satisfactorios dando respuesta al problema de producción que maneja Cimaco actualmente, pasando de una utilidad de 3.274.932.743,5 a 4.339.200.222,4 permitiendo cumplir con la demanda del mercado. Los escenarios donde se aumenta aún más la capacidad del recurso restrictivo también son satisfactorios, sin embargo, no se consideran necesarios pues con el aumento del 35% se cubre la demanda del mercado y no se tiene la necesidad de incurrir en inversiones más grandes para el aumento de la capacidad. Se evidenció también que al aumentar la capacidad al más del 75%, el recurso restrictivo deja de serlo, pasando a ser la plataforma 4 el nuevo recurso restricción. El segundo escenario contempla incrementar un nuevo turno de 8 horas para cumplir con la demanda, la función objetivo se maximiza a casi el doble de la actual, sin embargo, a pesar que se cumple con la demanda, este escenario no se considera conveniente por el incremento de los inventarios de los demás productos ocasionando pérdidas por obsolescencia de material.

El escenario 3 contempló la demanda y costos por inventario teniendo en cuenta las condiciones en las que se almacenan estos productos disminuyendo considerablemente la utilidad pasando de 3'274.932.743,5 a 2'350.887.641,6 es decir 924.045.101,9 menos del modelo inicial. Después de realizar un análisis de cada uno, se concluye que el más conveniente para Cimaco es el aumento de la capacidad del recurso restrictivo en un 35% la cual maximiza su utilidad incrementando las ganancias en un 32% aproximadamente.

El ajuste del modelo busca mantener una configuración de manera que se cumpla con las normas de calidad que se exigen para esta clase de productos, esto es que no deben contener más del 1% del peso de material fino o polvillo por eso en los diferentes modelos evaluados se ajusta como por los diferentes niveles de las terrazas se considera un factor diferente de finos por los productos principales. Es importante aclarar en la medida en que la terraza sea explotada cambian las condiciones geológicas del suelo y por ende cambian los porcentajes de finos y de recuperación por cada producto.

Al aplicar el sistema DBR en Cimaco, se obtendrán beneficios en uno de los puntos con más preocupación dentro del sistema de producción y tiene que ver con el inventario pues se busca disminuir las pérdidas por obsolescencia de material, puesto que normalmente, en la fase 0 y fase 1 e inventario de productos terminados, permanece una cantidad considerable, por lo que, además de los costos de inventario que se manejan, la mayor pérdida que se tiene radica en que, como la minería se realiza a cielo abierto, el inventario queda expuesto a las condiciones climáticas inciertas, lo que produce muchas pérdidas en invierno, puesto que las lluvias, humedecen el material y por ende, este les cambia las características, sobre todo considerando que son materiales para construcción los cuales deben poseer ciertas propiedades puesto que el diseño de las mezclas se hacen basado en peso y si estos están húmedos no es confiable pues no se conocerá si el material se encuentra saturado por la cantidad de agua adicional.

Con la implementación de la TOC y del modelo DBR, se mantendrán controlados los inventarios de manera que se garantice que la línea de producción nunca pare, es decir, mantener los inventarios necesarios y no en grandes cantidades como normalmente maneja Cimaco. Esto permitirá que el sistema no genere grandes pérdidas por obsolescencia de material. Así mismo se trabajara de forma más organizada al priorizar las actividades evitando gastos energéticos excesivos.

La aplicación de los dos modelos ha sido beneficioso para la empresa puesto que se considera un punto de partida hacia la organización, planeación y programación de su producción de manera que se puedan establecer actividades que conlleven al alcance de la meta. El modelo de PL también permitió evidenciar que la metodología de producción puede llevar a una metodología PUSH pues se considera que la demanda es creciente. Esto gracias a que la construcción está en un auge importante y cada vez son más los proyectos de este tipo dentro de la ciudad.

Se evidenció también que la solución óptima del modelo de programación lineal tiende a considerar las ventas de todos los productos fabricados, esto debido a que la economía está creciendo por el lado de la construcción y el modelo de PL conlleva a que la función objetivo considere ganancias en más de 100 millones de pesos diarios. Sin embargo, en el escenario donde se ajusta la demanda, las utilidades se disminuyen aproximadamente a la tercera parte pues se contemplaron los costos de mantener el inventario de productos terminados teniendo en cuenta que la obsolescencia de material disminuye la calidad del mismo y en el tiempo también disminuye la posibilidad de quedarle bien al cliente al no entregarle productos de calidad.

Finalmente, es importante destacar, que si bien este estudio generó un gran aporte para la toma de decisiones de la empresa, aún existen oportunidades de mejora en los niveles operativos y tácticos pues se debe considerar que la empresa no satisface al

cliente puesto que no tiene la capacidad de cubrir la demanda generando retrasos en las entregas y un efecto látigo es decir, que la empresa se encarga de producir en un día lo que está debiéndole al cliente gracias a los grandes desajuste por la falta de capacidad. Esta situación, permitirá crear nuevos proyectos de investigación que generen nuevos beneficios al considerar los conceptos de retrasos y faltantes de periodos anteriores ya sea aumentando la capacidad o subcontratándola teniendo en cuenta en focalizarse en el recurso restrictivo pues el aumento de la capacidad en otro recurso, no aumenta la capacidad total del sistema pues este se encuentra ajustado a la restricción.

El ajuste del modelo busca mantener una configuración de manera que se cumpla con las normas de calidad que se exigen para esta clase de productos, esto es que no deben contener más del 1% de su peso de material fino o polvillo por eso en los diferentes modelos evaluados se evalúa como por los diferentes niveles de las terrazas este considera un factor diferente de finos por los productos principales.

Con respecto al análisis financiero y de acuerdo a los datos suministrados por la empresa, los cuales no fueron usados en términos exactos en este trabajo de grado por petición de confidencialidad de la empresa, los 3 años anteriores a esta tesis, 2015, 2014 y 2013, las ventas aumentaron un 17% aproximadamente.

Las materias primas representan en promedio un 35% del precio de venta, lo que significa que Cimaco opera con un excelente margen de Throughput que le permite cubrir sus gastos operativos y obtener cierto nivel de ganancia. No obstante, se considera que la empresa puede mejorar este valor obteniendo mayores utilidades si se organiza de tal manera que su producción sea planificada de acuerdo a las necesidades de la empresa tomando ventaja de su estructura organizacional.

El costo variable tiende a ser creciente, esto se debe al costo de insumos como combustible, aceites, piezas para reparaciones y mantenimiento, etc. Con un porcentaje de 7% en promedio del 2013 al 2014, y un valor del 7,4% del 2014 al 2015, teniendo en cuenta que el valor del barril del petróleo ha bajado, sin embargo, este fenómeno no se ha visto reflejado en nuestro país.

Los gastos operacionales manejan una tasa de crecimiento fluctuante, pues este valor depende, en gran medida, de los mantenimientos y reparaciones que se deben realizar a las grandes maquinarias que maneja la empresa pues son piezas costosas que no se consiguen fácilmente en el país sino que hay que importarlas. Del año 2013 al 2014, los gastos operacionales aumentaron un 14,8% obteniendo una tasa mayor del 2014 al 2015 con un porcentaje del 19,5%, esto debido a una reparación realizada a la línea de producción que permitió aumentar la capacidad en la plataforma 6. Así mismo, estos valores incluyen los gastos de nómina y administrativos concernientes al proceso de producción.

La utilidad o Throughput es positivo para todos los años presentando un crecimiento del 12% en el 2014 y un 13% en el 2015 gracias al aumento de las ventas y al auge de la construcción en el departamento de Bolívar.

El análisis financiero evidencia lo rentable del negocio, a pesar de no contar con técnicas de planificación ni programación de la producción, se soportan con ganancias, por lo tanto, se considera que al implementar alguna de las técnicas propuestas en este trabajo de grado, las utilidades aumentarán obteniendo resultados aún más favorables para la empresa permitiendo a la gerencia analizar, estudiar y escoger entre un abanico de opciones brindadas que lo lleven a una toma de decisiones para el mejoramiento de sus procesos, su productividad y por ende, de la empresa en general.

6.2. Recomendaciones

- Durante el desarrollo del presente trabajo, se evidencia una falta de cultura empresarial por parte de los trabajadores del nivel operativo, lo que puede estar afectando que estos no se comprometan a laborar conscientemente y esto se asocia a la falta de productividad. Se recomienda llevar a cabo un plan de cultura empresarial e incentivos de manera que los trabajadores se esmeren en cada uno de las actividades que realiza de manera que aumente la productividad.
- Se recomienda utilizar técnicas cuantitativas de pronóstico para conocer previamente la demanda con mayor exactitud.
- Se recomienda contratar a una persona de marketing que logre establecer un plan de mercadeo para la empresa así como que pueda llegar a los clientes potenciales sobre todo de los productos donde se maneja mayor inventario de productos terminado de manera que se puedan vender en mayor proporción y evitar pérdidas en el inventario.
- Para abarcar el tema de los inventarios, se considera evaluar la posibilidad de construir SILOS de almacenamientos de manera que se pueda resguardar el material que queda en inventario para evitar pérdidas.

Bibliografía

- Agudelo, L., & Escobar, J. (2010). Gestión por procesos. *Ed. Kimpres*, 237.
- Alvarado, J. (2011). El Análisis Post-Optimal en Programación Lineal Aplicada a la Agricultura. *Revista Reflexiones - Facultad de Ciencias Sociales - Universidad de Costa Rica*, 161-173.
- Amorim, V., & Seido, M. (2012). A review and evaluation on constructive heuristics to optimise product mix based on the Theory of Constraints. *International Journal of Production Research*, 5936-5948.
- Andersen, S., Guptab, M., & Gupta, A. (2013). A managerial decision-making web app: Goldratt's evaporating cloud. *International Journal of Production Research*, 2505–2517.
- Bakke, N. A., & Hellberg, R. (1991). Relevance lost? A critical discussion of different cost accounting principles in connection with decision making for both short and long term production scheduling. *International Journal of Production Economics*.
- Barráez, V., & Grimau, R. (2010). *Terminología del poder popular*. Caracas: Asamblea Nacional De La República Bolivariana De Venezuela.
- Bonilla, F. (2006). Diseño de un sistema de programación de producción basado en la teoría de las restricciones para la empresa Erboindustrias Cia. Ltda.
- Buffa, E. S. (1969). *Modern Production Management*.
- Cabrera. (2014). Planificación de la producción en una industria de consumo masivo utilizando la teoría de las restricciones.
- Cabrera, R. (2012). *Manual de Lean manufacturing*.
- Cabrera, R. (2014). VSM: Mapeo del Flujo de Valor. . En *EVSM: Extendido para Cadena de Suministro*. (pág. 116).
- Caicedo, Á. J., & Ortiz, V. K. (2014). Mezcla óptima de producción desde el enfoque gerencial de la contabilidad del throughput: el caso de una pequeña empresa de calzado. *Revistas Javeriana*.

- Calvachi, B., & Gonzalez, F. (2013). *Teoría de las restricciones (TOC): modelo de gestión gerencial para el crecimiento productivo de las pymes en Colombia. Caso aplicado a CIDMA S.A.S.* Bogotá, D.C.
- Cannon, J., Cannon, H., & Low, J. (2013). Modeling Tactical Product-Mix Decisions: A Theory-of-Constraints Approach. *Journal Simulation and Gaming*, 624-644.
- Coman, A., & Ronen, B. (2000). Production outsourcing: a linear programming model for the. Theory-Of-Constraints. *Taylor and Francis*, 1631—1639.
- Costas, J., Borja, P., de la Fuente, D., Pino, R., & Puche, J. (2014). Applying Goldratt's Theory of Constraints to reduce the Bullwhip Effect through agent-based modeling. *Polytechnic Institute of Viana do Castelo, Spain*.
- El tiempo. (2 de noviembre de 2015). *Construcción de viviendas moverá \$ 31,8 billones en el 2016*. Obtenido de <http://www.eltiempo.com/>
- Fredendall, L., & Lea, B. (1997). Improving the product mix heuristic in the theory of. *International Journal of Production Research*, 1535-1544.
- Glynn, M., & Lounsbury, M. (2005). From the critics' corner: logic blending, discursive change and authenticity in a cultural production system.
- Goldratt, E., & Cox, J. (1988). *La Meta*. Granica.
- Golmohammadi, D. (2014). A study of scheduling under the theory of constraints.
- Hernández, E. (2014). Propuesta de reducción del retraso de productos terminados en el área de producción de una empresa metalmecánica mediante la Teoría de las Restricciones y herramientas Lean.
- Hsu, T.-C., & Chung, S.-H. (1998). The TOC-based algorithm for solving product mix problems. *Production Planning & Control: The Management of Operations*, 36-46.
- Lee, T., & Plenert, G. (1993). Optimising theory of constraints when new product alternatives exist. *Production and inventory management journal*, 51-57.
- Marun, J. (2008). Una buena estrategia implica una Ventaja Competitiva Decisiva.
- Ministerio de Minas y Energía. (2016). *Minas*. Obtenido de http://www.minminas.gov.co%2Fdocuments%2F10180%2F614096%2F4-CapituloMinas.pdf%2Fbd3bdeb-7d06-4817-9af0-6c43136fef18&usg=AFQjCNEKwWpOdBNPMis1A-HSVeja0ggjdQ&sig2=_rHZ928utmCR_KoySvXtyQ&cad=rja
- Morales, J. (2006). *Propuesta para implementar un sistema de programación de la producción bajo la teoría de las restricciones, en una empresa de artes gráficas*.

- Morales, O. (2006). ¿Que es TOC?
- Naghilooa, A., Abbaspourb, M., Mohammadi-Ivatlooc, B., & Bakhtaria, K. (2015). GAMS based approach for optimal design and sizing of a pressure retarded osmosis power plant in Bahmanshir river of Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1559–1565.
- Ortiz, M. (2013). Theory of constraints and LP modeling as strategic decision tools for productivity increasing in the towel line of a textile-confection sector Company. Barranquilla .
- Ortiz, V. &. (2012). Optimal production plan in a soft drink bottling plant. *Revista Ingeniería Industrial*, 69-82.
- Oscar Morales & Asociados. (2008). *Medidores TOC*. Obtenido de <https://www.citethisforme.com/es>
- Pascoe, S. (1996). A tale of two solvers: Evolver 3.0 and GAMS 2.25. *Economic Journal*, 264-271.
- Plenert, G. (1993). An overview of JIT. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91-95.
- Pretorius, P. (2013). Introducing in-between decision points to TOC's five focusing steps. *International Journal of Production Research*, 496–506.
- Sala, R. (2001). Capitulo 14: GAMS. *Revista Electronica de Comunicaciones y trabajos de ASEPUMA*.
- Salari, E., & Askarzadeh, A. (2015). A new solution for loading optimization of multi-chiller systems by general algebraic modeling system. *In Applied Thermal Engineering*, 429-436.
- Sipper, D. (1998). *Planeación y control de la producción*. México.: Editorial. McGraw-Hill.
- Teoceconsultors. (2007). *La Aplicación a Producción (Drum – Buffer – Rope. D.B.R.) de la Teoría de las Limitaciones (Theory Of Constraints)*. Obtenido de http://www.teoce.com/rsc_prod/070201_dbr_smc.pdf
- Torres, W. (2004). *Desarrollo del sistema de planificación de la producción para una empresa fabricante de productos semiterminados de acero*.
- Tsou, C. (2012). On the strategy of supply chain collaboration based on dynamic inventory target level management: A theory of constraint perspective. Department of Information Management.

Universidad Nacional . (2008). *Guía básica para documentar caracterización de procesos*. Obtenido de http://ftp://ftp.camara.gov.co/MECI_CALIDAD/CAMARA%20DE%20REPRESNTANTES/4.%20DOCUMENTOS%20ENTREGADOS/guia%20basica%20para%20documentar%20caracterizacion%20de%20proc

Weber, J. (1984). *Matemática para Administración y economía*. Mexico: Editorial Hala.

Anexos

Anexo A. Modelo de Cimaco planteado en el software GAMS

```

$ontext Modelo NMorales
$offtext
*****Declaración de Conjuntos*****
Set
  t terrazas /T1*T3/
  n nivel    /N1*N3/
  p periodo  /P1*P3/;
*****Declaración de Parámetros*****
parameter Cap(t) Capacidad de extraccion en fuerza productiva en cada una de
las terrazas por semanas
  /T1 3857,
   T2 3857,
   T3 3857/;
parameter Captran(t) Cantidad de unidades que se transportan de la plataforma
P1 o P2 0 P3 a la plataforma 4
  /T1 2700,
   T2 2700,
   T3 2700/;

parameter Caproc(t) Capacidad de procesamiento de la plataforma t
  /T1 3600,
   T2 3600,
   T3 3600/;

*.....

scalar Capplat4 Capacidad maxima de procesamiento de la plataforma 4 semana
/6500/;
scalar Capplat5 Capacidad maxima de procesasmiento de la plataforma 5 semana
/3660/;
scalar Capplat6 Capacidad maxima de procesamiento de la plataforma 6 semana
/7850/;

table FR(t,n) Factor de recuperación de la terraza t del nivel n
      N1      N2      N3
T1    0.82    0.80    0.78
T2    0.82    0.80    0.78
T3    0.82    0.80    0.78
;

table FR4(t,n) Factor de recuperación de la plataforma 4 de la terraza t del
nivel n
      N1      N2      N3
T1    0.82    0.80    0.78
T2    0.82    0.80    0.78
T3    0.82    0.80    0.78
;

table FR5(t,n) Factor de recuperación de la plataforma 5 de la terraza t del
nivel n
      N1      N2      N3
T1    0.95    0.94    0.93
T2    0.95    0.94    0.93
T3    0.95    0.94    0.93
;

```

```

table FRetorno(t,n) Factor de retorno de lo que sale de la plataforma 6 a la
plataforma 5
      N1      N2      N3
T1      0.30    0.30    0.30
T2      0.30    0.30    0.30
T3      0.30    0.30    0.30
;
table FFinos(t,n) Factor de finos por terrazaz t por nivel n
      N1      N2      N3
T1      0.008   0.011   0.012
T2      0.008   0.011   0.012
T3      0.008   0.011   0.012
;
table FRP1(t,n) Factor de recuperación para el producto 1 de la terraza t del
nivel n
      N1      N2      N3
T1      0.28    0.27    0.25
T2      0.28    0.27    0.25
T3      0.28    0.27    0.25
;
table FRP2(t,n) Factor de recuperación para el producto 2 de la terraza t del
nivel n
      N1      N2      N3
T1      0.40    0.37    0.35
T2      0.40    0.37    0.35
T3      0.40    0.37    0.35
;
table FRP3(t,n) Factor de recuperación para el producto 3 de la terraza t del
nivel n
      N1      N2      N3
T1      0.05    0.06    0.07
T2      0.05    0.06    0.07
T3      0.05    0.06    0.07
;
table INIF0(t,n) inventario inicial de la terraza t del nivel n
      N1      N2      N3
T1      100000  100000  100000
T2      100000  100000  100000
T3      100000  100000  100000
;
table INIFI1(t,n) inventario inicial de la terraza t del nivel n
      N1      N2      N3
T1      0      0      0
T2      0      0      0
T3      0      0      0
;
table INIFI4(t,n) inventario inicial de la terraza t del nivel n
      N1      N2      N3
T1      0      0      0
T2      0      0      0
T3      0      0      0
;
scalar V1 Precio de venta del producto 1 por ton /22857/;

```

```

scalar V2 Precio de venta del producto 2 por ton /25000/;
scalar V3 Precio de venta del producto 3 por ton /5000/;
scalar V4 Precio de venta del producto 4 por ton /3751/;

scalar CX Costo de extracción por ton /1030/;
scalar CPF1 Costo de fase 1 por ton /297/;
scalar CTR Costo de transporte por ton /138/;
scalar CP4 Costo de producción plataforma 4 por ton /1310/;
scalar CP5 Costo de producción plataforma 5 por ton /1310/;
scalar CP6 Costo de producción plataforma 6 por ton /1310/;
scalar Calidad Calidad /0.01/;
scalar CIF0 Costo inventario en la fase 0 por ton /1030/;
scalar CIF1 Costo inventario en la fase 1 por ton /297/;
Scalar CIP4 Costo inventario plataforma 4 por ton /350/

;

*****Declaración de Variables*****
Variable
  X(t,n,p)  Cantidad de toneladas que se extraen de la terraza t del
nivel n en el periodo p
  I(t,n,p)  Inventario de la terraza t del nivel n en la fase 0 en el
periodo p
  W(t,n,p)  Cantidad de producto que se procesa de la terraza t del nivel
n en la fase 1 en el periodo p
  I1(t,n,p) Inventario de la terraza t del nivel n en la fase 1 en el
periodo p
  Y(t,n,p)  Cantidad de toneladas que se transportan de la terraza t a la
plataforma 4 en el periodo p
  I2(t,n,p) Inventario de la plataforma 4 de la terraza t del nivel n en
el periodo p
  Z(t,n,p)  Cantidad de toneladas de material que se procesa e la
plataforma 4 de la terraza t del nivel n en el periodo p
  O(t,n,p)  Cantidad de toneladas que se procesan en la plataforma 5 de
la terraza t del nivel n en el periodo p
  K(t,n,p)  Cantidad de toneladas de material que se proesan en la
plataforma 6 de la terraza t del nivel n en el periodo p
  PF1(t,n,p) Producto 1 Triturado de 1" saliente de la plataforma 6 de la
terrazza t del nivel n
  PF2(t,n,p) Producto 2 Triturado de 0.5 " saliente de la plataforma 6 de
la terraza t del nivel n
  PF3(t,n,p) Producto 3 Polvillo saliente de la plataforma 6 de la terraza
t del nivel n
  FPF1(p)   Factor de productos finales 1
  FPF2(p)   Factor de productos finales 2
  FPF3(p)   Factor de productos finales 3
  FPF4(p)   Factor de productos finales 4
  FO        Función objetivo

;
positive variable W, X, Y, Z, I, I1, I2;

;
*****Ecuaciones del modelo*****
Equations
FunObj

```

R1(t,p) Capacidad de extraccion de las terrazas en la fase 0
 R2(t,n,p) Restriccion de excavación nivel 3 menor a nivel 2
 R221(t,n,p) Restriccion de excavación nivel 2 menor a nivel 1
 R3(t,p) Capacidad de procesamiento de las plataformas 1 a la 3 en la fase 1
 R4(t,p) Capacidad de transporte de las platafromas 1 2 y 3 a la plataforma 4
 R5(p) Capacidad de procesamiento de la plataforma 4
 R6(p) Capacidad de procesamiento de la plataforma 5
 R7(p) Capacidad de procesamiento de la plataforma 6
 R9(t,n) Inventario I fase 0
 R91(t,n,p) Inventario I fase 0
 R11(t,n) Inventario fase 1
 R111(t,n,p) Inventario I fase 1
 R13(t,n) Inventario inicio plataforma 4
 R131(t,n,p) Inventario I inicio plataforma 4
 R14(t,n,p) Balance de la plataforma 4 a la plataforma 5
 R15(t,n,p) Balance de la plataforma 5 a la plataforma 6
 R16(t,n,p) Producto 1 triturado de 1" recuperado de la plataforma 6
 R17(t,n,p) Producto 2 triturado de 1-2" recuperado de la plataforma 6
 R18(t,n,p) Producto 3 polvillo recuperado de la plataforma 6
 R19(p) Total producto final 1 triturado de 1"
 R20(p) Total producto final 2 triturado de 1-2"
 R21(p) Total producto final 3 polvillo
 R22(p) Total producto final 4 zahorra
 R23(p) Norma de calidad para el producto 1
 R24(p) Norma de calidad para el producto 2

;

FunObj.. FO =e= sum((t,n,p),
 ((FPF1(p)*V1)+(FPF2(p)*V2)+(FPF3(p)*V3)+(FPF4(p)*V4))-
 (CX*X(t,n,p))-(CPF1*W(t,n,p))-(CTR*Y(t,n,p))-
 (CP4*Z(t,n,p))-(CP5*O(t,n,p))-
 (CP6*K(t,n,p))-(CIF0*I(t,n,p))-
 (CIF1*I1(t,n,p))-(CIP4*I2(t,n,p))

);

R1(t,p).. sum(n, X(t,n,p)) =e= Cap(t) ;
 R2(t,n,p).. X(t,'N3',p) =l= X(t,'N2',p);
 R221(t,n,p).. X(t,'N2',p) =l= X(t,'N1',p);
 R3(t,p).. sum(n, W(t,n,p)) =l= Caproc(t);
 R4(t,p).. sum(n, Y(t,n,p)) =l= Captran(t);
 R5(p).. sum((t,n), Z(t,n,p)) =l= Capplat4;
 R6(p).. sum((t,n), O(t,n,p)) =l= Capplat5;
 R7(p).. sum((t,n), K(t,n,p)) =l= Capplat6;

R9(t,n).. I(t,n,'P1') =e= INIF0(t,n) + X(t,n,'P1')-W(t,n,'P1');
 R91(t,n,p)\$ (Ord(p) gt 2).. I(t,n,p) =e= I(t,n,p-1) + X(t,n,p) -W(t,n,p);

R11(t,n).. I1(t,n,'P1') =e= INIFI1(t,n) + W(t,n,'P1') - (W(t,n,'P1')*(1-
 FR(t,n)))- Y(t,n,'P1');
 R111(t,n,p)\$ (Ord(p) gt 2).. I1(t,n,p) =e= I1(t,n,p-1) + W(t,n,p)-
 (W(t,n,p)*(1-FR(t,n))) - Y(t,n,p);

R13(t,n).. I2(t,n,'P1') =e= INIFI4(t,n) + Y(t,n,'P1') - Z(t,n,'P1');
 R131(t,n,p)\$ (Ord(p) gt 2).. I2(t,n,p) =e= I2(t,n,p-1) + Y(t,n,p) - Z(t,n,p);

```

R14(t,n,p).. O(t,n,p) =e= Z(t,n,p)*FR4(t,n);
R15(t,n,p).. K(t,n,p) =e= O(t,n,p)*FR5(t,n) + FRetorno(t,n)*K(t,n,p);
R16(t,n,p).. PF1(t,n,p) =e= K(t,n,p)*FRP1(t,n);
R17(t,n,p).. PF2(t,n,p) =e= K(t,n,p)*FRP2(t,n);
R18(t,n,p).. PF3(t,n,p) =e= K(t,n,p)*FRP3(t,n);
R19(p).. FPF1(p) =e= sum((t,n),PF1(t,n,p));
R20(p).. FPF2(p) =e= sum((t,n),PF2(t,n,p));
R21(p).. FPF3(p) =e= sum((t,n),PF3(t,n,p) + (O(t,n,p)*(1-FR5(t,n))));
R22(p).. FPF4(p) =e= sum((t,n),(Z(t,n,p)*(1-FR4(t,n))) + (W(t,n,p)*(1-
FR(t,n))));
R23(p).. sum((t,n),PF1(t,n,p)*FFinos(t,n)) =l= Calidad*sum((t,n),PF1(t,n,p));
R24(p).. sum((t,n),PF2(t,n,p)*FFinos(t,n)) =l= Calidad*sum((t,n),PF2(t,n,p));

model TNM /ALL/;

solve TNM using lp maximizing FO;
display fo.l;
display X.L;
display W.L;
display Y.L;
display Z.L;
display O.L;
display K.L;
display I.L;
display I1.L;
display I2.L;
display FPF1.1, FPF2.1, FPF3.1, FPF4.1;

```

Anexo B. Resultados del modelo de Cimaco en el software GAMS

| S O L V E | | S U M M A R Y | |
|---|-----------------|---------------|--------------------|
| MODEL | TNM | OBJECTIVE | FO |
| TYPE | LP | DIRECTION | MAXIMIZE |
| SOLVER | CPLEX | FROM LINE | 213 |
| **** | SOLVER STATUS | 1 | Normal Completion |
| **** | MODEL STATUS | 1 | Optimal |
| **** | OBJECTIVE VALUE | | 1535454726.6720 |
| RESOURCE USAGE, LIMIT | | 0.025 | 1000.000 |
| ITERATION COUNT, LIMIT | | 49 | 2000000000 |
| IBM ILOG CPLEX Dec 13, 2010 23.6.5 WEX 24181.24195 WEI x86_64/MS Windows Cplex 12.2.0.2, GAMS Link 34 GAMS/Cplex licensed for continuous and discrete problems. | | | |
| LP status(1): optimal Optimal solution found. Objective : 1535454726.672032 | | | |
| | LOWER | LEVEL | UPPER MARGINAL |
| ---- EQU FunObj | . | . | . 1.000 |
| ---- EQU R1 Capacidad de extraccion de las terrazas en la fase 0 | | | |
| | LOWER | LEVEL | UPPER MARGINAL |
| T1.P1 | 3857.000 | 3857.000 | 3857.000 -2060.000 |
| T1.P2 | 3857.000 | 3857.000 | 3857.000 -1030.000 |
| T1.P3 | 3857.000 | 3857.000 | 3857.000 -1657.133 |
| T2.P1 | 3857.000 | 3857.000 | 3857.000 -2060.000 |
| T2.P2 | 3857.000 | 3857.000 | 3857.000 -1030.000 |
| T2.P3 | 3857.000 | 3857.000 | 3857.000 -1657.133 |
| T3.P1 | 3857.000 | 3857.000 | 3857.000 -2060.000 |
| T3.P2 | 3857.000 | 3857.000 | 3857.000 -1030.000 |
| T3.P3 | 3857.000 | 3857.000 | 3857.000 -1657.133 |
| ---- EQU R2 Restriccion de excavación nivel 3 menor a nivel 2 | | | |
| | LOWER | LEVEL | UPPER MARGINAL |
| T1.N1.P1 | -INF | . | . . |
| T1.N1.P2 | -INF | -1928.500 | . . |
| T1.N1.P3 | -INF | . | . 541.993 |
| T1.N2.P1 | -INF | . | . EPS |
| T1.N2.P2 | -INF | -1928.500 | . . |
| T1.N2.P3 | -INF | . | . . |
| T1.N3.P1 | -INF | . | . . |
| T1.N3.P2 | -INF | -1928.500 | . . |
| T1.N3.P3 | -INF | . | . . |

| | | | | |
|----------|------|-----------|---|---------|
| T2.N1.P1 | -INF | -1928.500 | . | . |
| T2.N1.P2 | -INF | -1928.500 | . | . |
| T2.N1.P3 | -INF | . | . | . |
| T2.N2.P1 | -INF | -1928.500 | . | . |
| T2.N2.P2 | -INF | -1928.500 | . | . |
| T2.N2.P3 | -INF | . | . | . |
| T2.N3.P1 | -INF | -1928.500 | . | . |
| T2.N3.P2 | -INF | -1928.500 | . | . |
| T2.N3.P3 | -INF | . | . | 541.993 |
| T3.N1.P1 | -INF | -1928.500 | . | . |
| T3.N1.P2 | -INF | -1928.500 | . | . |
| T3.N1.P3 | -INF | . | . | . |
| T3.N2.P1 | -INF | -1928.500 | . | . |
| T3.N2.P2 | -INF | -1928.500 | . | . |
| T3.N2.P3 | -INF | . | . | 541.993 |
| T3.N3.P1 | -INF | -1928.500 | . | . |
| T3.N3.P2 | -INF | -1928.500 | . | . |
| T3.N3.P3 | -INF | . | . | . |

---- EQU R221 Restriccion de excavación nivel 2 menor a nivel 1

| | LOWER | LEVEL | UPPER | MARGINAL |
|----------|-------|-------|-------|----------|
| T1.N1.P1 | -INF | . | . | EPS |
| T1.N1.P2 | -INF | . | . | EPS |
| T1.N1.P3 | -INF | . | . | 402.867 |
| T1.N2.P1 | -INF | . | . | . |
| T1.N2.P2 | -INF | . | . | . |
| T1.N2.P3 | -INF | . | . | . |
| T1.N3.P1 | -INF | . | . | . |
| T1.N3.P2 | -INF | . | . | . |
| T1.N3.P3 | -INF | . | . | . |
| T2.N1.P1 | -INF | . | . | . |
| T2.N1.P2 | -INF | . | . | EPS |
| T2.N1.P3 | -INF | . | . | 402.867 |
| T2.N2.P1 | -INF | . | . | . |
| T2.N2.P2 | -INF | . | . | . |
| T2.N2.P3 | -INF | . | . | . |
| T2.N3.P1 | -INF | . | . | EPS |
| T2.N3.P2 | -INF | . | . | . |
| T2.N3.P3 | -INF | . | . | . |
| T3.N1.P1 | -INF | . | . | . |
| T3.N1.P2 | -INF | . | . | EPS |
| T3.N1.P3 | -INF | . | . | 402.867 |
| T3.N2.P1 | -INF | . | . | EPS |
| T3.N2.P2 | -INF | . | . | . |
| T3.N2.P3 | -INF | . | . | . |
| T3.N3.P1 | -INF | . | . | . |
| T3.N3.P2 | -INF | . | . | . |
| T3.N3.P3 | -INF | . | . | . |

---- EQU R3 Capacidad de procesamiento de las plataformas 1 a la 3 en la fase 1

| | LOWER | LEVEL | UPPER | MARGINAL |
|-------|-------|----------|----------|----------|
| T1.P1 | -INF | 3600.000 | 3600.000 | 7928.320 |

| | | | | |
|-------|------|----------|----------|----------|
| T1.P2 | -INF | 3600.000 | 3600.000 | 7129.980 |
| T1.P3 | -INF | 3600.000 | 3600.000 | 6983.460 |
| T2.P1 | -INF | 3600.000 | 3600.000 | 7928.320 |
| T2.P2 | -INF | 3600.000 | 3600.000 | 7129.980 |
| T2.P3 | -INF | 3600.000 | 3600.000 | 6983.460 |
| T3.P1 | -INF | 3600.000 | 3600.000 | 7928.320 |
| T3.P2 | -INF | 3600.000 | 3600.000 | 7129.980 |
| T3.P3 | -INF | 3600.000 | 3600.000 | 6983.460 |

---- EQU R4 Capacidad de transporte de las plataformas 1 2 y 3 a la
plataforma

4

| | LOWER | LEVEL | UPPER | MARGINAL |
|-------|-------|----------|----------|-----------|
| T1.P1 | -INF | . | 2700.000 | . |
| T1.P2 | -INF | . | 2700.000 | . |
| T1.P3 | -INF | 843.507 | 2700.000 | . |
| T2.P1 | -INF | 1763.415 | 2700.000 | . |
| T2.P2 | -INF | . | 2700.000 | . |
| T2.P3 | -INF | 843.507 | 2700.000 | . |
| T3.P1 | -INF | 2700.000 | 2700.000 | -5.23E-12 |
| T3.P2 | -INF | . | 2700.000 | . |
| T3.P3 | -INF | 843.507 | 2700.000 | . |

---- EQU R5 Capacidad de procesamiento de la plataforma 4

| | LOWER | LEVEL | UPPER | MARGINAL |
|----|-------|----------|----------|----------|
| P1 | -INF | 4463.415 | 6500.000 | . |
| P2 | -INF | 4463.415 | 6500.000 | . |
| P3 | -INF | 4463.415 | 6500.000 | . |

---- EQU R6 Capacidad de procesamiento de la plataforma 5

| | LOWER | LEVEL | UPPER | MARGINAL |
|----|-------|----------|----------|-----------|
| P1 | -INF | 3660.000 | 3660.000 | 2.0651E+5 |
| P2 | -INF | 3660.000 | 3660.000 | 2.0834E+5 |
| P3 | -INF | 3660.000 | 3660.000 | 2.0792E+5 |

---- EQU R7 Capacidad de procesamiento de la plataforma 6

| | LOWER | LEVEL | UPPER | MARGINAL |
|----|-------|----------|----------|----------|
| P1 | -INF | 4967.143 | 7850.000 | . |
| P2 | -INF | 4967.143 | 7850.000 | . |
| P3 | -INF | 4967.143 | 7850.000 | . |

---- EQU R9 Inventario I fase 0

| | LOWER | LEVEL | UPPER | MARGINAL |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| T1.N1 | 1.0000E+5 | 1.0000E+5 | 1.0000E+5 | -1030.000 |
| T1.N2 | 1.0000E+5 | 1.0000E+5 | 1.0000E+5 | -1030.000 |
| T1.N3 | 1.0000E+5 | 1.0000E+5 | 1.0000E+5 | -1030.000 |
| T2.N1 | 1.0000E+5 | 1.0000E+5 | 1.0000E+5 | -1030.000 |

```

T2.N2 1.0000E+5 1.0000E+5 1.0000E+5 -1030.000
T2.N3 1.0000E+5 1.0000E+5 1.0000E+5 -1030.000
T3.N1 1.0000E+5 1.0000E+5 1.0000E+5 -1030.000
T3.N2 1.0000E+5 1.0000E+5 1.0000E+5 -1030.000
T3.N3 1.0000E+5 1.0000E+5 1.0000E+5 -1030.000

```

```

---- EQU R91  Inventario I fase 0

```

| | LOWER | LEVEL | UPPER | MARGINAL |
|----------|-------|-------|-------|-----------|
| T1.N1.P3 | . | . | . | -1030.000 |
| T1.N2.P3 | . | . | . | -766.260 |
| T1.N3.P3 | . | . | . | -85.140 |
| T2.N1.P3 | . | . | . | -1030.000 |
| T2.N2.P3 | . | . | . | -766.260 |
| T2.N3.P3 | . | . | . | -85.140 |
| T3.N1.P3 | . | . | . | -1030.000 |
| T3.N2.P3 | . | . | . | -766.260 |
| T3.N3.P3 | . | . | . | -85.140 |

```

---- EQU R11  Inventario fase 1

```

| | LOWER | LEVEL | UPPER | MARGINAL |
|-------|-------|-------|-------|----------|
| T1.N1 | . | . | . | 1364.268 |
| T1.N2 | . | . | . | 554.400 |
| T1.N3 | . | . | . | -297.000 |
| T2.N1 | . | . | . | 1364.268 |
| T2.N2 | . | . | . | 554.400 |
| T2.N3 | . | . | . | -297.000 |
| T3.N1 | . | . | . | 1364.268 |
| T3.N2 | . | . | . | 554.400 |
| T3.N3 | . | . | . | -297.000 |

```

---- EQU R111  Inventario I fase 1

```

| | LOWER | LEVEL | UPPER | MARGINAL |
|----------|-------|-------|-------|----------|
| T1.N1.P3 | . | . | . | 212.000 |
| T1.N2.P3 | . | . | . | -297.000 |
| T1.N3.P3 | . | . | . | -297.000 |
| T2.N1.P3 | . | . | . | 212.000 |
| T2.N2.P3 | . | . | . | -297.000 |
| T2.N3.P3 | . | . | . | -297.000 |
| T3.N1.P3 | . | . | . | 212.000 |
| T3.N2.P3 | . | . | . | -297.000 |
| T3.N3.P3 | . | . | . | -297.000 |

```

---- EQU R13  Inventario inicio plataforma 4

```

| | LOWER | LEVEL | UPPER | MARGINAL |
|-------|-------|-------|-------|----------|
| T1.N1 | . | . | . | 1502.268 |
| T1.N2 | . | . | . | 692.400 |
| T1.N3 | . | . | . | -159.000 |
| T2.N1 | . | . | . | 1502.268 |
| T2.N2 | . | . | . | 692.400 |

| | | | | |
|-------|---|---|---|----------|
| T2.N3 | . | . | . | -159.000 |
| T3.N1 | . | . | . | 1502.268 |
| T3.N2 | . | . | . | 692.400 |
| T3.N3 | . | . | . | -159.000 |

---- EQU R131 Inventario I inicio plataforma 4

| | LOWER | LEVEL | UPPER | MARGINAL |
|----------|-------|-------|-------|----------|
| T1.N1.P3 | . | . | . | 350.000 |
| T1.N2.P3 | . | . | . | -159.000 |
| T1.N3.P3 | . | . | . | -159.000 |
| T2.N1.P3 | . | . | . | 350.000 |
| T2.N2.P3 | . | . | . | -159.000 |
| T2.N3.P3 | . | . | . | -159.000 |
| T3.N1.P3 | . | . | . | 350.000 |
| T3.N2.P3 | . | . | . | -159.000 |
| T3.N3.P3 | . | . | . | -159.000 |

---- EQU R14 Balance de la plataforma 4 a la plataforma 5

| | LOWER | LEVEL | UPPER | MARGINAL |
|----------|-------|-------|-------|-----------|
| T1.N1.P1 | . | . | . | -3980.917 |
| T1.N1.P2 | . | . | . | -5812.951 |
| T1.N1.P3 | . | . | . | -5386.122 |
| T1.N2.P1 | . | . | . | -1.688E+4 |
| T1.N2.P2 | . | . | . | -1.871E+4 |
| T1.N2.P3 | . | . | . | -1.828E+4 |
| T1.N3.P1 | . | . | . | -2.927E+4 |
| T1.N3.P2 | . | . | . | -3.111E+4 |
| T1.N3.P3 | . | . | . | -3.068E+4 |
| T2.N1.P1 | . | . | . | -3980.917 |
| T2.N1.P2 | . | . | . | -5812.951 |
| T2.N1.P3 | . | . | . | -5386.122 |
| T2.N2.P1 | . | . | . | -1.688E+4 |
| T2.N2.P2 | . | . | . | -1.871E+4 |
| T2.N2.P3 | . | . | . | -1.828E+4 |
| T2.N3.P1 | . | . | . | -2.927E+4 |
| T2.N3.P2 | . | . | . | -3.111E+4 |
| T2.N3.P3 | . | . | . | -3.068E+4 |
| T3.N1.P1 | . | . | . | -3980.917 |
| T3.N1.P2 | . | . | . | -5812.951 |
| T3.N1.P3 | . | . | . | -5386.122 |
| T3.N2.P1 | . | . | . | -1.688E+4 |
| T3.N2.P2 | . | . | . | -1.871E+4 |
| T3.N2.P3 | . | . | . | -1.828E+4 |
| T3.N3.P1 | . | . | . | -2.927E+4 |
| T3.N3.P2 | . | . | . | -3.111E+4 |
| T3.N3.P3 | . | . | . | -3.068E+4 |

---- EQU R15 Balance de la plataforma 5 a la plataforma 6

| | LOWER | LEVEL | UPPER | MARGINAL |
|----------|-------|-------|-------|-----------|
| T1.N1.P1 | . | . | . | 2.1220E+5 |
| T1.N1.P2 | . | . | . | 2.1220E+5 |

| | | | | |
|----------|---|---|---|-----------|
| T1.N1.P3 | . | . | . | 2.1220E+5 |
| T1.N2.P1 | . | . | . | 2.0026E+5 |
| T1.N2.P2 | . | . | . | 2.0026E+5 |
| T1.N2.P3 | . | . | . | 2.0026E+5 |
| T1.N3.P1 | . | . | . | 1.8860E+5 |
| T1.N3.P2 | . | . | . | 1.8860E+5 |
| T1.N3.P3 | . | . | . | 1.8860E+5 |
| T2.N1.P1 | . | . | . | 2.1220E+5 |
| T2.N1.P2 | . | . | . | 2.1220E+5 |
| T2.N1.P3 | . | . | . | 2.1220E+5 |
| T2.N2.P1 | . | . | . | 2.0026E+5 |
| T2.N2.P2 | . | . | . | 2.0026E+5 |
| T2.N2.P3 | . | . | . | 2.0026E+5 |
| T2.N3.P1 | . | . | . | 1.8860E+5 |
| T2.N3.P2 | . | . | . | 1.8860E+5 |
| T2.N3.P3 | . | . | . | 1.8860E+5 |
| T3.N1.P1 | . | . | . | 2.1220E+5 |
| T3.N1.P2 | . | . | . | 2.1220E+5 |
| T3.N1.P3 | . | . | . | 2.1220E+5 |
| T3.N2.P1 | . | . | . | 2.0026E+5 |
| T3.N2.P2 | . | . | . | 2.0026E+5 |
| T3.N2.P3 | . | . | . | 2.0026E+5 |
| T3.N3.P1 | . | . | . | 1.8860E+5 |
| T3.N3.P2 | . | . | . | 1.8860E+5 |
| T3.N3.P3 | . | . | . | 1.8860E+5 |

---- EQU R16 Producto 1 triturado de 1" recuperado de la plataforma 6

| | LOWER | LEVEL | UPPER | MARGINAL |
|----------|-------|-------|-------|-----------|
| T1.N1.P1 | . | . | . | 2.0571E+5 |
| T1.N1.P2 | . | . | . | 2.0571E+5 |
| T1.N1.P3 | . | . | . | 2.0571E+5 |
| T1.N2.P1 | . | . | . | 2.0571E+5 |
| T1.N2.P2 | . | . | . | 2.0571E+5 |
| T1.N2.P3 | . | . | . | 2.0571E+5 |
| T1.N3.P1 | . | . | . | 2.0571E+5 |
| T1.N3.P2 | . | . | . | 2.0571E+5 |
| T1.N3.P3 | . | . | . | 2.0571E+5 |
| T2.N1.P1 | . | . | . | 2.0571E+5 |
| T2.N1.P2 | . | . | . | 2.0571E+5 |
| T2.N1.P3 | . | . | . | 2.0571E+5 |
| T2.N2.P1 | . | . | . | 2.0571E+5 |
| T2.N2.P2 | . | . | . | 2.0571E+5 |
| T2.N2.P3 | . | . | . | 2.0571E+5 |
| T2.N3.P1 | . | . | . | 2.0571E+5 |
| T2.N3.P2 | . | . | . | 2.0571E+5 |
| T2.N3.P3 | . | . | . | 2.0571E+5 |
| T3.N1.P1 | . | . | . | 2.0571E+5 |
| T3.N1.P2 | . | . | . | 2.0571E+5 |
| T3.N1.P3 | . | . | . | 2.0571E+5 |
| T3.N2.P1 | . | . | . | 2.0571E+5 |
| T3.N2.P2 | . | . | . | 2.0571E+5 |
| T3.N2.P3 | . | . | . | 2.0571E+5 |
| T3.N3.P1 | . | . | . | 2.0571E+5 |
| T3.N3.P2 | . | . | . | 2.0571E+5 |
| T3.N3.P3 | . | . | . | 2.0571E+5 |

---- EQU R17 Producto 2 triturado de 1-2" recuperado de la plataforma 6

| | LOWER | LEVEL | UPPER | MARGINAL |
|----------|-------|-------|-------|-----------|
| T1.N1.P1 | . | . | . | 2.2500E+5 |
| T1.N1.P2 | . | . | . | 2.2500E+5 |
| T1.N1.P3 | . | . | . | 2.2500E+5 |
| T1.N2.P1 | . | . | . | 2.2500E+5 |
| T1.N2.P2 | . | . | . | 2.2500E+5 |
| T1.N2.P3 | . | . | . | 2.2500E+5 |
| T1.N3.P1 | . | . | . | 2.2500E+5 |
| T1.N3.P2 | . | . | . | 2.2500E+5 |
| T1.N3.P3 | . | . | . | 2.2500E+5 |
| T2.N1.P1 | . | . | . | 2.2500E+5 |
| T2.N1.P2 | . | . | . | 2.2500E+5 |
| T2.N1.P3 | . | . | . | 2.2500E+5 |
| T2.N2.P1 | . | . | . | 2.2500E+5 |
| T2.N2.P2 | . | . | . | 2.2500E+5 |
| T2.N2.P3 | . | . | . | 2.2500E+5 |
| T2.N3.P1 | . | . | . | 2.2500E+5 |
| T2.N3.P2 | . | . | . | 2.2500E+5 |
| T2.N3.P3 | . | . | . | 2.2500E+5 |
| T3.N1.P1 | . | . | . | 2.2500E+5 |
| T3.N1.P2 | . | . | . | 2.2500E+5 |
| T3.N1.P3 | . | . | . | 2.2500E+5 |
| T3.N2.P1 | . | . | . | 2.2500E+5 |
| T3.N2.P2 | . | . | . | 2.2500E+5 |
| T3.N2.P3 | . | . | . | 2.2500E+5 |
| T3.N3.P1 | . | . | . | 2.2500E+5 |
| T3.N3.P2 | . | . | . | 2.2500E+5 |
| T3.N3.P3 | . | . | . | 2.2500E+5 |

---- EQU R18 Producto 3 polvillo recuperado de la plataforma 6

| | LOWER | LEVEL | UPPER | MARGINAL |
|-----------------|-------|-------|-----------|-----------|
| T1.N1.P1 | . | . | . | 45000.000 |
| T1.N1.P2 | . | . | . | 45000.000 |
| T1.N1.P3 | . | . | . | 45000.000 |
| T1.N2.P1 | . | . | . | 45000.000 |
| T1.N2.P2 | . | . | . | 45000.000 |
| T1.N2.P3 | . | . | . | 45000.000 |
| T1.N3.P1 | . | . | . | 45000.000 |
| T1.N3.P2 | . | . | . | 45000.000 |
| T1.N3.P3 | . | . | . | 45000.000 |
| T2.N1.P1 | . | . | . | 45000.000 |
| T2.N1.P2 | . | . | . | 45000.000 |
| T2.N1.P3 | . | . | . | 45000.000 |
| T2.N2.P1 | . | . | . | 45000.000 |
| T2.N2.P2 | . | . | 45000.000 | |
| T2.N2.P3 | . | . | . | 45000.000 |
| T2.N3.P1 | . | . | . | 45000.000 |
| T2.N3.P2 | . | . | . | 45000.000 |
| T2.N3.P3 | . | . | . | 45000.000 |
| T3.N1.P1 | . | . | . | 45000.000 |

| | | | | |
|---|-------|--------|-------|-----------|
| T3.N1.P2 | . | . | . | 45000.000 |
| T3.N1.P3 | . | . | . | 45000.000 |
| T3.N2.P1 | . | . | . | 45000.000 |
| T3.N2.P2 | . | . | . | 45000.000 |
| T3.N2.P3 | . | . | . | 45000.000 |
| T3.N3.P1 | . | . | . | 45000.000 |
| T3.N3.P2 | . | . | . | 45000.000 |
| T3.N3.P3 | . | . | . | 45000.000 |
| ---- EQU R19 Total producto final 1 triturado de 1" | | | | |
| | LOWER | LEVEL | UPPER | MARGINAL |
| P1 | . | . | . | 2.0571E+5 |
| P2 | . | . | . | 2.0571E+5 |
| P3 | . | . | . | 2.0571E+5 |
| ---- EQU R20 Total producto final 2 triturado de 1-2" | | | | |
| | LOWER | LEVEL | UPPER | MARGINAL |
| P1 | . | . | . | 2.2500E+5 |
| P2 | . | . | . | 2.2500E+5 |
| P3 | . | . | . | 2.2500E+5 |
| ---- EQU R21 Total producto final 3 polvillo | | | | |
| | LOWER | LEVEL | UPPER | MARGINAL |
| P1 | . | . | . | 45000.000 |
| P2 | . | . | . | 45000.000 |
| P3 | . | . | . | 45000.000 |
| ---- EQU R22 Total producto final 4 zahorra | | | | |
| | LOWER | LEVEL | UPPER | MARGINAL |
| P1 | . | . | . | 33759.000 |
| P2 | . | . | . | 33759.000 |
| P3 | . | . | . | 33759.000 |
| ---- EQU R23 Norma de calidad para el producto 1 | | | | |
| | LOWER | LEVEL | UPPER | MARGINAL |
| P1 | -INF | -2.782 | . | . |
| P2 | -INF | -2.782 | . | . |
| P3 | -INF | -2.782 | . | . |
| ---- EQU R24 Norma de calidad para el producto 2 | | | | |
| | LOWER | LEVEL | UPPER | MARGINAL |
| P1 | -INF | -3.974 | . | . |
| P2 | -INF | -3.974 | . | . |
| P3 | -INF | -3.974 | . | . |

| ---- VAR X Cantidad de toneladas que se extraen de la terraza t del nivel n en el periodo p | | | | |
|---|-------|-----------|-------|-----------|
| | LOWER | LEVEL | UPPER | MARGINAL |
| T1.N1.P1 | . | 1285.667 | +INF | . |
| T1.N1.P2 | . | 1928.500 | +INF | . |
| T1.N1.P3 | . | 1285.667 | +INF | . |
| T1.N2.P1 | . | 1285.667 | +INF | . |
| T1.N2.P2 | . | 1928.500 | +INF | . |
| T1.N2.P3 | . | 1285.667 | +INF | . |
| T1.N3.P1 | . | 1285.667 | +INF | . |
| T1.N3.P2 | . | . | +INF | EPS |
| T1.N3.P3 | . | 1285.667 | +INF | . |
| T2.N1.P1 | . | 1928.500 | +INF | . |
| T2.N1.P2 | . | 1928.500 | +INF | . |
| T2.N1.P3 | . | 1285.667 | +INF | . |
| T2.N2.P1 | . | 1928.500 | +INF | . |
| T2.N2.P2 | . | 1928.500 | +INF | . |
| T2.N2.P3 | . | 1285.667 | +INF | . |
| T2.N3.P1 | . | . | +INF | EPS |
| T2.N3.P2 | . | . | +INF | EPS |
| T2.N3.P3 | . | 1285.667 | +INF | . |
| T3.N1.P1 | . | 1928.500 | +INF | . |
| T3.N1.P2 | . | 1928.500 | +INF | . |
| T3.N1.P3 | . | 1285.667 | +INF | . |
| T3.N2.P1 | . | 1928.500 | +INF | . |
| T3.N2.P2 | . | 1928.500 | +INF | . |
| T3.N2.P3 | . | 1285.667 | +INF | . |
| T3.N3.P1 | . | . | +INF | EPS |
| T3.N3.P2 | . | . | +INF | EPS |
| T3.N3.P3 | . | 1285.667 | +INF | . |
| ---- VAR I Inventario de la terraza t del nivel n en la fase 0 en el periodo p | | | | |
| | LOWER | LEVEL | UPPER | MARGINAL |
| T1.N1.P1 | . | 1.0129E+5 | +INF | . |
| T1.N1.P2 | . | . | +INF | -2060.000 |
| T1.N1.P3 | . | 257.000 | +INF | . |
| T1.N2.P1 | . | 1.0129E+5 | +INF | . |
| T1.N2.P2 | . | . | +INF | -1796.260 |
| T1.N2.P3 | . | . | +INF | -263.740 |
| T1.N3.P1 | . | 97685.667 | +INF | . |
| T1.N3.P2 | . | . | +INF | -1115.140 |
| T1.N3.P3 | . | . | +INF | -944.860 |
| T2.N1.P1 | . | 99777.994 | +INF | . |
| T2.N1.P2 | . | . | +INF | -2060.000 |
| T2.N1.P3 | . | 257.000 | +INF | . |
| T2.N2.P1 | . | 1.0193E+5 | +INF | . |
| T2.N2.P2 | . | . | +INF | -1796.260 |
| T2.N2.P3 | . | . | +INF | -263.740 |
| T2.N3.P1 | . | 98550.506 | +INF | . |
| T2.N3.P2 | . | . | +INF | -1115.140 |
| T2.N3.P3 | . | . | +INF | -944.860 |

| | | | | |
|--|-------|-----------|-------|-----------|
| T3.N1.P1 | . | 98635.817 | +INF | . |
| T3.N1.P2 | . | . | +INF | -2060.000 |
| T3.N1.P3 | . | 257.000 | +INF | . |
| T3.N2.P1 | . | 1.0193E+5 | +INF | . |
| T3.N2.P2 | . | . | +INF | -1796.260 |
| T3.N2.P3 | . | . | +INF | -263.740 |
| T3.N3.P1 | . | 99692.683 | +INF | . |
| T3.N3.P2 | . | . | +INF | -1115.140 |
| T3.N3.P3 | . | . | +INF | -944.860 |
| ---- VAR W Cantidad de producto que se procesa de la terraza t del nivel n en l a fase 1 en el periodo p | | | | |
| | LOWER | LEVEL | UPPER | MARGINAL |
| T1.N1.P1 | . | . | +INF | . |
| T1.N1.P2 | . | . | +INF | -1350.360 |
| T1.N1.P3 | . | 1028.667 | +INF | . |
| T1.N2.P1 | . | . | +INF | . |
| T1.N2.P2 | . | . | +INF | -675.180 |
| T1.N2.P3 | . | 1285.667 | +INF | . |
| T1.N3.P1 | . | 3600.000 | +INF | . |
| T1.N3.P2 | . | 3600.000 | +INF | . |
| T1.N3.P3 | . | 1285.667 | +INF | . |
| T2.N1.P1 | . | 2150.506 | +INF | . |
| T2.N1.P2 | . | . | +INF | -1350.360 |
| T2.N1.P3 | . | 1028.667 | +INF | . |
| T2.N2.P1 | . | . | +INF | . |
| T2.N2.P2 | . | . | +INF | -675.180 |
| T2.N2.P3 | . | 1285.667 | +INF | . |
| T2.N3.P1 | . | 1449.494 | +INF | . |
| T2.N3.P2 | . | 3600.000 | +INF | . |
| T2.N3.P3 | . | 1285.667 | +INF | . |
| T3.N1.P1 | . | 3292.683 | +INF | . |
| T3.N1.P2 | . | . | +INF | -1350.360 |
| T3.N1.P3 | . | 1028.667 | +INF | . |
| T3.N2.P1 | . | . | +INF | . |
| T3.N2.P2 | . | . | +INF | -675.180 |
| T3.N2.P3 | . | 1285.667 | +INF | . |
| T3.N3.P1 | . | 307.317 | +INF | . |
| T3.N3.P2 | . | 3600.000 | +INF | . |
| T3.N3.P3 | . | 1285.667 | +INF | . |
| ---- VAR I1 Inventario de la terraza t del nivel n en la fase 1 en el periodo p | | | | |
| | LOWER | LEVEL | UPPER | MARGINAL |
| T1.N1.P1 | . | . | +INF | -1661.268 |
| T1.N1.P2 | . | . | +INF | -85.000 |
| T1.N1.P3 | . | . | +INF | -509.000 |
| T1.N2.P1 | . | . | +INF | -851.400 |
| T1.N2.P2 | . | . | +INF | -594.000 |
| T1.N2.P3 | . | 1028.533 | +INF | . |
| T1.N3.P1 | . | 2808.000 | +INF | . |
| T1.N3.P2 | . | . | +INF | -594.000 |

| | | | | |
|----------|---|----------|------|-----------|
| T1.N3.P3 | . | 1002.820 | +INF | . |
| T2.N1.P1 | . | . | +INF | -1661.268 |
| T2.N1.P2 | . | . | +INF | -85.000 |
| T2.N1.P3 | . | . | +INF | -509.000 |
| T2.N2.P1 | . | . | +INF | -851.400 |
| T2.N2.P2 | . | . | +INF | -594.000 |
| T2.N2.P3 | . | 1028.533 | +INF | . |
| T2.N3.P1 | . | 1130.606 | +INF | . |
| T2.N3.P2 | . | . | +INF | -594.000 |
| T2.N3.P3 | . | 1002.820 | +INF | . |
| T3.N1.P1 | . | . | +INF | -1661.268 |
| T3.N1.P2 | . | . | +INF | -85.000 |
| T3.N1.P3 | . | . | +INF | -509.000 |
| T3.N2.P1 | . | . | +INF | -851.400 |
| T3.N2.P2 | . | . | +INF | -594.000 |
| T3.N2.P3 | . | 1028.533 | +INF | . |
| T3.N3.P1 | . | 239.707 | +INF | . |
| T3.N3.P2 | . | . | +INF | -594.000 |
| T3.N3.P3 | . | 1002.820 | +INF | . |

---- VAR Y Cantidad de toneladas que se transportan de la terraza t a la
plataf
orma 4 en el periodo p

| | LOWER | LEVEL | UPPER | MARGINAL |
|----------|-------|----------|-------|----------|
| T1.N1.P1 | . | . | +INF | . |
| T1.N1.P2 | . | . | +INF | -138.000 |
| T1.N1.P3 | . | 843.507 | +INF | . |
| T1.N2.P1 | . | . | +INF | . |
| T1.N2.P2 | . | . | +INF | -138.000 |
| T1.N2.P3 | . | . | +INF | . |
| T1.N3.P1 | . | . | +INF | . |
| T1.N3.P2 | . | . | +INF | -138.000 |
| T1.N3.P3 | . | . | +INF | . |
| T2.N1.P1 | . | 1763.415 | +INF | . |
| T2.N1.P2 | . | . | +INF | -138.000 |
| T2.N1.P3 | . | 843.507 | +INF | . |
| T2.N2.P1 | . | . | +INF | . |
| T2.N2.P2 | . | . | +INF | -138.000 |
| T2.N2.P3 | . | . | +INF | . |
| T2.N3.P1 | . | . | +INF | . |
| T2.N3.P2 | . | . | +INF | -138.000 |
| T2.N3.P3 | . | . | +INF | . |
| T3.N1.P1 | . | 2700.000 | +INF | . |
| T3.N1.P2 | . | . | +INF | -138.000 |
| T3.N1.P3 | . | 843.507 | +INF | . |
| T3.N2.P1 | . | . | +INF | . |
| T3.N2.P2 | . | . | +INF | -138.000 |
| T3.N2.P3 | . | . | +INF | . |
| T3.N3.P1 | . | . | +INF | . |
| T3.N3.P2 | . | . | +INF | -138.000 |
| T3.N3.P3 | . | . | +INF | . |

---- VAR I2 Inventario de la plataforma 4 de la terraza t del nivel n en el
per
iodo p

| | LOWER | LEVEL | UPPER | MARGINAL |
|--|-------|----------|-------|-----------|
| T1.N1.P1 | . | . | +INF | -1852.268 |
| T1.N1.P2 | . | 1932.895 | +INF | . |
| T1.N1.P3 | . | . | +INF | -700.000 |
| T1.N2.P1 | . | . | +INF | -1042.400 |
| T1.N2.P2 | . | . | +INF | -509.000 |
| T1.N2.P3 | . | . | +INF | -191.000 |
| T1.N3.P1 | . | . | +INF | -191.000 |
| T1.N3.P2 | . | . | +INF | -509.000 |
| T1.N3.P3 | . | . | +INF | -191.000 |
| T2.N1.P1 | . | . | +INF | -1852.268 |
| T2.N1.P2 | . | . | +INF | 4.547E-12 |
| T2.N1.P3 | . | . | +INF | -700.000 |
| T2.N2.P1 | . | . | +INF | -1042.400 |
| T2.N2.P2 | . | . | +INF | -509.000 |
| T2.N2.P3 | . | . | +INF | -191.000 |
| T2.N3.P1 | . | . | +INF | -191.000 |
| T2.N3.P2 | . | . | +INF | -509.000 |
| T2.N3.P3 | . | . | +INF | -191.000 |
| T3.N1.P1 | . | . | +INF | -1852.268 |
| T3.N1.P2 | . | . | +INF | 4.547E-12 |
| T3.N1.P3 | . | . | +INF | -700.000 |
| T3.N2.P1 | . | . | +INF | -1042.400 |
| T3.N2.P2 | . | . | +INF | -509.000 |
| T3.N2.P3 | . | . | +INF | -191.000 |
| T3.N3.P1 | . | . | +INF | -191.000 |
| T3.N3.P2 | . | . | +INF | -509.000 |
| T3.N3.P3 | . | . | +INF | -191.000 |
| ---- VAR Z Cantidad de toneladas de material que se procesa e la plataforma 4 d | | | | |
| e la terraza t del nivel n en el periodo p | | | | |
| | LOWER | LEVEL | UPPER | MARGINAL |
| T1.N1.P1 | . | . | +INF | -4.55E-12 |
| T1.N1.P2 | . | 4463.415 | +INF | . |
| T1.N1.P3 | . | 2776.401 | +INF | . |
| T1.N2.P1 | . | . | +INF | -8750.875 |
| T1.N2.P2 | . | . | +INF | -9524.102 |
| T1.N2.P3 | . | . | +INF | -9023.639 |
| T1.N3.P1 | . | . | +INF | -1.656E+4 |
| T1.N3.P2 | . | . | +INF | -1.815E+4 |
| T1.N3.P3 | . | . | +INF | -1.765E+4 |
| T2.N1.P1 | . | 1763.415 | +INF | . |
| T2.N1.P2 | . | . | +INF | -8.19E-12 |
| T2.N1.P3 | . | 843.507 | +INF | . |
| T2.N2.P1 | . | . | +INF | -8750.875 |
| T2.N2.P2 | . | . | +INF | -9524.102 |
| T2.N2.P3 | . | . | +INF | -9023.639 |
| T2.N3.P1 | . | . | +INF | -1.656E+4 |
| T2.N3.P2 | . | . | +INF | -1.815E+4 |
| T2.N3.P3 | . | . | +INF | -1.765E+4 |
| T3.N1.P1 | . | 2700.000 | +INF | . |
| T3.N1.P2 | . | . | +INF | -8.19E-12 |

| | | | | |
|----------|---|---------|------|-----------|
| T3.N1.P3 | . | 843.507 | +INF | . |
| T3.N2.P1 | . | . | +INF | -8750.875 |
| T3.N2.P2 | . | . | +INF | -9524.102 |
| T3.N2.P3 | . | . | +INF | -9023.639 |
| T3.N3.P1 | . | . | +INF | -1.656E+4 |
| T3.N3.P2 | . | . | +INF | -1.815E+4 |
| T3.N3.P3 | . | . | +INF | -1.765E+4 |

---- VAR O Cantidad de toneladas que se procesan en la plataforma 5 de la terra

za t del nivel n en el periodo p

| | LOWER | LEVEL | UPPER | MARGINAL |
|----------|-------|----------|-------|----------|
| T1.N1.P1 | -INF | . | +INF | . |
| T1.N1.P2 | -INF | 3660.000 | +INF | . |
| T1.N1.P3 | -INF | 2276.649 | +INF | . |
| T1.N2.P1 | -INF | . | +INF | . |
| T1.N2.P2 | -INF | . | +INF | . |
| T1.N2.P3 | -INF | . | +INF | . |
| T1.N3.P1 | -INF | . | +INF | . |
| T1.N3.P2 | -INF | . | +INF | . |
| T1.N3.P3 | -INF | . | +INF | . |
| T2.N1.P1 | -INF | 1446.000 | +INF | . |
| T2.N1.P2 | -INF | . | +INF | . |
| T2.N1.P3 | -INF | 691.675 | +INF | . |
| T2.N2.P1 | -INF | . | +INF | . |
| T2.N2.P2 | -INF | . | +INF | . |
| T2.N2.P3 | -INF | . | +INF | . |
| T2.N3.P1 | -INF | . | +INF | . |
| T2.N3.P2 | -INF | . | +INF | . |
| T2.N3.P3 | -INF | . | +INF | . |
| T3.N1.P1 | -INF | 2214.000 | +INF | . |
| T3.N1.P2 | -INF | . | +INF | . |
| T3.N1.P3 | -INF | 691.675 | +INF | . |
| T3.N2.P1 | -INF | . | +INF | . |
| T3.N2.P2 | -INF | . | +INF | . |
| T3.N2.P3 | -INF | . | +INF | . |
| T3.N3.P1 | -INF | . | +INF | . |
| T3.N3.P2 | -INF | . | +INF | . |
| T3.N3.P3 | -INF | . | +INF | . |

---- VAR K Cantidad de toneladas de material que se proesan en la plataforma 6

de la terraza t del nivel n en el periodo p

| | LOWER | LEVEL | UPPER | MARGINAL |
|----------|-------|----------|-------|----------|
| T1.N1.P1 | -INF | . | +INF | . |
| T1.N1.P2 | -INF | 4967.143 | +INF | . |
| T1.N1.P3 | -INF | 3089.738 | +INF | . |
| T1.N2.P1 | -INF | . | +INF | . |
| T1.N2.P2 | -INF | . | +INF | . |
| T1.N2.P3 | -INF | . | +INF | . |
| T1.N3.P1 | -INF | . | +INF | . |
| T1.N3.P2 | -INF | . | +INF | . |
| T1.N3.P3 | -INF | . | +INF | . |

| | | | | |
|----------|------|----------|------|---|
| T2.N1.P1 | -INF | 1962.429 | +INF | . |
| T2.N1.P2 | -INF | . | +INF | . |
| T2.N1.P3 | -INF | 938.702 | +INF | . |
| T2.N2.P1 | -INF | . | +INF | . |
| T2.N2.P2 | -INF | . | +INF | . |
| T2.N2.P3 | -INF | . | +INF | . |
| T2.N3.P1 | -INF | . | +INF | . |
| T2.N3.P2 | -INF | . | +INF | . |
| T2.N3.P3 | -INF | . | +INF | . |
| T3.N1.P1 | -INF | 3004.714 | +INF | . |
| T3.N1.P2 | -INF | . | +INF | . |
| T3.N1.P3 | -INF | 938.702 | +INF | . |
| T3.N2.P1 | -INF | . | +INF | . |
| T3.N2.P2 | -INF | . | +INF | . |
| T3.N2.P3 | -INF | . | +INF | . |
| T3.N3.P1 | -INF | . | +INF | . |
| T3.N3.P2 | -INF | . | +INF | . |
| T3.N3.P3 | -INF | . | +INF | . |

---- VAR PF1 Producto 1 Triturado de 1" saliente de la plataforma 6 de la terra

za t del nivel n

| | LOWER | LEVEL | UPPER | MARGINAL |
|----------|-------|----------|-------|----------|
| T1.N1.P1 | -INF | . | +INF | . |
| T1.N1.P2 | -INF | 1390.800 | +INF | . |
| T1.N1.P3 | -INF | 865.127 | +INF | . |
| T1.N2.P1 | -INF | . | +INF | . |
| T1.N2.P2 | -INF | . | +INF | . |
| T1.N2.P3 | -INF | . | +INF | . |
| T1.N3.P1 | -INF | . | +INF | . |
| T1.N3.P2 | -INF | . | +INF | . |
| T1.N3.P3 | -INF | . | +INF | . |
| T2.N1.P1 | -INF | 549.480 | +INF | . |
| T2.N1.P2 | -INF | . | +INF | . |
| T2.N1.P3 | -INF | 262.837 | +INF | . |
| T2.N2.P1 | -INF | . | +INF | . |
| T2.N2.P2 | -INF | . | +INF | . |
| T2.N2.P3 | -INF | . | +INF | . |
| T2.N3.P1 | -INF | . | +INF | . |
| T2.N3.P2 | -INF | . | +INF | . |
| T2.N3.P3 | -INF | . | +INF | . |
| T3.N1.P1 | -INF | 841.320 | +INF | . |
| T3.N1.P2 | -INF | . | +INF | . |
| T3.N1.P3 | -INF | 262.837 | +INF | . |
| T3.N2.P1 | -INF | . | +INF | . |
| T3.N2.P2 | -INF | . | +INF | . |
| T3.N2.P3 | -INF | . | +INF | . |
| T3.N3.P1 | -INF | . | +INF | . |
| T3.N3.P2 | -INF | . | +INF | . |
| T3.N3.P3 | -INF | . | +INF | . |

---- VAR PF2 Producto 2 Triturado de 0.5 " saliente de la plataforma 6 de la te

rraza t del nivel n

| | LOWER | LEVEL | UPPER | MARGINAL |
|--|-------|----------|-------|----------|
| T1.N1.P1 | -INF | . | +INF | . |
| T1.N1.P2 | -INF | 1986.857 | +INF | . |
| T1.N1.P3 | -INF | 1235.895 | +INF | . |
| T1.N2.P1 | -INF | . | +INF | . |
| T1.N2.P2 | -INF | . | +INF | . |
| T1.N2.P3 | -INF | . | +INF | . |
| T1.N3.P1 | -INF | . | +INF | . |
| T1.N3.P2 | -INF | . | +INF | . |
| T1.N3.P3 | -INF | . | +INF | . |
| T2.N1.P1 | -INF | 784.971 | +INF | . |
| T2.N1.P2 | -INF | . | +INF | . |
| T2.N1.P3 | -INF | 375.481 | +INF | . |
| T2.N2.P1 | -INF | . | +INF | . |
| T2.N2.P2 | -INF | . | +INF | . |
| T2.N2.P3 | -INF | . | +INF | . |
| T2.N3.P1 | -INF | . | +INF | . |
| T2.N3.P2 | -INF | . | +INF | . |
| T2.N3.P3 | -INF | . | +INF | . |
| T3.N1.P1 | -INF | 1201.886 | +INF | . |
| T3.N1.P2 | -INF | . | +INF | . |
| T3.N1.P3 | -INF | 375.481 | +INF | . |
| T3.N2.P1 | -INF | . | +INF | . |
| T3.N2.P2 | -INF | . | +INF | . |
| T3.N2.P3 | -INF | . | +INF | . |
| T3.N3.P1 | -INF | . | +INF | . |
| T3.N3.P2 | -INF | . | +INF | . |
| T3.N3.P3 | -INF | . | +INF | . |
| ---- VAR PF3 Producto 3 Polvillo saliente de la plataforma 6 de la terraza t | | | | |
| de | | | | |
| 1 nivel n | | | | |
| | LOWER | LEVEL | UPPER | MARGINAL |
| T1.N1.P1 | -INF | . | +INF | . |
| T1.N1.P2 | -INF | 248.357 | +INF | . |
| T1.N1.P3 | -INF | 154.487 | +INF | . |
| T1.N2.P1 | -INF | . | +INF | . |
| T1.N2.P2 | -INF | . | +INF | . |
| T1.N2.P3 | -INF | . | +INF | . |
| T1.N3.P1 | -INF | . | +INF | . |
| T1.N3.P2 | -INF | . | +INF | . |
| T1.N3.P3 | -INF | . | +INF | . |
| T2.N1.P1 | -INF | 98.121 | +INF | . |
| T2.N1.P2 | -INF | . | +INF | . |
| T2.N1.P3 | -INF | 46.935 | +INF | . |
| T2.N2.P1 | -INF | . | +INF | . |
| T2.N2.P2 | -INF | . | +INF | . |
| T2.N2.P3 | -INF | . | +INF | . |
| T2.N3.P1 | -INF | . | +INF | . |
| T2.N3.P2 | -INF | . | +INF | . |
| T2.N3.P3 | -INF | . | +INF | . |
| T3.N1.P1 | -INF | 150.236 | +INF | . |
| T3.N1.P2 | -INF | . | +INF | . |
| T3.N1.P3 | -INF | 46.935 | +INF | . |

| | | | | | |
|---|-------|----------|------------|----------|----------|
| T3.N2.P1 | -INF | . | +INF | . | |
| T3.N2.P2 | -INF | . | +INF | . | |
| T3.N2.P3 | -INF | . | +INF | . | |
| T3.N3.P1 | -INF | . | +INF | . | |
| T3.N3.P2 | -INF | . | +INF | . | |
| T3.N3.P3 | -INF | . | +INF | . | |
| ---- VAR FPF1 Factor de productos finales 1 | | | | | |
| | LOWER | LEVEL | UPPER | MARGINAL | |
| P1 | -INF | 1390.800 | +INF | . | |
| P2 | -INF | 1390.800 | +INF | . | |
| P3 | -INF | 1390.800 | +INF | . | |
| ---- VAR FPF2 Factor de productos finales 2 | | | | | |
| | LOWER | LEVEL | UPPER | MARGINAL | |
| P1 | -INF | 1986.857 | +INF | . | |
| P2 | -INF | 1986.857 | +INF | . | |
| P3 | -INF | 1986.857 | +INF | . | |
| ---- VAR FPF3 Factor de productos finales 3 | | | | | |
| | LOWER | LEVEL | UPPER | MARGINAL | |
| P1 | -INF | 431.357 | +INF | . | |
| P2 | -INF | 431.357 | +INF | . | |
| P3 | -INF | 431.357 | +INF | . | |
| ---- VAR FPF4 Factor de productos finales 4 | | | | | |
| | LOWER | LEVEL | UPPER | MARGINAL | |
| P1 | -INF | 2961.687 | +INF | . | |
| P2 | -INF | 3179.415 | +INF | . | |
| P3 | -INF | 2978.835 | +INF | . | |
| | | LOWER | LEVEL | UPPER | MARGINAL |
| ---- VAR FO | | | | | |
| | | -INF | 1.5355E+9 | +INF | . |
| FO Función objetivo | | | | | |
| **** REPORT SUMMARY : | | | | | |
| | | 0 | NONOPT | | |
| | | 0 | INFEASIBLE | | |
| | | 0 | UNBOUNDED | | |